ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ
INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO

CONTRATO
IDU 1556 – 2017

ACTUALIZACIÓN, COMPLEMENTACIÓN Y AJUSTE DEL INVENTARIO GEOMÉTRICO Y ESTRUCTURAL, ASÍ COMO LA DETERMINACIÓN DEL DIAGNÓSTICO, EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO Y DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DEL RIESGO, PARA LA INFRAESTRUCTURA DE PUENTES DE BOGOTÁ D.C.

INFORME FINAL DE CONSULTORÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES Y OBRAS CIVILES – CIMOC
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Bogotá, Colombia
Abril de 2019

HOJA DE CONTROL DE PROYECTO Y ENTREGAS

Información General:

Título	ACTUALIZACIÓN, COMPLEMENTACIÓN Y AJUSTE DEL INVENTARIO GEOMÉTRICO Y ESTRUCTURAL, ASÍ COMO LA DETERMINACIÓN DEL DIAGNÓSTICO, EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO Y DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DEL RIESGO, PARA LA INFRAESTRUCTURA DE PUENTES DE BOGOTÁ D.C.		
Cliente	Instituto de Desarrollo Urbano IDU		
Contrato No.	1556 – 2017	**Fecha de contrato**	27/12/2017
Fecha de inicio	31/01/2018	**Fecha de terminación**	30/01/2019
Otrosí No.	-	**Fecha de ampliación**	-

Contacto:

Entidad	Nombre	Cargo	Teléfono	Correo electrónico
Universidad de los Andes	Luis Eduardo Yamin Lacouture	Director de consultoría	(1) 3394949 ext. 1721	lyamin@uniandes.edu.co
IDU	Joanny Camelo Yepez	Directora Técnica Estratégica	(1) 3386660	joanny.camelo@idu.gov.co

Distribución:

Fecha	Documento	Medio de envío	Remitente	Destinatario
29/01/2019	Informe Final de Consultoría – Versión 1	Electrónico/ Físico	Luis Eduardo Yamin Lacouture	Joanny Camelo Yepez
25/04/2019	Informe Final de Consultoría – Versión 2	Electrónico/ Físico	Luis Eduardo Yamin Lacouture	Joanny Camelo Yepez

Revisiones:

No.	Fecha	Documento	Elaboró	Revisó	Aprobó
1	29/01/2019	Informe Final de Consultoría – Versión 1	Universidad de los Andes	Luis Eduardo Yamin Lacouture	Luis Eduardo Yamin Lacouture
2	25/04/2019	Informe Final de Consultoría – Versión 2	Universidad de los Andes	Luis Eduardo Yamin Lacouture	Luis Eduardo Yamin Lacouture

_____

LUIS EDUARDO YAMIN LACOUTURE
Director de Consultoría
Universidad de los Andes

EQUIPO DE TRABAJO DEL CONTRATO

PERSONAL PROFESIONAL DEL CONTRATO

Luis Eduardo Yamin Lacouture
Director de Proyecto

Juan Francisco Javier Correal Daza
Especialista Estructural

Juan Carlos Reyes Ortiz
Especialista Estructural

Juan Sebastián Echeverry Fernández
Especialista Estructural

Nelson Betancour Suárez
Especialista Estructural

Johoner Venicio Correa Cruz
Especialista SIG

Wendy Yolanda Herrera Rodríguez
Especialista SIG

Carlos Alejandro Arboleda Arango
Especialista en Costos y Presupuesto

Fernando Ramírez Rodríguez
Ingeniero de Apoyo

José Raúl Rincón García
Ingeniero de Apoyo

Camilo Andrés Herrán Pérez
Ingeniero de Apoyo

Diana Carolina Herrera García
Ingeniero de Apoyo

PERSONAL DE APOYO TÉCNICO DEL CONTRATO

Rafael Ignacio Fernández Miranda
Ingeniero de Apoyo

Esteban Prada Serrano
Ingeniero de Apoyo

Julián Miguel Francisco Daza Gómez
Ingeniero de Apoyo

Angie Paola García Arévalo
Ingeniero de Apoyo

Miguel Alberto Rueda Ramírez
Ingeniero de Apoyo

Ricardo Andrés González Tabares
Ingeniero de Apoyo

Manuel José Mojica Boada
Auxiliar de Ingeniería

Maria Paula Triana Correa
Auxiliar de Ingeniería

Ivan David Moreno Salcedo
Auxiliar de Ingeniería

Astrid Natalia Gutierrez Bernal
Auxiliar de Ingeniería

Javier Rodolfo Albarracín Sierra
Auxiliar de Ingeniería

Daniel Castrillón Campo
Auxiliar de Ingeniería

PERSONAL COMPLEMENTARIO UNIANDES

Pedro Fabián Pérez Arteaga
Experto en Topografía

Carlos Alfredo Rodríguez Rojas
Experto en Topografía

Camilo Andrés Lizarazo Niño
Profesional en Topografía

Nicolás Alexander Viasus Valero
Profesional de Dibujo Técnico

Juan David Sandoval Triana
Ingeniero de Apoyo

Cristian David González Rusinque
Ingeniero de Apoyo

Juan Sebastián Spinel Peñuela
Ingeniero de Apoyo

Edy José Galvis Campillo
Ingeniero de Apoyo

Daniela Garzón Sanabria
Ingeniero de Apoyo

Carlos Santiago Oliveros Morales
Ingeniero de Apoyo

Maria Camila Sánchez Rujana
Ingeniero de Apoyo

Sebastián Vargas Alejo
Ingeniero de Apoyo

Javier Alfredo Calderón Celedón
Ingeniero de Apoyo

Isaac Quintero Bermúdez
Ingeniero de Apoyo

Omayra Díaz López
Profesional de Dibujo Técnico

Edwin Noel Cárdenas Fernández
Profesional de Dibujo Técnico

Leidy Lucía Bernal Cuervo
Profesional de Dibujo Técnico

Diego Fernando León Hoyos
Auxiliar de Ingeniería

Maria Alejandra Torres Gómez
Auxiliar de Ingeniería

Tatiana Andrea Casas Cerón
Auxiliar de Ingeniería

José Sebastián García Díaz
Programador/Diseñador Web

Alejandro Peña León
Técnico de Campo

Jorge Alberto Rincón Bautista
Técnico de Campo

José Segundo Naranjo Villanueva
Técnico de Campo

Oscar Mauricio Tobar Rozo
Técnico de Campo

Melquicedec Fiquitiva
Auxiliar de Campo

Andrés Velásquez
Auxiliar de Campo

Jonathan Estevens Estrada Ardila
Asistente Administrativo

RESUMEN

Este documento presenta el Informe Final de Consultoría dentro del marco del contrato No. 1556 de 2017 cuyo objeto es la ACTUALIZACIÓN, COMPLEMENTACIÓN Y AJUSTE DEL INVENTARIO GEOMÉTRICO Y ESTRUCTURAL, ASÍ COMO LA DETERMINACIÓN DEL DIAGNÓSTICO, EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO Y DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DEL RIESGO, PARA LA INFRAESTRUCTURA DE PUENTES DE BOGOTÁ D.C.

El presente proyecto tiene como alcance la estimación de pérdidas probables del portafolio de puentes existentes en el Distrito por eventos sísmicos, para este fin se realizarán las actividades de actualización, complementación y ajuste del inventario geométrico y estructural, así como la determinación del diagnóstico para la infraestructura de puentes de Bogotá D.C.

Para las actividades del inventario geométrico y estructural se realizó el levantamiento en campo de cada una de las variables de las estructuras de puentes definidas en el portafolio de puentes del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, portafolio que será alimentado con la revisión y análisis de toda la información de puentes disponibles en los inventarios realizados en años anteriores (Consultorías del Banco Mundial), en planos arquitectónicos y estructurales, y planos record de puentes vehiculares y peatonales en el repositorio de IDU, en el Centro de Documentación del IDU, archivo Distrital, archivo de empresas de consultoría y de construcción de puentes, entre otros.

En cuanto a la estimación de pérdidas probables, se utilizó la metodología según la cual se realiza la evaluación de la acción sísmica a partir de la selección del periodo de retorno, el cálculo de los espectros de probabilidad uniforme. A partir de los análisis realizados para la definición de la amenaza sísmica, se obtendrán los mapas de amenaza que representen la aceleración máxima del terreno en la ciudad de Bogotá D.C. para un periodo de retorno dado y para un periodo estructural dado, a fin de permitir observar la variación en la intensidad sísmica para unas mismas condiciones.

Adicionalmente se definieron las variables para cada una de las tipologías estructurales, con el fin de realizar la evaluación del comportamiento sísmico de cada una de estas estructuras, por medio de modelos estructurales en software especializado realizando análisis estático lineal, análisis modal, análisis estático no lineal (push-over), análisis dinámico no lineal, y análisis que incluyen efectos P-delta. A partir de estos análisis computacionales se obtuvieron parámetros de demanda sísmicos de la estructura, los cuales se relacionan directamente con las curvas de daño y el costo asociado a los mismos. Una vez identificados estos elementos, se obtuvieron curvas de vulnerabilidad por tipología en cada dirección de análisis, generando un catálogo de funciones de vulnerabilidad representativas para las tipologías estructurales de los puentes de la ciudad de Bogotá D.C., que permitan elaborar esquemas confiables de retención y transferencia del riesgo.

Paralelo a lo anteriormente mencionado y como complemento, se definieron los niveles de daños de cada uno de los elementos que hacen parte del puente, con el fin de identificar y relacionar los costos correspondientes, mediante un modelo de costos y componentes.

Se realizó una valoración económica de los activos expuestos, obteniendo la valoración de costos de obra nueva por metro cuadrado para cada uno de los puentes, a fin de ser utilizada en la valoración económica de reposición. Para esto se realizaron presupuestos para cada tipología, involucrando como mínimo los capítulos de superestructura, subestructura y cimentación, así como los análisis de precios unitarios detallados de todas las actividades incluidas en los presupuestos.

A partir de los modelos se definieron los daños de las tipologías estructurales de los puentes vehiculares y peatonales. Se determinaron las funciones de costos de reparación y costo de reemplazo de las tipologías estructurales en función del nivel de daño esperado.

Por último, se realizó el análisis del riesgo mediante la plataforma CAPRA-GIS, para el portafolio de puentes vehiculares y peatonales de la ciudad de Bogotá D.C., considerando la información de exposición, valoración económica de los activos expuestos, amenaza sísmica y las funciones de vulnerabilidad. El análisis para la mitigación del riesgo considerará las pérdidas económicas físicas esperadas en los puentes ante eventos sísmicos, en la cual se establecerá la pérdida anual esperada (PAE) tanto para cada uno de los puentes que hacen parte del portafolio de infraestructura en la ciudad como para el conjunto de los mismos, y la pérdida máxima probable (PML) por medio de la curva de excedencia de pérdidas. Finalmente, se definen estrategias de mitigación del riesgo a través de programas de intervención y reforzamiento de puentes, priorización de estas intervenciones, y estrategias de protección financiera de la infraestructura de puentes del Distrito.

TABLA DE CONTENIDO

1 GENERALIDADES 1
1.1 INTRODUCCIÓN 1
1.2 JUSTIFICACIÓN 2
1.3 ANTECEDENTES 3
1.4 MARCO CONCEPTUAL 5
1.5 DEFINICIONES BÁSICAS 6
2 OBJETIVOS Y ALCANCE 11
2.1 OBJETIVOS GENERALES 11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11
2.3 ALCANCE DE ACTIVIDADES PRINCIPALES 14
3 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA 19
3.1 AMENAZA SÍSMICA EN EL BASAMENTO ROCOSOS 19
3.1.1 Metodología general 19
3.1.2 Catálogo sísmico 20
3.1.3 Fuentes sismogénicas 22
3.1.4 Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas 25
3.1.5 Leyes de atenuación 27
3.1.6 Evaluación de la amenaza sísmica en el basamento recoso 28
3.2 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO Y EFECTOS DE SITIO 39
3.2.1 Metodología 39
3.2.2 Caracterización geológica y geotécnica 42
3.2.3 Definición de zonas geológicas 42
3.2.4 Caracterización de parámetros geotécnicos 48
3.2.5 Periodo fundamental del suelo 52
3.2.6 Análisis de respuesta unidimensional del suelo 53
3.2.7 Modelación y análisis de perfiles estocásticos de suelo 54
3.2.8 Amplificación del suelo en superficie 55
3.3 AMENAZA SÍSMICA EN SUPERFICIE 60
3.3.1 Metodología para evaluar la amenaza sísmica en superficie 60
3.3.2 Resultados de amenaza en superficie 62

3.4 COMPARACIÓN DE LA AMENAZA FRENTE A LA NORMA 70
3.5 REPRESENTACIÓN MEDIANTE EVENTOS ESTOCÁSTICOS 72
4 LEVANTAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN....74
4.1 GENERALIDADES 74
4.2 RESUMEN DEL CONTENIDO DE LA BASE DE DATOS DE PUENTES 75
4.2.1 Información general 75
4.2.2 Caracterización de estructuras con otros usos 76
4.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y BASE DE DATOS 78
4.3.1 Generalidades 78
4.3.2 Definición de campos de la base de datos 78
4.3.3 Modelo de base de datos geográfica....79
4.3.4 Modelo relacional....97
4.3.5 Documentación complementaria....100
4.4 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE 100
4.5 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE PUENTES 112
4.5.1 Generalidades 112
4.5.2 Georreferenciación 119
4.5.3 Levantamiento topográfico....125
4.6 INFORMACIÓN GEOMÉTRICA, ESTRUCTURAL Y DEL ESTADO DE LOS PUENTES 139
4.6.1 Generalidades 139
4.6.2 Levantamiento geométrico y estructural 139
4.6.3 Inspección básica de puentes....150
4.7 EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS PUENTES Y DIAGNÓSTICO 156
4.7.1 Calificación del estado de los componentes estructurales....157
4.7.2 Calificación del estado de servicio de los puentes 157
4.7.3 Clasificación de elementos de servicio - Metodología TES....158
4.7.4 Consolidación de información....164
4.7.5 Priorización y clasificación de puentes según calificación 165
4.7.6 Consideraciones especiales en el trabajo de campo 165
4.7.7 Resumen de resultados de la evaluación del estado de los puentes....166
5 VALORACIÓN ECONÓMICA DE PUENTES....179
5.1 INTRODUCCIÓN Y LIMITACIONES....179

5.2 RECOPILACIÓN Y REVISIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE 182
5.3 MODELO DE VALORACIÓN ECONÓMICA DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES 188
5.3.1 Revisión bibliográfica 188
5.3.2 Metodología para la valoración económica de puentes 191
5.3.3 Estimación de cantidades estructurales para presupuestos 193
5.3.4 Comparación de índices con información en literatura 212
5.3.5 Precios unitarios para valoración económica 215
5.3.6 Presupuestación típica para construcción de puentes 216
5.3.7 Variación del valor estimado mediante presupuesto de acuerdo con estadísticos 219
5.3.8 Validación del modelo de valoración económica 220
5.4 SOFTWARE PARA LA VALORACIÓN ECONÓMICA 222
5.4.1 Descripción general 222
5.4.2 Limitaciones básicas del software 224
5.5 VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS PUENTES 225
5.5.1 Valoración económica de la base de datos de puentes de Bogotá 225
5.5.2 Verificación del valor de reposición versus la valoración económica mediante el modelo propuesto 227
5.6 COSTOS DE REPARACIÓN Y FUNCIONES DE FRAGILIDAD 228
5.6.1 Generalidades 228
5.6.2 Información disponible y estados de daño 228
5.6.3 Tipos de reparación por componente según el estado de daño 235
5.6.4 Formatos de costos de reparación 237
5.6.5 Formatos alternativos para puentes de superestructura metálica 254
6 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES 257
6.1 INTRODUCCIÓN 257
6.2 METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD 258
6.2.1 Vulnerabilidad sísmica estructural 258
6.2.2 Taxonomía 259
6.2.3 Puentes arquetipo 277
6.2.4 Señales sísmicas para el análisis dinámico 278
6.2.5 Modelación no lineal 283

6.2.6 Obtención de parámetros de demanda sísmica....284
6.2.7 Modelo de componentes....285
6.2.8 Procedimiento de integración de costos de reparación para evaluación de la vulnerabilidad 286
6.2.9 Cálculo de funciones de vulnerabilidad....287
6.3 REVISIÓN, DEFINICIÓN Y ASIGNACIÓN DE TIPOLOGÍAS....289
6.4 IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES CRÍTICOS POR TIPOLOGÍA 292
6.5 DEFINICIÓN DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO NO LINEAL....294
6.5.1 Componentes susceptibles a daño....294
6.5.2 Espaldar de estribos y rellenos compactados....295
6.5.3 Llave de cortante externa....297
6.5.4 Llave de cortante interna....299
6.5.5 Columnas....302
6.5.6 Pantallas....304
6.5.7 Neoprenos....306
6.6 CONFORMACIÓN DE MODELOS NO LINEALES PARAMÉTRICOS....308
6.7 SOFTWARE PARA ANÁLISIS NO LINEAL CRONOLÓGICO (PERFORM 3D – OPENSEES)....332
6.8 PARÁMETROS DE DEMANDA SÍSMICA....338
6.9 MODELOS DE COMPONENTES SUSCEPTIBLES A DAÑO....351
6.9.1 Funciones de fragilidad....351
6.9.2 Catálogo de funciones de fragilidad....352
6.9.3 Costos de reparación....354
6.9.4 Modelo de componentes....354
6.10 CATÁLOGO DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD....355
6.10.1 Análisis de sensibilidad....359
6.10.2 Tipologías particulares....365
6.10.3 Metodología de asignación....372
7 EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO....374
7.1 GENERALIDADES....374
7.2 PORTAFOLIO DE EXPOSICIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO....376
7.2.1 Información general....376

7.2.2 Caracterización de puentes vehiculares 379
7.2.3 Caracterización de puentes peatonales 382
7.2.4 Agrupación según mallas viales 385
7.3 RIESGO SÍSMICO PARA EL PORTAFOLIO GENERAL DE PUENTES 388
7.4 RIESGO SÍSMICO POR TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES Y MALLA VIAL 396
7.5 RESULTADOS POR LOCALIDADES 401
7.6 EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA ESCENARIOS DETERMINISTAS 405
8 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO 411
8.1 INTRODUCCIÓN 411
8.2 OPCIONES DE INTERVENCIÓN Y REFORZAMIENTO DE PUENTES 414
8.2.1 Bases conceptuales para el reforzamiento y limitaciones 414
8.2.2 Identificación de componentes susceptibles a daño 414
8.2.3 Medidas de intervención por componentes 415
8.2.4 Presupuestos preliminares de opciones de reforzamiento 427
8.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA EL PORTAFOLIO INTERVENIDO 428
8.3.1 Costo de las intervenciones 428
8.3.2 Reducción de la vulnerabilidad 434
8.3.3 Riesgo del portafolio intervenido 438
8.4 PROGRAMAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO 439
8.5 INDICADORES DE BENEFICIOS, EFICIENCIA Y COSTOS 440
8.5.1 Indicadores beneficio – costo por tipologías de puentes 440
8.5.2 Indicadores de eficiencia – costo para priorización de intervenciones 445
8.5.3 Priorización de puentes por programa 449
8.6 BASES PARA UN PLAN DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LOS PUENTES DE LA CIUDAD 460
8.6.1 Objetivos y prioridades generales del plan de mitigación del riesgo 460
8.6.2 Programas de intervención propuestos 460
8.6.3 Esquema de priorización de intervenciones 461
8.6.4 Periodo de implementación y cronograma de actividades específicas para la implementación del plan 462
9 ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN FINANCIERA 464
9.1 INTRODUCCIÓN 464
9.2 MARCO CONCEPTUAL 466

9.2.1 Conceptos básicos 466
9.2.2 Componentes básicos de un esquema de transferencia 467
9.2.3 Instrumentos de protección financiera para infraestructura y riesgos asociados 469
9.2.4 Combinación de instrumentos financieros 474
9.3 ANÁLISIS DE OPCIONES DE ASEGURAMIENTO Y PROTECCIÓN FINANCIERA 475
9.3.1 Crédito contingente 475
9.3.2 Seguro paramétrico.....476
9.3.3 Seguro indemnizatorio 477
10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 479
10.1 CONCLUSIONES 479
10.2 RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS 487
10.3 RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN GENERAL DE LOS PUENTES DE LA CIUDAD 492
11 REFERENCIAS.....495

ANEXOS

ANEXO A-1 Amenaza sísmica ……...……. (versión digital)

ANEXO A-2 Efectos de sitio ……...…… (versión digital)

ANEXO A-3 Base de datos……...……. (versión digital)

ANEXO A-4 Recopilación de planos……...……...……... (versión digital)

ANEXO A-5 Levantamiento topográfico……...……...……. (versión digital)

ANEXO A-6 Levantamiento e inspección básica…….. (versión digital)

ANEXO A-7 Valoración económica……...……... (versión digital)

ANEXO A-8 Vulnerabilidad……...……... (versión digital)

ANEXO A-9 Evaluación probabilística del riesgo ……...……. (versión digital)

ANEXO A-10 Estrategias de mitigación del riesgo ……..... (versión digital)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Distribución de eventos del catálogo por rangos de magnitud 20
Tabla 3-2. Características de las zonas sismogénicas corticales y de subducción 25
Tabla 3-3. Parámetros de sismicidad de las fuentes 27
Tabla 3-4. Ordenadas espectrales consideradas en el modelo de amenaza sísmica 29
Tabla 3-5. Rangos de pendientes para clasificación de suelos 43
Tabla 3-6. Número de perforaciones en zonas geotécnicas 49
Tabla 4-1. Caracterización de la exposición de los puentes según uso 76
Tabla 4-2. Caracterización de la exposición para las estructuras con otros usos 76
Tabla 4-3. Atributos de la capa vectorial Puente 81
Tabla 4-4. Atributos de la capa vectorial ApoyoIntermedio 83
Tabla 4-5. Atributos de la capa vectorial Viga 84
Tabla 4-6. Atributos de la capa vectorial Tablero 85
Tabla 4-7. Atributos de la capa vectorial Juntas 86
Tabla 4-8. Atributos de la tabla relacionada CaractGeneral 86
Tabla 4-9. Atributos de la tabla relacionada ApoyoExtremo 87
Tabla 4-10. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioNoEstr 88
Tabla 4-11. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioGeom 89
Tabla 4-12. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioEstr 90
Tabla 4-13. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioPato 90
Tabla 4-14. Atributos de la tabla relacionada InspBasicaAI 91
Tabla 4-15. Atributos de la tabla relacionada InsBasicaV 93
Tabla 4-16. Atributos de la tabla relacionada InspBasicaT 94
Tabla 4-17. Atributos de la tabla relacionada Riesgo 96
Tabla 4-18. Atributos de la tabla relacionada Archivos 97
Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos. 103
Tabla 4-20. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.1 para el levantamiento topográfico .. 128
Tabla 4-21. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.2 para el levantamiento topográfico .. 130
Tabla 4-22. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.3 para el levantamiento topográfico .. 130
Tabla 4-23. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.4 para el levantamiento topográfico .. 131
Tabla 4-24. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.5 para el levantamiento topográfico .. 131

Tabla 4-25. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.6 para el levantamiento topográfico .. 131
Tabla 4-26. PKID de puentes asignados al Grupo 2 para el levantamiento topográfico 132
Tabla 4-27 Registro fotográfico recomendado 142
Tabla 4-28 Patologías a evaluar en elementos de concreto reforzado en la subestructura 152
Tabla 4-29. Formato de calificación de estado de daño para elementos estructurales 154
Tabla 4-30. Formato de calificación metodología TES para elementos de servicio 156
Tabla 4-31. Calificación de estado de servicio de puentes 158
Tabla 4-32. Puente vehiculares y peatonales por malla vial 175
Tabla 4-33. Listado de puentes vehiculares en estado estructural malo 176
Tabla 4-34. Listado de puentes vehiculares en estado estructural regular 176
Tabla 4-35. Listado de puentes vehiculares en estado de servicio malo 177
Tabla 4-36. Listado de puentes vehiculares en estado de servicio regular 177
Tabla 4-37. Listado de puentes peatonales en estado estructural malo 178
Tabla 4-38. Listado de puentes peatonales en estado estructural regular 178
Tabla 4-39. Listado de puentes peatonales en estado de servicio malo 178
Tabla 4-40. Listado de puentes peatonales en estado de servicio regular 178
Tabla 5-1. Resumen de información recopilada requerida para la elaboración de los modelos de valoración económica 183
Tabla 5-2. Información contenida en la carpeta contratos de diseño y construcción 183
Tabla 5-3. Información contenida en carpeta contratos de reforzamiento, reparación y mantenimiento .. 187
Tabla 5-4. Número de luces o ejes de apoyo de puentes vehiculares analizados 195
Tabla 5-5. Número de luces o ejes de apoyo de puentes peatonales analizados 195
Tabla 5-6. Validación del algoritmo de valoración económica de puentes 220
Tabla 5-7. Valor total del portafolio de la infraestructura de puentes de Bogotá 226
Tabla 5-8. Descripción de estados de daño de columnas 230
Tabla 5-9. Descripción de estados de daño de neoprenos 231
Tabla 5-10. Descripción de estados de daño de estribos 232
Tabla 5-11. Descripción de estados de daño de llaves de cortante 233
Tabla 5-12. Referencias internacionales de artículos académicos sobre estados de daño para diferentes tipos de componentes 234
Tabla 6-1. Taxonomía propuesta para los puentes de Bogotá 260
Tabla 6-2. Sistemas estructurales principales 261
Tabla 6-3. Señales corticales 279

Tabla 6-4. Señales subducción 280
Tabla 6-5. Parámetros análisis incremental dinámico 285
Tabla 6-6. Ejemplo modelo de componentes 286
Tabla 6-7. Tipologías representativas de puentes 292
Tabla 6-8. Descripción del archivo de entrada 309
Tabla 6-9. Estados límite 352
Tabla 6-10. Modelo de componentes tipo 354
Tabla 6-11. Daños reportados en Box Culverts (Adaptado de Youd y Beckman, 1996) 368
Tabla 6-12. Valor de reparación de daños 369
Tabla 6-13. Correlación de puentes atirantados y funciones base 372
Tabla 6-14. Factores de afectación por elemento taxonómico 372
Tabla 7-1. Caracterización de la exposición por uso 376
Tabla 7-2. Caracterización de la exposición de los puentes Vehiculares 379
Tabla 7-3. Caracterización de la exposición de los puentes Peatonales 382
Tabla 7-4. Caracterización de la exposición de los puentes en las mallas viales de análisis 385
Tabla 7-5. Pérdida anual esperada y pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno ... 388
Tabla 7-6. PAE absoluta y relativa por Uso para el portafolio general 391
Tabla 7-7 Escenarios utilizados en el análisis determinista del riesgo 405
Tabla 7-8 Resultados de la evaluación determinista del riesgo para el portafolio de puentes vehiculares 405
Tabla 7-9 Resultados de la evaluación determinista del riesgo para el portafolio de puentes peatonales. 406
Tabla 8-1. Posibles componentes susceptibles a daño por tipología 415
Tabla 8-2. Medidas típicas de intervención por componente susceptible a daño y valor unitario 427
Tabla 8-3. Medidas de intervención vehiculares 429
Tabla 8-4. Medidas de intervención peatonales 430
Tabla 8-5. Resumen costos de intervención puentes vehiculares 431
Tabla 8-6. Resumen costos de intervención puentes peatonales 432
Tabla 8-7. Pérdida anual esperada y pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno ... 439
Tabla 8-8. Puentes por programa de intervención 440
Tabla 8-9. Relaciones B/C puentes vehiculares 442
Tabla 8-10. Relaciones B/C puentes peatonales 443
Tabla 8-11. Relaciones E/C puentes vehiculares 446
Tabla 8-12. Relaciones E/C puentes peatonales 447

Tabla 8-13. Priorización puentes programa 1 452
Tabla 8-14. Priorización puentes programa 2 454
Tabla 8-15. Priorización puentes programa 3 456
Tabla 8-16. Priorización puentes programa 4 458
Tabla 9-1. Comparación del seguro indemnizatorio con el seguro paramétrico 473
Tabla 9-2. Evaluación de la prima pura técnica para portafolio de puentes 477

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Metodología riesgo sísmico 6
Figura 3-1. Metodología del análisis probabilista de amenaza sísmica 20
Figura 3-2. Catálogo sísmico de Colombia unificado en magnitud de momento M_w 21
Figura 3-3. Número de eventos acumulados por año 22
Figura 3-4. Zonas sismogénicas corticales 23
Figura 3-5. Zonas sismogénicas de subducción 24
Figura 3-6. Tasas de excedencia de magnitudes para el modelo de sismicidad de Poisson 26
Figura 3-7. Curvas de amenaza para algunas localidades de Bogotá 30
Figura 3-8. Espectros de amenaza uniforme para algunas localidades de Bogotá 33
Figura 3-9. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 31 años 34
Figura 3-10. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 225 años 35
Figura 3-11. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 475 años 36
Figura 3-12. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 1000 años 37
Figura 3-13. Distribución de la aceleración espectral roca (cm/s^2) para TR = 2500 años 38
Figura 3-14. Metodología para la obtención de los factores de amplificación para cada zona de análisis . 41
Figura 3-15. Zonas geológico/geotécnicas de respuesta sísmica para la zona urbana de Bogotá D.C. 45
Figura 3-16. Modelo de Vs-30 para la ciudad de Bogotá D.C. 46
Figura 3-17. Zonas geológico/geotécnicas definitivas para Bogotá D.C. 47
Figura 3-18. (a) Perforaciones geotécnicas recopiladas; (b) Zonas representativas de la ciudad 48
Figura 3-19. Caracterización estadística de la Zona 8 (Norte): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad 50
Figura 3-20. Caracterización estadística de la Zona 32 (Sur): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad 50
Figura 3-21. Caracterización estadística de la Zona 19 (Occidente): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad 51
Figura 3-22. Caracterización estadística de la Zona 21 (Oriente): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad 51
Figura 3-23. Distribución espacial del periodo fundamental de vibración del suelo (Universidad de los Andes, 2006) 53
Figura 3-24. Factores de amplificación espectral a partir de los espectros de respuesta en aceleración en roca y superficie 53

Figura 3-25. Metodología de análisis de respuesta dinámica para las zonas de amplificación definidas ... 54

Figura 3-26. Superficies de amplificación espectral de la Zona 8 (Norte) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2 ... 56

Figura 3-27. Superficies de amplificación espectral de la Zona 32 (Sur) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2 ... 56

Figura 3-28. Superficies de amplificación espectral de la Zona 19 (Occidente) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2 ... 57

Figura 3-29. Superficies de amplificación espectral de la Zona 21 (Oriente) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2 ... 57

Figura 3-30. Amplificación espectral en superficie para Te = (a) 0.0 segundos, (b) 0.1 segundos, (c) 0.5 segundos, (d) 1.0 segundos ... 58

Figura 3-31. Amplificación espectral en superficie para Te = (a) 1.5 segundos, (b) 2.0 segundos, (c) 3.0 segundos, (d) 4.0 segundos ... 59

Figura 3-32. Procedimiento para la obtención de los espectros de aceleración en superficie (Uniandes, 2016) ... 61

Figura 3-33. Espectros de aceleración en superficie para diferentes puntos de la ciudad ... 64

Figura 3-34. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 31 años ... 65

Figura 3-35. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 225 años ... 66

Figura 3-36. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 475 años ... 67

Figura 3-37. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 1000 años ... 68

Figura 3-38. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 2500 años ... 69

Figura 3-39. Comparación de los espectros de aceleración obtenidas por el modelo frente a los reportados en la CCP-14 ... 71

Figura 3-40. Distribución de aceleraciones en roca para un periodo estructural de 0 segundos en eventos en la falla Frontal Cordillera Oriental ... 73

Figura 4-1. Número de puentes y área construida por uso ... 76

Figura 4-2. Distribución geográfica de los puentes por uso: Vehicular y Peatonal ... 77

Figura 4-3. Estructura de la GeoDataBase INFRAESTRUCTURA_PUENTE.gdb ... 80

Figura 4-4. Modelo relacional desarrollado en la herramienta Oracle SQL Developer Data Modeler ... 99

Figura 4-5. Ejemplo de información útil de planos recopilados ... 102

Figura 4-6. Ejemplo información no útil de planos recopilados ... 102

Figura 4-7. Estadística de recopilación de planos según tipo de puente y obstáculo que cruza ... 111

Figura 4-8. Estadística de recopilación de planos según tipo de puente y red vial ... 111

Figura 4-9. Estadística de recopilación de planos según tipo de puente y localidad ... 112

Figura 4-10. Materialización de vértices mediante incrustación de pernos topográficos ... 120

Figura 4-11. Posicionamiento utilizando el método RTK-NTRIP 121

Figura 4-12. Ejemplo de formato de campo de georreferenciación 122

Figura 4-13. Densidad de la red de puntos materializados y georreferenciados en zona urbana de Bogotá, D.C. 123

Figura 4-14. Sistema de visualización de puntos georreferenciados para los puentes de Bogotá, D.C. ... 124

Figura 4-15. Ejemplo de propiedades e información reportada para cada punto georreferenciado. 124

Figura 4-16. Levantamiento topográfico en campo utilizando estación total, puente peatonal Av. de las Américas por KR 78G (PKID 22142336) 133

Figura 4-17. Ejemplo de formato de campo de levantamiento topográfico, puente peatonal Avenida Alfredo D Bateman por CL 128A (PKID 22152445) 134

Figura 4-18. Ejemplo de cálculo de poligonal, puente vehicular Avenida Montes por Avenida Batallón Caldas (PKID 24119324) 135

Figura 4-19. Ejemplo de localización general, puente vehicular Avenida Montes por Avenida Batallón Caldas (PKID 24119324) 136

Figura 4-20 Ejemplo de plano planta-perfil, puente peatonal Cll 26 Cra 4a (PKID 24124656) 136

Figura 4-21. Ejemplo de plano planta-perfil, puente vehicular Avenida Montes por Avenida Batallón Caldas (PKID 24119324) 137

Figura 4-22. Ejemplo de secciones transversales tipo, puente peatonal AC 24 por KR 68C (PKID 24119263) 137

Figura 4-23. Ejemplo de modelo 3Dpoly, puente vehicular Avenida Boyacá por Avenida Jorge Eliécer Gaitán, costado norte (PKID 22154017) 138

Figura 4-24. Esquema de la dirección de recorrido del puente según su orientación; (a) Norte paralelo al eje longitudinal del puente; (b) Norte perpendicular al eje longitudinal del puente. 141

Figura 4-25. Ejemplo de formato de campo geométrico 146

Figura 4-26. Formato digitalizado: Levantamiento geométrico y estructural de puentes (pág. 1) 148

Figura 4-27. Formato digitalizado: Levantamiento geométrico y estructural de puentes (pág. 2) 149

Figura 4-28. Formato digitalizado: Levantamiento geométrico y estructural de puentes (pág. 3) 150

Figura 4-29 Formato de evaluación e inspección de patologías 153

Figura 4-30. Formato de evaluación e inspección de patologías, para viga de concreto eje 7-8. 159

Figura 4-31. Formato de evaluación e inspección de patologías, para losa en concreto 160

Figura 4-32. Formato de evaluación e inspección de patologías, para pila en concreto eje 12 161

Figura 4-33. Formato de evaluación e inspección de patologías, para barandas en acero 162

Figura 4-34. Formato de Calificación de estado de daño para elementos estructurales 163

Figura 4-35. Formato de Calificación metodología TES para elementos de servicio 164

Figura 4-36. Estado estructural y de servicio de la totalidad de los puentes de Bogotá D.C. 166

Figura 4-37. Estado estructural y de servicio de los puentes vehiculares de Bogotá D.C. 167
Figura 4-38. Estado estructural y de servicio de los puentes peatonales de Bogotá D.C. 167
Figura 4-39. Distribución espacial del estado estructural de los puentes vehiculares de Bogotá D.C. 168
Figura 4-40. Distribución espacial del estado estructural de los puentes peatonales de Bogotá D.C. 169
Figura 4-41. Distribución espacial del estado de servicio de los puentes vehiculares de Bogotá D.C. 170
Figura 4-42. Distribución espacial del estado de servicio de los puentes peatonales de Bogotá D.C. 171
Figura 4-43. Puentes vehiculares por tipología estructural 172
Figura 4-44. Puentes peatonales por tipología estructural 172
Figura 4-45. Distribución porcentual del estado estructural de los puentes vehiculares para cada tipología estructural 173
Figura 4-46. Distribución porcentual del estado de servicio de los puentes vehiculares para cada tipología estructural 173
Figura 4-47. Distribución porcentual del estado estructural de los puentes peatonales para cada tipología estructural 173
Figura 4-48. Distribución porcentual del estado de servicio de los puentes peatonales para cada tipología estructural 174
Figura 4-49. Distribución porcentual del estado de los puentes vehiculares según el tipo de malla vial .. 175
Figura 4-50. Distribución porcentual del estado de los puentes peatonales según el tipo de malla vial ... 175
Figura 5-1. Rango de precios de construcción de tipologías de puentes en California (CALTRANS, 2016) 189
Figura 5-2. Costos año finalizado (2016) y costos año proyectado (2017) de CALTRANS 190
Figura 5-3. Ejemplo de la estimación de los m^3 de concreto por área en planta del puente según la luz en puentes tipo viga-placa postensada. “Figura 20. Ayudas de diseño de espesor equivalente” tomado de Durán (2017) 190
Figura 5-4. Ejemplo de la estimación de los m^3 por área en planta del puente según la luz en puentes tipo viga cajón continuo en concreto reforzado y su variación según el peralte del cajón. Tomado del Bridge Desig Aids (Caltrans Metric, 2005) 191
Figura 5-5. Metodología para la evaluación económica de puentes 193
Figura 5-6. Distribución del número y área construida de puentes vehiculares (ambos en porcentaje respecto al total de puentes) según malla vial y tipo de superestructura 194
Figura 5-7. Distribución del número y área construida de puentes peatonales (ambos en porcentaje respecto al total de puentes) según malla vial y tipo de superestructura 194
Figura 5-8 Interpretación de diagramas con cajas y bigotes 197
Figura 5-9. Modelo de puente de losa (Departamento de Antioquia, 1972) 198
Figura 5-10. Modelo de puente de viga losa postensado (Departamento de Antioquia, 1972) 199

Figura 5-11. Modelo de puente viga-cajón reforzado (Departamento de Antioquia, 1972) 200

Figura 5-12. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga-placa reforzados..... 201

Figura 5-13. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz, b) cantidad de kg de acero por m^3 de concreto según luz y c) fuerza hidráulica por longitud de acero según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga-placa postensados..... 201

Figura 5-14. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga cajón reforzados. 202

Figura 5-15. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz y c) fuerza hidráulica por longitud de acero según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga cajón postensados..... 202

Figura 5-16. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo box culverts de una celda.... 203

Figura 5-17. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo box culvert de varias celdas. 203

Figura 5-18. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz, b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz y c) kg de acero estructural por área en panta según luz para superestructura de puentes vehiculares mixtos..... 204

Figura 5-19. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes peatonales tipo viga cajón de concreto reforzado 204

Figura 5-20. Índices de cantidad de kg de acero por área en planta según luz superestructura de puentes peatonales de armadura en acero..... 205

Figura 5-21. Índices de cantidad de kg de acero estructural por área en planta según luz superestructura de puentes peatonales tipo Transmilenio 205

Figura 5-22. Cantidades de subestructura según el tipo de apoyo: a) relación área transversal de elemento estructural según el área aferente de cada apoyo y b) kg de acero por m3 de concreto en puentes vehiculares 206

Figura 5-23. Cantidades de subestructura según el tipo de apoyo: a) relación área transversal de elemento estructural según el área aferente de cada apoyo y b) kg de acero por m3 de concreto en puentes peatonales con apoyos concreto reforzado..... 206

Figura 5-24. Índices de cantidad de kg de acero estructural por área en planta según el gálibo para subestructura de puentes peatonales tipo Transmilenio 207

Figura 5-25. Cantidades de a) m^3 de concreto por área en planta total según la altura del estribo y b) kg por m^3 de acero de refuerzo dispuesto en estribos..... 207

Figura 5-26. Cantidades de a) m3 de concreto por área en planta de rampa y b) kg por m3 de acero de refuerzo dispuesto en estructuras de rampas o escaleras en puentes peatonales de concreto reforzado ... 208

Figura 5-27. Cantidades de kg de acero estructural según el área en planta de rampa o escaleras en puentes peatonales prototipo Bogotá 208

Figura 5-28. Cantidades de a) m^3 de concreto y b) kg por m^3 de acero de refuerzo dispuesto en topes sísmicos de puentes de Bogotá 209

Figura 5-29. Ubicación de los puentes de Bogotá. Los colores indican el tipo de zona de amenaza sísmica y el tamaño de círculo indica el tamaño del puente 210

Figura 5-30. Cantidades de dados de cimentación por área aferente según el gálibo del puente 211

Figura 5-31. Cantidades de pilotes a) volumen de concreto por área aferente, según el gálibo y el tipo de suelo para los pilotes de puentes vehiculares y b) distribución de la cuantía volumétrica de kg acero de refuerzo por m3 de concreto de puentes vehiculares y peatonales 211

Figura 5-32. Volumen de concreto según el área aferente al apoyo para puentes peatonales 212

Figura 5-33. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga-placa reforzada 212

Figura 5-34. Comparación de cuantía volumétrica de refuerzo de superestructura de puentes de viga-placa reforzada 213

Figura 5-35. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga-placa postensada 213

Figura 5-36. Comparación de cuantía volumétrica refuerzo de superestructura de puentes de viga-placa postensada 213

Figura 5-37. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga cajón en concreto reforzado 214

Figura 5-38. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga cajón en concreto postensado 214

Figura 5-39. Comparación de cuantía volumétrica de refuerzo de superestructura puentes de viga cajón en concreto postensado 214

Figura 5-40. Precios unitarios de materiales utilizados típicamente en la construcción de puentes. Tomado del Sistema de Precios de Referencia IDU-2018-1 215

Figura 5-41. Acta de terminación de un contrato típico de construcción de puentes (Acta No. 19 de terminación de contrato de obra, Contrato IDU-368-2001) 217

Figura 5-42. Peso de los capítulos del contrato con respecto al costo total para proyectos de construcción de puentes vehiculares 218

Figura 5-43. Peso de los capítulos del contrato con respecto al costo total para proyectos de construcción de puentes peatonales 218

Figura 5-44. Peso de los capítulos del contrato con respecto al costo total para proyectos de construcción de puentes tipo Transmilenio para Bogotá 219

Figura 5-45. Relación entre costo inicial y costo final de contratos de construcción de puentes en Bogotá 219

Figura 5-46. Relación costo estimado-costo real para puentes con información disponible de planos y contratos 221

Figura 5-47. Relación costo estimado-costo real para puentes con información disponible de contratos 222

Figura 5-48. Interfaz del software para la valoración económica aproximada de puentes..... 223

Figura 5-49. Esquema básico de regresiones de índices de cantidades de puentes. 224

Figura 5-50. Costo total del portafolio según ubicación en la malla vial 225

Figura 5-51. Costo total del portafolio según tipología constructiva 226

Figura 5-52. Distribución de los índices de costo por m2 para cada tipología de puente 227

Figura 5-53. Relación entre el valor de reposición y el valor de construcción para los capítulos de costos directos y costos totales 228

Figura 5-54. Esquemas de reparación encontrados para columnas por estados de daño 235

Figura 5-55. Esquemas de reparación encontrados para estribos por estados de daño 236

Figura 5-56. Esquemas de reparación encontrados para neoprenos por estados de daño 236

Figura 5-57. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 1 238

Figura 5-58. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 2 239

Figura 5-59. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 3 240

Figura 5-60. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 4 241

Figura 5-61. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de un estribo típico en el estado de daño 1 242

Figura 5-62. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de un estribo típico en el estado de daño 2 243

Figura 5-63. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de un estribo típico en el estado de daño 3 244

Figura 5-64. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 1 245

Figura 5-65. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 2 246

Figura 5-66. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 3 247

Figura 5-67. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 4 248

Figura 5-68. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 1 249

Figura 5-69. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 2 250

Figura 5-70. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 3 251

Figura 5-71. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 4 252

Figura 5-72. Actividades y costos de reparación respecto al evento de pérdida del apoyo de una luz de puentes con superestructura de concreto. 253

Figura 5-73. Actividades y costos de reparación alternativas respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 4 255

Figura 5-74. Actividades y costos de reparación alternativas respecto al evento de pérdida del apoyo de una luz de puentes con superestructura de metálica. 256

Figura 6-1. Función de vulnerabilidad típica 258

Figura 6-2. Metodología de evaluación de vulnerabilidad de puentes 259

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal 263

Figura 6-4. Parámetro taxonómico: Nivel de diseño sísmico 271

Figura 6-5. Parámetro taxonómico: Número de luces 272

Figura 6-6. Parámetro taxonómico: Número de elementos verticales eje 273

Figura 6-7. Parámetro taxonómico: Esviaje 274

Figura 6-8. Parámetro taxonómico: Estado estructural 274

Figura 6-9. Parámetro taxonómico: Curvatura horizontal. 275

Figura 6-10. Parámetro taxonómico: Curvatura vertical 275

Figura 6-11. Parámetro taxonómico: Reforzamiento sísmico 276

Figura 6-12. Parámetro taxonómico: Número de elementos horizontales 277

Figura 6-13. Tipos de parámetros en taxonomía 278

Figura 6-14. Desagregación Sísmica para Bogotá 279

Figura 6-15. Perfiles Bogotá suelos blandos 281

Figura 6-16. Perfiles Bogotá suelos intermedios 282

Figura 6-17. Espectros señales de análisis 283

Figura 6-18. Procedimiento para la generación de curvas de vulnerabilidad a partir de simulaciones de Monte Carlo. Adaptado de Yamin et al (2017) 288

Figura 6-19. Ejemplo de curva de vulnerabilidad desarrollada con Funvul Bridges 289

Figura 6-20. Metodología para la asignación del sistema estructural 290
Figura 6-21. Caracterización del portafolio total 290
Figura 6-22. Caracterización del portafolio de puentes vehiculares..... 291
Figura 6-23. Caracterización del portafolio de puentes peatonales..... 291
Figura 6-24. Componentes susceptibles a daño 294
Figura 6-25. Validación modelo Relleno del estribo. Adaptado de Khalili-Tehrani et al (2016) 295
Figura 6-26. Envolvente modelo Relleno del estribo..... 295
Figura 6-27. Formato de caracterización del relleno del estribo 296
Figura 6-28. Validación modelo llave de cortante externa. Adaptado de Megally et al (2001)..... 297
Figura 6-29. Envolvente modelo llave de cortante externa..... 297
Figura 6-30. Formato de caracterización de la llave de cortante externa 298
Figura 6-31. Validación modelo llave de cortante interna. Adaptado de Megally et al (2001) 299
Figura 6-32. Validación modelo llave de cortante interna alternativa. Adaptado de Mosalam et al (2015) 300
Figura 6-33. Envolvente modelo llave de cortante interna..... 300
Figura 6-34. Formato de caracterización de la llave de cortante interna..... 301
Figura 6-35. Validación modelo columnas. Adaptado de Lynn et al (1998) 302
Figura 6-36. Formato de caracterización de las columnas 303
Figura 6-37. Validación modelo pantallas. Adaptado de Leman et al (2015)..... 304
Figura 6-38. Formato de caracterización de las pantallas 305
Figura 6-39. Validación modelo neoprenos. Adaptado de Hube et al (2017) 306
Figura 6-40. Envolvente modelo neoprenos..... 306
Figura 6-41. Formato de caracterización del relleno de los neoprenos 307
Figura 6-42. Generador de modelos 308
Figura 6-43. Formato de modelación - Tipología VNI-1 311
Figura 6-44. Formato de modelación - Tipología VNI-2 312
Figura 6-45. Formato de modelación - Tipología VNI-3 313
Figura 6-46. Formato de modelación - Tipología VNI-4 314
Figura 6-47. Formato de modelación - Tipología VMH-1 315
Figura 6-48. Formato de modelación - Tipología VMH-2 316
Figura 6-49. Formato de modelación - Tipología VMH-3 317
Figura 6-50. Formato de modelación - Tipología VMH-4 318
Figura 6-51. Formato de modelación - Tipología VNH-1..... 319

Figura 6-52. Formato de modelación - Tipología VNH-2 320
Figura 6-53. Formato de modelación - Tipología VNH-3 321
Figura 6-54. Formato de modelación - Tipología VNH-4 322
Figura 6-55. Formato de modelación - Tipología VBC-1 323
Figura 6-56. Formato de modelación - Tipología VLS-1 324
Figura 6-57. Formato de modelación - Tipología PNI-1 325
Figura 6-58. Formato de modelación - Tipología PNI-3 326
Figura 6-59. Formato de modelación - Tipología PNH-1 327
Figura 6-60. Formato de modelación - Tipología PNH-3 328
Figura 6-61. Formato de modelación - Tipología PBC-1 329
Figura 6-62. Formato de modelación - Tipología PLS-1 330
Figura 6-63. Formato de modelación - Tipología PPB-1 331
Figura 6-64. Formato de comparación OpenSees - Perform 3D tipología VMH_1 334
Figura 6-65. Formato de comparación OpenSees - Perform 3D tipología VMH_3 336
Figura 6-66. Formato de comparación OpenSees - Perform 3D tipología VMH_4 338
Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología 339
Figura 6-68. Catálogo de funciones de fragilidad 353
Figura 6-69. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología 355
Figura 6-70. Vulnerabilidad sísmica con diferentes tipos de suelo 360
Figura 6-71. Modelo básico VNI_3_0 – 7 luces 361
Figura 6-72. Modelos con variaciones en la cantidad de luces 361
Figura 6-73. Cantidad de luces y vulnerabilidad sísmica 361
Figura 6-74. Factor de afectación por cantidad de luces 362
Figura 6-75. Modelo con tres columnas por pórtico 362
Figura 6-76. Vulnerabilidad sísmica por cantidad de columnas por pórtico 362
Figura 6-77. Cimentación típica 363
Figura 6-78. Modelo en Dynapile 363
Figura 6-79. Vulnerabilidad sísmica con interacción dinámica suelo-estructura 363
Figura 6-80. (a) Modelo con esviaje, (b) Modelo con curvatura horizontal y (c) Modelo sin curvatura vertical 364
Figura 6-81. Vulnerabilidad para puentes con (a) esviaje, (b) curvatura horizontal y (c) sin curvatura vertical 365
Figura 6-82. Elementos susceptibles a daño en Puente Prototipo Bogotá 366

Figura 6-83. Fuerza actuante en el cordón inferior 366
Figura 6-84. Fuerza actuante en el cordón superior 367
Figura 6-85. Fuerza actuante en las conexiones de elementos de la subestructura 367
Figura 6-86. Función de vulnerabilidad puente Prototipo Bogotá (PPB_1) 368
Figura 6-87. Análisis no lineal estático del Box Culvert 369
Figura 6-88. Curva de vulnerabilidad Box Culvert (VBC_1 y PBC_1) 370
Figura 6-89. Tipología Arco 371
Figura 6-90. Algoritmo de generación de funciones de vulnerabilidad para puentes atirantados 371
Figura 6-91. Algoritmo de asignación de funciones de vulnerabilidad 373
Figura 6-92. Catálogo funciones de vulnerabilidad 373
Figura 7-1. Metodología riesgo sísmico 376
Figura 7-2. Número de puentes y valor expuesto por uso estructural 377
Figura 7-3. Distribución geográfica del valor expuesto 378
Figura 7-4. Número de puentes y área construida para las tipologias Vehiculares 380
Figura 7-5. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías Vehiculares 380
Figura 7-6. Distribución geográfica de las tipologías Vehiculares 381
Figura 7-7. Número de puentes y área construida para las tipologías Peatonales 383
Figura 7-8. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías Peatonales 383
Figura 7-9. Distribución geográfica de las tipologías Peatonales 384
Figura 7-10. Número de puentes asociados a cada red de análisis 385
Figura 7-11. Área en planta asociada a cada red de análisis 386
Figura 7-12. Valor expuesto asociado a cada red de análisis 386
Figura 7-13. Distribución geográfica de los puentes bajo la clasificación de la Malla vial 387
Figura 7-14. Curva de Pérdida Máxima Probable (PMP) 388
Figura 7-15. Distribución geográfica de la PAE absoluta para el portafolio de puentes de Bogotá 389
Figura 7-16. Distribución geográfica de la PAE relativa para el portafolio de puentes de Bogotá 390
Figura 7-17. PAE absoluta y relativa del portafolio general por Usos 391
Figura 7-18. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes Vehiculares 392
Figura 7-19. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes Vehiculares 393
Figura 7-20. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes Peatonales 394
Figura 7-21. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes Peatonales 395
Figura 7-22. PAE absoluta y relativa para las tipologías Vehiculares 396

Figura 7-23. PAE absoluta y relativa para las tipologías Peatonales 396
Figura 7-24. PAE absoluta y relativa de los puentes Vehiculares según la Malla vial 397
Figura 7-25. PAE absoluta y relativa de los puentes Peatonales según la Malla vial 398
Figura 7-26. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Arterial Vital 398
Figura 7-27. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Arterial No Vital..... 399
Figura 7-28. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Intermedia y Local 399
Figura 7-29. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Rural..... 399
Figura 7-30. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Arterial Vital 400
Figura 7-31. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Arterial No Vital 400
Figura 7-32. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Intermedia y Local 400
Figura 7-33. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Rural..... 401
Figura 7-34. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes Vehiculares..... 402
Figura 7-35. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes Peatonales..... 402
Figura 7-36. Distribución geográfica de PAE absoluta por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá 403
Figura 7-37. Distribución geográfica de PAE relativa por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá 404
Figura 7-38. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 1 (M = 5.38)..... 407
Figura 7-39. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 2 (M = 6.13)..... 408
Figura 7-40. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 3 (M = 6.88)..... 409
Figura 7-41. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 4 (M = 7.68)..... 410
Figura 8-1. Reemplazo completo de columna (FHWA, 2006)..... 417
Figura 8-2. Adición de columnas suplementarias (FHWA, 2006)..... 418
Figura 8-3. Enchaquetado con concreto reforzado (FHWA, 2006) 418
Figura 8-4. Enchaquetado con lámina de acero (FHWA, 2006) 419
Figura 8-5. Preesforzado exterior (FHWA, 2006)..... 419
Figura 8-6. Suplemento con muros de cortante (FHWA, 2006) 420
Figura 8-7. Aislador sísmico (FHWA, 2006)..... 420
Figura 8-8. Extensión en el ancho de silla (FHWA, 2006) 422
Figura 8-9. Bloques de impacto (FHWA, 2006) 422
Figura 8-10. Refrenador longitudinal en apoyos (FHWA, 2006)..... 423
Figura 8-11. Llaves de cortante (FHWA, 2006)..... 424
Figura 8-12. Espaldar de estribo (FHWA, 2006) 425

Figura 8-13. Reforzamiento cimentación (FHWA, 2006)..... 426
Figura 8-14. Resumen costos de intervención puentes vehiculares 433
Figura 8-15. Resumen costos de intervención puentes peatonales..... 433
Figura 8-16. Funciones de vulnerabilidad representativas de las tipologías de puentes dominantes en el estado actual y en el intervenido 434
Figura 8-17. Pérdida máxima probable portafolio completo..... 438
Figura 8-18. Relaciones B/C (beneficio/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Vehiculares 444
Figura 8-19. Relaciones B/C (beneficio/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Peatonales 444
Figura 8-20. Relaciones E/C (eficiencia/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Vehiculares 448
Figura 8-21. Relaciones E/C (eficiencia/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Peatonales 448
Figura 8-22. Indicadores de costos y beneficios acumulados y priorizados..... 450
Figura 8-23. Costos acumulados de inversión por programa 461
Figura 9-1. Componentes de la gestión del riesgo de desastre. Tomado de (Yamin, Ghesquiere, Cardona, & Ordaz, 2013)..... 465
Figura 9-2. Esquema de seguro (adaptada de Ghesquiere et al., 2010)..... 467
Figura 9-3. Estrategia de estratificación del riesgo y protección financiera por capas (adaptada de Ghesquiere et al., 2010)..... 475

CAPITULO
1

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales constituyen una amenaza para la población y la infraestructura expuesta en una determinada región. En zonas de alta amenaza, resulta inevitable la generación de impactos físicos, económicos y sociales los cuales dependen de la intensidad local que genera el evento amenazante, las condiciones de exposición y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. La identificación de las amenazas que pueden afectar una región determinada constituye en el primer paso hacia una evaluación rigurosa del riesgo. El conocimiento de las condiciones regionales de ocurrencia de eventos peligrosos, así como las características reportadas sobre eventos históricos importantes, proveen una primera idea del potencial destructivo de los fenómenos que amenazan la región, y permite conocer de manera aproximada la distribución esperada de las intensidades y las frecuencias de ocurrencia de los eventos más importantes.

Por otro lado, la caracterización de la exposición pretende identificar los componentes de infraestructura o a la población expuesta que puede verse afectada por posibles eventos futuros. Se hace necesario entonces identificar los diferentes componentes individuales incluyendo su ubicación geográfica, sus características geométricas, físicas e ingenieriles principales, su vulnerabilidad, su valoración económica, entre otros. De manera particular la vulnerabilidad da cuenta del nivel de daño o afectación que puede llegar a ocurrir en función de la intensidad local que afecte cada componente. La función de vulnerabilidad debe estimarse para cada uno de los tipos constructivos característicos, de manera que pueda llevarse a cabo la asignación integral a toda la base de datos de exposición. Esta información permite entonces la cuantificación del daño o afectación producida en cada uno de los activos ante la acción de un evento determinado, caracterizado por alguno de los parámetros de intensidad.

La evaluación del riesgo se lleva a cabo mediante métodos de valoración probabilista de métricas que caracterizan el impacto y la afectación teniendo en cuenta las variables mencionadas anteriormente. Existen a nivel mundial diferentes metodologías y plataformas para la evaluación probabilista del riesgo. Muchas de estas plataformas (como Hazus - www.fema.gov/hazus, o CAPRA - www.ecapra.org) han publicado información detallada sobre las diferentes metodologías disponibles, información y tipos de resultados esperados. Mediante la utilización de los recursos informáticos y de bases de datos disponibles es posible

llevar a cabo la evaluación rigurosa del riesgo sísmico la cual permite obtener métricas sobre los impactos esperados y los máximos probables ante diferentes situaciones de análisis. Para el caso específico de componentes de infraestructura, es usual valorar los niveles de afectación física (daños) esperados y las pérdidas económicas asociadas. También resulta usual estimar los posibles tiempos de interrupción del servicio por cuenta de la necesidad de realizar reparaciones, debido al alto impacto que esto produce sobre la movilidad urbana, especialmente luego de la ocurrencia de un evento catastrófico.

Finalmente, la gestión del riesgo sísmico de la infraestructura comprende, en primera instancia, el desarrollo de las actividades tendientes a tener un adecuado conocimiento del riesgo y una valoración y cuantificación que permita plantear posibles opciones de reducción del riesgo. La primera aplicación de la mayor importancia es contar con las bases técnicas para formular un plan de mitigación del riesgo que incluye principalmente una serie de programas de intervención para reducir la vulnerabilidad de los componentes críticos de infraestructura. Por otro lado, resulta prioritario también contar con un esquema de protección financiera que permita contar con los recursos requeridos para la atención de las emergencias, la reparación de daños que pueden presentarse y un eventual proceso de reconstrucción cuando ocurran eventos con alto poder destructivo. Finalmente, se debe contar con información que permita la elaboración de un plan de atención de emergencias y de recuperación pos-desastre con el fin de actuar con prontitud luego de la ocurrencia del evento, minimizar impactos secundarios y recuperar la funcionalidad urbana en el menor tiempo posible.

Para el caso de la ciudad de Bogotá, ésta se encuentra en una zona de amenaza sísmica intermedia de acuerdo con el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (2009). Bajo estas circunstancias y ante la gran importancia que tiene para la ciudad la red de puentes e intersecciones importantes tanto vehiculares como peatonales resulta relevante conocer el riesgo al que puede estar sometido el sistema ante la ocurrencia de un evento sísmico de alta intensidad. Para el caso de los puentes, el riesgo se representa mediante indicadores de impacto físico, pérdidas económicas o tiempo de interrupción del servicio. La evaluación se realiza tanto para escenarios específicos tales como sismos históricos o sismos potenciales de alta magnitud, o para un conjunto hipotético de eventos estocásticos que representan el nivel de amenaza presente en la zona de estudio. Estas evaluaciones permiten avanzar de manera significativa en la gestión del riesgo del sistema y servirá de apoyo tanto en la planeación y toma de decisiones certeras correspondientes al mantenimiento y reforzamiento, como en el soporte preciso para los insumos de la gestión de la infraestructura de puentes de la ciudad.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Uno de los objetivos estratégicos actuales del Instituto de Desarrollo Urbano IDU de Bogotá consiste en conformar un sistema de información de alta calidad y contenido sobre la infraestructura de los puentes vehiculares y peatonales de la ciudad que conforman un grupo de activos de alto valor para el Gobierno Local y la ciudadanía en general. Por sus características propias, los puentes son elementos críticos del sistema por cuanto concentran un alto valor económico, prestan un servicio vital para la movilidad urbana, su eventual falla puede generar importantes consecuencias para la ciudad y sufren además de un deterioro en el tiempo que debe cuantificarse y calificarse con el fin de poder llevar a cabo planes de mantenimiento y conservación.

Siendo la infraestructura de puentes uno de los componentes principales del registro de activos de la ciudad, debe por lo tanto dársele la importancia que merece. En este contexto resulta prioritario contar con información básica tal como topografía, georreferenciación, fotografías, geometría, características estructurales de detalle y evaluación económica de cada puente de la ciudad. Para efectos de los programas de mantenimiento obligatorios que garanticen la funcionalidad del sistema, la base de datos debe incluir además información sobre las características y el estado de cada uno de los componentes estructurales y no estructurales, lo cual debe permitir establecer diagnósticos específicos para definir obras de intervención y priorizar aquellas que resulten críticas. Adicionalmente, y con miras a los procesos de gestión del riesgo sísmico, se debe incluir información específica sobre la vulnerabilidad sísmica de las estructuras y la valoración del riesgo en el estado actual y en posibles escenarios hipotéticos de reforzamientos o intervenciones.

Con base en esta información el IDU podrá elaborar una estrategia de gestión integral de la infraestructura que incluya entre otros componentes los planes para el mantenimiento recurrente y conservación de la misma, evaluaciones de la funcionalidad urbana en condiciones normales o específicas, evaluaciones de riesgo catastrófico para efectos de movilidad urbana ante situaciones de emergencia, elaboración de planes de mitigación y protección financiera, y evaluación del estado y resiliencia de la red con fines de estrategias de mejoras y necesidades de actualización en el mediano y largo plazo.

1.3 ANTECEDENTES

Recientemente, el IDU ha venido adelantando actividades de consultoría enfocadas a la ejecución de inventarios y diagnósticos de la infraestructura vial, dentro de la que se incluye la infraestructura de puentes. En una primera consultoría, el IDU desarrolló en el marco del Proyecto de Servicios Urbanos para Bogotá, el contrato de consultoría IDU-BM-187 del 2006 con recursos del Banco Mundial, cuyo objeto fue realizar el Inventario Geométrico y de Diagnóstico de Puentes para Bogotá D.C. – Fase I., y a través del cual se inventariaron 341 puentes de los cuales 171 corresponden a puentes vehiculares y 170 a puentes peatonales. Para estos 341 puentes se determinó su clasificación estructural, geometría, volumen, ubicación y su georreferenciación a manera de polígonos ubicados sobre la malla vial de la ciudad.

De forma similar a lo establecido en la Fase I, el IDU adelantó el contrato de consultoría IDU-BM-115 del 2009, cuyo objeto consistió en realizar el inventario geométrico y de diagnóstico de puentes para Bogotá D.C. – Fase II, el cual estuvo orientado a continuar con la elaboración del inventario y el diagnóstico de 220 puentes adicionales. En esta consultoría se determinó la clasificación, geometría, volumen, ubicación y georreferenciación de 102 puentes peatonales y 118 puentes vehiculares. Como resultado de las consultorías adelantadas se inventariaron 583 puentes en total.

Con el fin de complementar el inventario geométrico y de diagnóstico de puentes para Bogotá D.C, el IDU ha venido adelantando visitas de inventario básico a los puentes que no fueron incluidos en los contratos de consultoría IDU-BM-187 del 2006 e IDU-BM-115 del 2009. A la fecha de inicio del presente contrato, el IDU contaba con información básica de 423 puentes adicionales, para un total de 1006 puentes inventariados.

En el marco de estos estudios, se ha tenido en cuenta que los puentes existentes en la ciudad de Bogotá han sido construidos a lo largo de tiempo, con especificaciones de diseño y construcción diferentes. Adicionalmente a las variaciones propias en los procesos de diseño y construcción en el tiempo, las estructuras se han visto expuestas a una serie de agentes de deterioro que no distinguen época de diseño, construcción y puesta en funcionamiento. Este deterioro tiene como consecuencia la disminución de la capacidad de respuesta sísmica y por ende un efecto en el comportamiento estructural ante un eventual sismo de los diferentes elementos que conforman la estructura de los puentes.

Estudios como la Evaluación de la Vulnerabilidad Funcional Urbana de Santafé de Bogota (INGEOMINAS, 1999), Escenarios de Riesgo Sísmico para Bogotá (CEDERI, 2005), o el estudio de la vulnerabilidad de la red vital en Bogotá frente a emergencias sísmicas (Contrato No. 20121746 Consorcio Red Vial Bogotá), han sido útiles para definir prioridades en la intervención de la infraestructura. Sin embargo, no presentan estimaciones de las pérdidas esperadas de los puentes ante eventos sísmicos. Bajo estas consideraciones, nace la necesidad de conocer el comportamiento estructural de los puentes vehiculares y peatonales ante las solicitaciones sísmicas a las que cuales pueden estar expuestos durante su vida útil.

En el marco del contrato de consultoría IDU-568-2014 desarrollado por la Universidad de los Andes, para la "Evaluación del riesgo sísmico de los puentes vehiculares y peatonales de la ciudad de Bogotá y definición de estrategias de gestión del riesgo", se analizó la información disponible en el inventario geométrico y diagnóstico de puentes de la ciudad, las tipologías estructurales establecidas en las consultorías previas, y la veracidad de la información contenida en los planos record de puentes en relación con las propiedades de los materiales. Este estudio permitió identificar la carencia de información básica del inventario de puentes, tales como datos geométricos, la asignación de tipologías estructurales, y fechas de construcción y/o rehabilitación. De acuerdo a lo anterior, se recomendó complementar y actualizar el inventario con campos adicionales para una caracterización sísmica más adecuada, tales como año de construcción, número de luces, luz crítica, número de apoyos intermedios, altura de apoyos intermedios, y dimensiones generales de los elementos estructurales principales, entre otros.

Como parte de este estudio, también se realizó la evaluación del riesgo sísmico de la infraestructura de puentes vehiculares y peatonales de Bogotá, limitada a la calidad y completitud del inventario disponible de elementos expuestos. El resultado de esta evaluación resaltó el alto riesgo sísmico de la infraestructura de puentes de la ciudad, a pesar de ser un análisis conservador dadas las limitaciones de información. En cuanto a las estrategias de reducción y transferencia del riesgo, el estudio concluyó que se debe contar con información actualizada y confiable para una reevaluación del riesgo y posteriormente la definición de planes de mitigación y esquemas de protección financiera de la infraestructura con mayor confiabilidad.

Finalmente, y para el caso particular de Bogotá, se cuenta con el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad, el cual representa un avance notable en el conocimiento de la respuesta del suelo y de la acción sísmica a la cual se encuentran expuestas las estructuras. Estos estudios favorecen el diseño de edificaciones e infraestructura bajo estándares de seguridad. En el caso de los puentes vehiculares y peatonales de Bogotá, que constituyen un elemento primordial del sistema de transporte y de movilidad del Distrito, esta información se convierte en un insumo fundamental para lograr los propósitos del IDU en relación con el funcionamiento y mantenimiento de la infraestructura de puentes de la ciudad.

1.4 MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual del presente proyecto se explica de manera detallada en diferentes referencias (Yamin et.al, 2013, Yamin et. al, 2017, www.ecapra.org). A continuación se presenta un breve resumen del enfoque metodológico para la evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico probabilista de los puentes.

La evaluación del riesgo sísmico de puentes tiene como objetivo determinar el impacto físico y las pérdidas económicas que pueden generarse tras la ocurrencia de un conjunto de eventos sísmicos en un área de estudio determinada. Las pérdidas se calculan mediante metodologías de evaluación probabilista del riesgo que consideran los modelos de amenaza sísmica, exposición y vulnerabilidad de los componentes. En el marco del presente estudio, se utiliza el enfoque metodológico propuesto por la plataforma CAPRA (www.ecapra.org) que corresponde a un sistema abierto y de alta utilización a nivel mundial para evaluaciones del riesgo.

Los principales componentes de la evaluación del riesgo sísmico para los puentes de la ciudad son los siguientes:

- **Amenaza:** para efectos de la evaluación del riesgo, la amenaza sísmica se expresa mediante un conjunto de escenarios estocásticos con diferentes magnitudes y epicentros que representan todos los posibles eventos que puedan afectar el área de estudio. Esta colección de eventos estocásticos es consistente con la distribución de fallas identificadas en el territorio nacional y los parámetros que las caracterizan. Cada uno de los eventos estocásticos definidos se representa mediante mapas de la distribución de intensidades sísmicas definidas en el área de estudio (tales como la aceleración máxima del terreno o aceleraciones para diferentes periodos estructurales). Para la evaluación de los parámetros que describen la intensidad sísmica en la superficie del terreno se tiene en cuenta además los efectos de amplificación generada por la respuesta dinámica de los diferentes depósitos de suelo, conocido también como efectos de sitio. Para el caso de la evaluación de los efectos de sitio en Bogotá se cuenta con información de detalle contenida en los recientes estudios de microzonificación sísmica de la ciudad.

- **Exposición:** corresponde a una base de datos que contiene todas las estructuras expuestas sobre las cuales se va a realizar la estimación de pérdidas en el análisis probabilista de riesgo sísmico. Cada una de las estructuras debe tener información asociada a la localización geográfica, materiales de construcción, tipología constructiva, número de luces, fecha de construcción, estado, uso y cualquier otra característica que permita estimar con mejor precisión el comportamiento sísmico de la estructura.

- **Vulnerabilidad:** representa la susceptibilidad al daño que pueden tener los puentes con diversos sistemas estructurales. Su definición está basada en los parámetros de caracterización de cada estructura a evaluar y representa una relación entre el porcentaje de daño esperado para diferentes medidas de intensidad como la aceleración horizontal máxima del terreno o la aceleración espectral para un periodo de vibración específico.

La integración de estos tres (3) componentes permite calcular los niveles de pérdidas económicas que pueden ocurrir sobre los elementos expuestos a causa de la ocurrencia de diferentes eventos sísmicos. La Figura 1-1 ilustra esquemáticamente el enfoque metodológico propuesto.

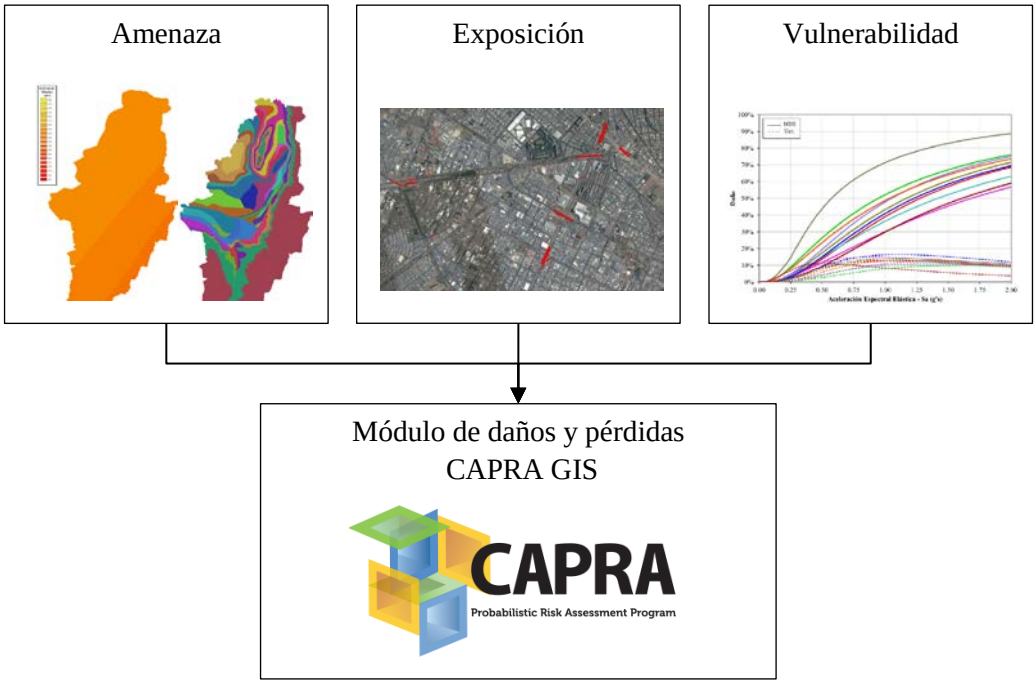


Figura 1-1. Metodología riesgo sísmico

1.5 DEFINICIONES BÁSICAS

Para efectos de claridad en la interpretación de los resultados que se presentan en este informe, se incluyen a continuación las definiciones básicas y terminología relevante utilizada a lo largo de este documento (basado en Yamin et. al 2013 y complementado para el presente estudio por el consultor):

Aceleración espectral: aceleración obtenida del espectro de respuesta de aceleraciones para el periodo fundamental de un cuerpo, tal como una estructura o el suelo.

Amenaza: peligro latente que un evento físico de origen natural o causado por la acción humana se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños o pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. Las amenazas pueden ser de origen geológico (resultados de procesos internos y externos en la Tierra), hidrometeorológico (que puede ser exacerbadas por la variabilidad y el cambio climático), o antropogénico.

Amenaza sísmica: probabilidad de que se presente un evento sísmico potencialmente dañino.

Amplitud: máxima altura de la cresta de un registro sísmico.

Análisis de respuesta dinámica: Estudio de la respuesta de una estructura ante una excitación que genera un movimiento en la misma, y de su relación con las fuerzas que la producen.

Atenuación: disminución en la amplitud de las ondas sísmicas a medida que se alejan de la fuente sísmica.

Catálogo sísmico: Compendio de registros de eventos sísmicos recopilados por el Servicio Geológico Colombiano (SGS).

Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP): representa la frecuencia o tasa anual con la que una pérdida (en sus unidades de análisis) puede ser excedida. Esta es la medida del riesgo catastrófico más importante para quienes toman decisiones para la reducción del riesgo, dado que estima la cantidad de fondos requeridos para alcanzar los objetivos de la gestión del riesgo en diferentes frecuencias de ocurrencia.

Desastre: proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos, que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad.

Desplazamiento: medida de cuanto se movió un punto afectado por un sismo con respecto a la posición inicial en la que se encontraba antes de ser afectado por el mismo.

Epicentro: proyección sobre la superficie del foco o hipocentro del sismo.

Efectos de sitio: amplificación de la respuesta espectral de una señal sísmica debido a las características del suelo en la zona de estudio.

Efectos directos: aquellos que mantienen relación de causalidad directa e inmediata con la ocurrencia de un fenómeno físico, representados usualmente por el daño en las personas, infraestructuras, sistemas productivos, bienes y acervos, servicios y ambiente, y por el impacto inmediato en las actividades sociales y económicas.

Efectos indirectos: aquellos que mantienen relación de causalidad con los efectos directos, y que corresponden usualmente a la concatenación de efectos posteriores sobre la población, sus actividades económicas y sociales o sobre el medio ambiente. Por ejemplo, el impacto sobre flujos económicos, pérdidas de oportunidades productivas e ingresos futuros, aumentos en los niveles de pobreza y en costos de transporte debido a la pérdida de puentes y caminos, entre otros.

Escala de Mercalli modificada: escala compuesta por 12 niveles de intensidad de terremotos, que van desde los movimientos imperceptibles hasta los fuertes y destructores, y son designados con números romanos. Esta escala no tiene una base matemática sino clasifica los eventos en función de los efectos o daños observados o aparentes.

Espectro de respuesta: curva que describe la respuesta ante un registro o serie de registros sísmicos para diferentes periodos de vibración.

Evaluación del riesgo: proceso mediante el cual se estiman los daños físicos y las pérdidas potenciales, en términos económicos o humanos, como resultado de relacionar la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, y se comparan con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcances de la reducción del riesgo.

Evento estocástico: evento generado a partir de variables aleatorias que evolucionan en función de otra variable.

Evento sísmico: sismo principal que puede ser precedido por uno o varios sismos pequeños denominados premonitorios, y sucedido por temblores de menor magnitud conocidos como réplicas.

Exposición (elementos expuestos): se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales, recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura, que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.

Falla activa: falla geológica capaz de producir un sismo.

Falla geológica: fractura en la corteza terrestre a lo largo de la cual se mueven los bloques rocosos que son separados por ella.

Foco: punto dónde se inicia la ruptura y comienza la liberación de energía del sismo.

Frecuencia natural: frecuencia a la que vibra un cuerpo cuando es excitado por algún impulso, la cual corresponde al inverso del periodo fundamental.

Fuente sísmogénica: falla geológica cuyas deformaciones pueden generar eventos sísmicos.

Gestión del riesgo: proceso social caracterizado por la planificación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias y acciones permanentes para promover mayores grados de consciencia, conocimiento, estimación y cuantificación del riesgo, para impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y manejarlo cuando se materializa en desastre. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas en el marco del desarrollo sostenible.

Intervención: corresponde al tratamiento del riesgo, o bien mediante la modificación intencional de las características de un fenómeno con el fin de reducir la amenaza que representa o bien mediante la modificación de las características intrínsecas de un elemento expuesto, con el fin de reducir su vulnerabilidad. En suma, la intervención busca cambiar los factores de riesgo internos y externos.

Leyes de atenuación: son expresiones que relacionan la magnitud, distancia desde el punto de análisis a la falla, e intensidad sísmica para diferentes eventos sísmicos en diferentes regiones.

Licuefacción: proceso por el cual un sólido (en este caso el suelo) asume las características de un líquido como resultado de un aumento en la presión de los poros (agua contenida en la matriz de suelo) produciendo una reducción en la tensión.

Magnitud de momento: escala logarítmica usada para medir terremotos basada en la medición de la energía total liberada en el mismo.

Microzonificación sísmica: identificación de áreas individuales separadas que tienen diferentes potenciales en la generación de sismos peligrosos.

Mitigación: medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir el riesgo en forma anticipada. La mitigación del riesgo es el resultado de la aceptación de la imposibilidad de controlar o eliminar los factores de un riesgo ya establecido o cuya severidad puede ser muy alta. Se implementa a

través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada, cuyo objetivo es reducir la vulnerabilidad existente o proveer una protección limitada frente a eventos peligrosos.

Ondas sísmicas: ondas generadas por la liberación de energía acumulada por el movimiento relativo entre placas tectónicas colindantes.

Pérdida Anual Esperada (PAE): numéricamente, la PAE es la suma del producto de la pérdida esperada y de la probabilidad de ocurrencia anual de cada uno de los eventos estocásticos considerados en los modelos de amenaza. En términos probabilistas, la PAE es el valor esperado de la pérdida anual. Se interpreta como el valor promedio anual de las pérdidas que pueden esperarse, luego de considerar eventos múltiples durante periodos largos de tiempo.

Pérdida Máxima Probable (PMP o PML): constituye una medida de las pérdidas esperadas para diferentes periodos de retorno (el inverso de la frecuencia anual de excedencia). Según la tolerancia o aversión al riesgo, el analista del riesgo puede seleccionar el valor de la pérdida obtenida del análisis o del diseño para un determinado periodo de retorno; por ejemplo, 200 años, 500, 1.000 o 2.500 años. A mayor periodo de retorno, menor probabilidad de excedencia de dicho valor, pero mayor costo involucrado en las métricas de protección o transferencia, debido al incremento en la intensidad de referencia de la amenaza.

Perfil de suelo: disposición vertical de las capas del suelo hasta la capa rocosa subyacente.

Periodo de retorno: periodo de tiempo, generalmente expresado en años, en el cual se iguala o excede la intensidad de algún evento.

Periodo estructural: periodo fundamental de una estructura específica.

PGA (*Peak Ground Acceleration)*: máxima aceleración del terreno registrada por una estación particular durante un sismo dado.

Plataforma CAPRA: software especializado en realizar análisis del riesgo (ya sea probabilista o determinista) dado un módulo de amenaza, exposición y vulnerabilidad.

Preparación: medidas cuyo objetivo es planificar, organizar y poner a prueba los procedimientos y protocolos de respuesta de la sociedad en caso de desastre, con el objeto de garantizar una adecuada y oportuna atención de las personas afectadas, así como la rehabilitación de los servicios básicos indispensables, lo cual permitiría normalizar las actividades en la zona afectada por el desastre.

Prevención: medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse en evitar o neutralizar amenazas, o bien en la exposición y la vulnerabilidad ante estas, en forma definitiva, para impedir que se produzcan nuevos riesgos. Los instrumentos esenciales de la prevención son aquellos previstos en la planificación, la inversión pública y el ordenamiento ambiental territorial, que tienen como objetivo reglamentar el uso y la ocupación del suelo en forma segura y sostenible.

Protección financiera: mecanismos o instrumentos financieros de retención intencional o transferencia del riesgo, que se establecen ex ante, con el fin de acceder de manera ex post a recursos económicos oportunos para el manejo de desastres, incluidos recursos para la atención de emergencias o la recuperación.

Reducción del riesgo: medidas de intervención compensatorias dirigidas a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes y a establecer mecanismos de control con el fin de evitar nuevos riesgos en

el territorio. Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación de manera prescriptiva o restrictiva, para reducir las amenazas o la exposición ante estas y disminuir la vulnerabilidad.

Registro sísmico: medición de la amplitud en función del tiempo de un sismo, mediante un instrumento denominado sismógrafo.

Resiliencia: capacidad de recuperación de la funcionalidad de un sistema en el tiempo ante una perturbación en forma oportuna y eficiente, garantizando la preservación, la restauración o la mejora de sus estructuras y funciones básicas y esenciales.

Riesgo: posibilidad de daño o afectación de los elementos expuesto frente a una amenaza.

Riesgo de desastres: daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los efectos de eventos físicos peligrosos en un periodo de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Sismo cortical: evento sísmico cuyo foco se localiza en la corteza terrestre, a una profundidad generalmente menor a los 40 km (dependiendo del espesor de la corteza en la zona de ocurrencia).

Sismo profundo: evento sísmico cuyo foco se localiza a una profundidad generalmente mayor a 40 km.

Sismo tectónico: sismo ocurrido en la frontera entre placas tectónicas.

Subsidencia: proceso de hundimiento vertical de una cuenca sedimentaria o columna de suelo como consecuencia del peso de los sedimentos que se van depositando en ella de una manera progresiva. Este mecanismo puede ser detonado por un movimiento del terreno debido a un sismo.

Tasa de descuento anual: indicador financiero de ponderación con el cual se trasladan los valores de inversión futura a un valor presente neto para el análisis beneficio-costo, considerando inversiones o costos del proyecto que generalmente ocurren inmediatamente o en el corto plazo. Para efectos de proyectos de inversión con recursos de la banca multilateral, es común utilizar un valor del 12% anual.

Transferencia del riesgo: acuerdo o contrato, mediante el cual una parte se compromete a tomar el riesgo y pagar las pérdidas que se pueden presentar a un cedente durante un periodo de tiempo, a cambio de una prima de riesgo.

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad ante los potenciales efectos adversos de un eventual suceso físico peligroso. Corresponde a la predisposición a la pérdida de (o a daños en) seres humanos y sus medios de subsistencia, sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo, por cuenta de eventos físicos peligrosos.

Zona de subducción: sitio en el que las placas tectónicas se empujan una contra otra haciendo que una de las dos se introduzca por debajo.

Zona geotécnica: unidad geotécnicamente homogénea según sus características físicas y propiedades mecánicas.

Zona sismogénica: delimitación o representación de un volumen de litósfera con características tectónicas y geológicas similares, y cuyos sismos provienen del mismo proceso tectónico.

CAPITULO
2

2 OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1 OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos generales del presente estudio son los siguientes:

1. Actualizar y completar la base de datos de información de la infraestructura de puentes de la ciudad de manera que incluya información topográfica, geométrica, de georreferenciación, fotográfica, estructural y de valoración económica.

2. Desarrollar e implementar una metodología para la evaluación y calificación del estado de componentes estructurales y de servicio de los puentes que permita definir las obras de intervención requeridas y la priorización que debe darse a los trabajos de mantenimiento.

3. Proponer una clasificación de tipologías estructurales predominantes y una metodología específica para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural para los puentes de la ciudad.

4. Evaluar el riesgo sísmico del portafolio de puentes de Bogotá D.C. con el fin de estimar los eventuales impactos que pueden esperarse en el sistema, en términos de afectación física y pérdidas económicas esperadas ante eventos sísmicos de alta intensidad.

5. Desarrollar e implementar una metodología para la identificación, cuantificación y priorización de posibles medidas de intervención estructural requeridas para elaborar un plan de mitigación del riesgo sísmico y plantear las posibles medidas de protección financiera para este sistema.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este proyecto tiene además los siguientes objetivos específicos, los cuales a su vez permiten definir el alcance del mismo:

1. Realizar la revisión y análisis de toda la información de puentes disponibles en la entidad (Consultorías del banco mundial, planos record, centro de documentación, archivo distrital, archivo de empresas de consultoría y de construcción, etc.) a fin de completar el inventario de puentes de la Entidad.

2. Realizar la revisión de la información existente del inventario geométrico y tipologías estructurales de los puentes peatonales y vehiculares de la ciudad (SIGIDU, con fecha de actualización 07/02/2017).

3. Elaborar el modelo de amenaza sísmica a nivel del basamento rocoso que permita estimar los espectros de amenaza uniforme probabilista y las solicitaciones sísmicas para los puentes vehiculares y peatonales de la ciudad para diferentes periodos de retorno (31, 225, 475, 1000, 2500 años), utilizando los resultados de la microzonificación sísmica de Bogotá de 2010.

4. Determinar mediante modelación analítica la respuesta dinámica de los depósitos de suelo de la ciudad, que permitan representar el comportamiento de diferentes perfiles de suelo característicos ante solicitaciones sísmicas, y determinar así los factores de amplificación espectral en cada punto donde se ubican los puentes de la ciudad.

5. Calcular la amenaza sísmica en superficie integrando los espectros de amenaza uniforme en el basamento rocoso y los factores de amplificación espectral para obtener la solicitación sísmica esperada en la superficie del terreno para cada uno de los puentes vehiculares y peatonales de la ciudad.

6. Definir el conjunto de escenarios estocásticos representativos de la amenaza sísmica de la ciudad dependiendo de su origen sismogénico, la localización específica y los rangos de magnitudes esperados.

7. Elaborar la metodología básica de inspección y diagnóstico del estado de los puentes peatonales y vehiculares del Distrito que permita cuantificar y priorizar las obras de intervención en actividades de mantenimiento.

8. Elaborar la metodología detallada de inspección y diagnóstico para los puentes peatonales y vehiculares del Distrito, que incluya ensayos de campo y laboratorio, métodos de análisis e interpretación de resultados con el fin de que pueda ser aplicada por la Entidad en las diversas actividades de monitoreo y contratos de conservación de la infraestructura del Distrito.

9. Identificar, valorar, revisar y analizar toda la información de puentes disponibles en planos arquitectónicos y estructurales, planos récord de puentes vehiculares y peatonales en el repositorio del IDU, en el Centro de Documentación del IDU, Archivo Distrital, archivos de empresas de consultoría y de construcción de puentes, fotografías disponibles y levantadas de sistemas de información geográfica, entre otros.

10. Realizar, actualizar, complementar y ajustar el inventario geométrico de los puentes que hacen parte de la infraestructura de la ciudad que permita complementar la base de datos con parámetros obtenidos del levantamiento geométrico e inspección de puentes.

11. Realizar, actualizar, complementar y ajustar el inventario estructural para cada uno de los puentes definidos en la base de datos, relacionando atributos como sección y dimensiones de las columnas, material de la superestructura y subestructura, llaves de cortante, topes sísmicos, ancho de silla, tipo y número de apoyos por luz, entre otros.

12. Estructurar, elaborar, ajustar, complementar y adecuar la base de datos en términos geográficos, geométricos y estructurales, incluyendo la elaboración del modelo de base de datos geográfica, y la revisión y recopilación completa de toda la información existente de cada puente (planos, fotos, dimensiones, fechas intervenciones, mantenimientos, etc.).

13. Definir las tipologías estructurales de los puentes vehiculares y peatonales que harán parte de la base de datos de puentes de la Entidad.

14. Establecer y completar la información que permita caracterizar cada una de las tipologías de puentes tales como la información geométrica, propiedades de materiales y condiciones estructurales específicas.

15. Establecer la metodología aplicable en la Entidad para determinar los valores de reposición de la infraestructura de puentes del Distrito, la cual debe ser aplicada para el análisis del riesgo sísmico y para definir la información requerida de protección financiera. El modelo debe incluir presupuestos actualizados aproximados y el análisis de precios unitarios de acuerdo con la información oficial del IDU, así como otros factores que incidan en los presupuestos de construcción.

16. Determinar las funciones de costo de reparación y costo de reposición de los componentes que conforman las tipologías estructurales en función del nivel de daño esperado.

17. Parametrizar los elementos o atributos claves de los puentes (número de luces, continuidad en los apoyos, configuración de columnas, características de estribos, entre otros) para cada una de las tipologías, a fin de ser utilizados en los modelos de análisis del comportamiento estructural tanto en la dirección transversal como longitudinal de las estructuras.

18. Implementar modelos de comportamiento para los elementos estructurales susceptible a daño a fin de tener en cuenta la no linealidad de los mismos y definir los niveles de daño de cada uno de los elementos con el fin de identificar y relacionar los costos correspondientes.

19. Realizar el análisis de las estructuras a partir del análisis modal, análisis estático lineal, análisis estático no lineal (push-over) y análisis dinámico no lineal que incluye efectos P-delta, por medio de software especializado con el fin de determinar los parámetros de demanda sísmica que caractericen la respuesta y permitan estimar el nivel de daño.

20. Elaborar y presentar las funciones de vulnerabilidad de cada una de las tipologías estructurales que representan a los puentes construidos en la ciudad de Bogotá D.C., mediante un catálogo de funciones de vulnerabilidad representativas.

21. Proponer un esquema de intervención de reforzamiento estructural de puentes vehiculares y peatonales de acuerdo con los resultados de la evaluación del comportamiento estructural, así como los daños susceptibles de cada uno de los componentes que conforman la estructura de cada puente.

22. Realizar la evaluación del riesgo sísmico del portafolio de puentes vehiculares y peatonales de la ciudad de Bogotá, D.C, utilizando para el efecto la plataforma CAPRA-GIS. Evaluar la pérdida anual esperada (PAE) para cada uno de los puentes y la pérdida máxima probable (PMP) para el portafolio de infraestructura de puentes de la ciudad.

23. Definir los escenarios sísmicos críticos como aquellos escenarios que representen la mayor participación en la pérdida anual esperada y los sismos que puedan generar los mayores impactos en el portafolio de puentes de la ciudad.

24. Enunciar los planes de mitigación del riesgo que resulten viables para el portafolio de puentes de la ciudad, los cuales deben permitir gestionar eventuales planes de reforzamiento y rehabilitación, así como estrategias de protección financiera.

25. Presentar los planes de intervención, reforzamiento y rehabilitación de puentes vehiculares y peatonales de acuerdo con los resultados de la evaluación del comportamiento estructural, los daños susceptibles de cada uno de los componentes que conforman la estructura de cada puente, y la pérdida física esperada.

26. Realizar la evaluación del beneficio-costo de las opciones de mitigación en términos de su reducción efectiva del riesgo, con el fin de generar las bases para un plan de priorización de las intervenciones de mitigación ante disponibilidad presupuestal limitada.

27. Presentar un esquema específico de retención y transferencia del riesgo que pueda ser aplicable a las condiciones de la Entidad y del Distrito.

2.3 ALCANCE DE ACTIVIDADES PRINCIPALES

Este documento corresponde al informe final consolidado y resumido de las actividades llevadas a cabo en el marco del contrato de consultoría No. 1556 de 2017 cuyo objeto formal es la ACTUALIZACIÓN, COMPLEMENTACIÓN Y AJUSTE DEL INVENTARIO GEOMÉTRICO Y ESTRUCTURAL, ASÍ COMO LA DETERMINACIÓN DEL DIAGNÓSTICO, EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO Y DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DEL RIESGO, PARA LA INFRAESTRUCTURA DE PUENTES DE BOGOTÁ D.C.

Las principales actividades desarrolladas en el proyecto y el alcance de las mismas se describen a continuación:

1. Revisión y consolidación de la información existente en el sistema de información y base de datos actual del IDU (SIGIDU). Se lleva a cabo una investigación de referentes internacionales en particular de la Federal Highway Administration de los Estados Unidos (FHWA) con el fin de diseñar un sistema de información que esté al nivel del estado del arte a nivel mundial.

2. Evaluación de la amenaza sísmica de la ciudad en el basamento rocoso con el fin de establecer las solicitaciones a las cuales están expuestos los puentes vehiculares y peatonales de acuerdo con su ubicación geográfica particular. La amenaza sísmica se evalúa inicialmente a nivel del terreno firme o basamento rocoso y se lleva a cabo mediante un modelo probabilista que tiene en cuenta toda la información sísmica reciente e involucra en el análisis la incertidumbre en todos los parámetros considerados. El modelo se desarrolla con base en toda la información disponible la cual permite caracterizar las condiciones sísmicas representativas del área de estudio, incluyendo la definición de las fuentes sismogénicas de influencia y su caracterización completa con información proveniente del catálogo sísmico nacional e información geológica y neo-tectónica reciente. De esta manera es posible determinar la actividad sísmica de las fuentes según la recurrencia histórica de los eventos sísmicos, permitiendo calcular mediante parámetros probabilistas los niveles de intensidad en términos de aceleraciones espectrales. Estos parámetros a su vez se representan mediante espectros de amenaza uniforme para diferentes periodos de retorno, o mapas con la distribución geográfica de variables como la aceleración máxima del terreno, o las aceleraciones espectrales para diferentes periodos estructurales de análisis.

3. Análisis de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo de la ciudad, en donde a partir de la información geotécnica y geológica se establecen los factores de amplificación espectral para las diferentes zonas de la ciudad. La metodología general incluye la recopilación de la información disponible en estudios anteriores para poder caracterizar geotécnicamente cada una de las zonas geológicas definidas. Posteriormente, para cada zona característica se generan conjuntos de perfiles de suelo estocásticos, en función de la incertidumbre de cada uno de los parámetros geotécnicos. Cada uno de estos perfiles se analiza posteriormente mediante modelos de respuesta dinámica no lineal equivalente, lo cual permite establecer conjuntos de espectros de amplificación para cada zona de análisis. Los resultados de estos análisis se integran con la información de los periodos de vibración fundamentales del suelo para poder determinar la distribución espacial de la amplificación espectral de los depósitos de suelo en la ciudad. Por último, la información de amenaza sísmica en roca se integra con los efectos de sitio para obtener los espectros de aceleración y su distribución espacial en superficie para diferentes periodos de retorno.

4. Generación de un conjunto suficientemente amplio de eventos estocásticos que en conjunto representen la amenaza sísmica a la que están expuestos los puentes de la ciudad, con base en la información probabilista de amenaza en la superficie del terreno. Cada evento estocástico está representado por la distribución geográfica en el área de estudio de alguno de los parámetros sísmicos relevantes como puede ser la aceleración máxima del terreno, o la aceleración espectral para diferentes periodos estructurales de vibración. Estos parámetros tienen asociada una función

de distribución de probabilidad log-normal por lo cual se especifica el valor medio y la varianza correspondiente.

5. Diseño e implementación de metodologías de levantamiento de información geométrica, estructural y del estado de los puentes (básica y detallada). Estas metodologías se definen a partir de una revisión bibliográfica intensiva de guías y manuales internacionales de levantamiento, conformación de inventarios y bases de datos de puentes e infraestructura, guías de inspección y de evaluación de estado de los puentes.

6. Recopilación de información de planos arquitectónicos y estructurales de puentes, disponibles en los inventarios realizados en años anteriores (consultorías IDU-BM-187 del 2006 e IDU-BM-115 del 2009), planos récord de puentes en el repositorio de IDU, en el Centro de Documentación, Archivo Distrital, y archivos de empresas de consultoría y construcción de puentes. Se incluye además la consolidación de información de planos de diseño, construcción o récord para: a) recuperación documental para almacenamiento en la base de datos, b) identificación de detalles constructivos para complementación en la definición de tipologías, c) recopilación de cantidades de obra y presupuestos (a través de los contratos asociados a los planos recopilados) para valoración económica de construcción de puentes, y d) recopilación de información de calidad complementaria a los levantamientos topográficos y geométricos. La información recopilada se clasifica, depura y asigna a los puentes del inventario, para su posterior inclusión en la base de datos.

7. Puesta en marcha y ejecución en campo del levantamiento de información topográfica, geométrica y estructural de los puentes del Distrito, así como la inspección básica y evaluación del estado de los mismos. Como resultado del levantamiento topográfico se obtienen productos cartográficos (planos en planta, perfil y secciones transversales tipo) georreferenciados, así como una representación 3D del puente de los elementos levantados en campo usando el comando 3Dpoly en las líneas continuas. Los levantamientos geométricos y estructurales entregan datos sobre dimensiones de los componentes principales (ancho, longitud, gálibos, luces, entre otros), las secciones de los elementos estructurales principales, los materiales de elementos estructurales y elementos de servicio, y demás características dimensionales y estructurales del puente. Esta información se reporta en formatos de levantamiento, complementada por un registro fotográfico de los componentes del puente. A su vez, el registro fotográfico contiene la identificación de patologías en los componentes estructurales y no estructurales del puente, registrados a través de un formulario de inspección, y acompañado de la evaluación del estado del puente debido a las patologías presentes identificadas, siguiendo la metodología desarrollada durante este estudio. La información geométrica, estructural y de inspección básica es consignada en el sistema de información y base de datos mediante informes de levantamiento e inspección, archivos digitales de soporte, registro fotográfico, y demás información relacionada.

8. Actualización e implementación de la base de datos geográfica (SIGIDU) de puentes del Distrito. Los campos de la base de datos se definen de acuerdo con el análisis de requerimientos de las áreas técnicas y SIG del IDU, así como la recopilación de observaciones realizadas durante las inspecciones de campo. Luego se realiza el diseño lógico y modelo relacional para elaborar la base de datos geográfica en cuanto a contenido de capas geográficas, tablas relacionales, atributos y

dominios. Lo anterior permite la actualización, complementación y ajuste del inventario geométrico y estructural de los puentes que hacen parte de la infraestructura de la ciudad, y a su vez estructurar, elaborar, ajustar, complementar y adecuar la base de datos en términos geográficos, geométricos y estructurales.

9. Valoración de costos por obra nueva para las tipologías de puentes existentes, y valoración económica de reposición de los activos expuestos. Se realiza una revisión bibliográfica y una consulta de los contratos de construcción de las diferentes tipologías de puentes, obteniendo índices y cantidades de obra para los componentes de superestructura, subestructura y cimentación, así como un análisis de los precios unitarios detallados de las actividades incluidas en los presupuestos para estos componentes. Además, se recopilan y clasifican índices relativos de los demás capítulos del presupuesto global con respecto al capítulo de estructura, para la conformación de valores totales de presupuestos de construcción nueva. Por otro lado, y con el fin de alimentar los modelos numéricos para la definición de la vulnerabilidad de las tipologías de puentes, se determinan los costos de reparación y costos de reposición en función del nivel de daño esperado para los componentes críticos de cada tipología. Esta valoración se lleva a cabo a partir de presupuestos de reparación según valores recopilados en revisiones bibliográficas y consultas de contratos de reparación y reforzamiento de puentes del Distrito.

10. Definición de las funciones de vulnerabilidad de las tipologías de puentes, mediante la evaluación del comportamiento de respuesta dinámica de las estructuras. Primero, se definen y asignan tipologías representativas a través de una taxonomía que tiene en cuenta las características estructurales, y luego se lleva a cabo la identificación de elementos críticos o componentes susceptibles a daño para cada tipología. Se conforman modelos de comportamiento no lineal de estos componentes, y a su vez modelos no lineales paramétricos de las tipologías de puentes, conformados por los componentes previamente definidos. El análisis no lineal del comportamiento de la estructura entrega los resultados de parámetros de demanda sísmica, con los cuales se calcula el daño en los componentes. A través del modelo de costos de reparación y los diferentes estados de daño definidos por curvas de fragilidad, se calculan las funciones de vulnerabilidad para cada tipología. Como resultado de esta actividad, se entrega un catálogo de funciones de vulnerabilidad, que relacionan una intensidad sísmica con costo de reparación/reposición de la estructura.

11. Evaluación del riesgo sísmico para el portafolio de puentes vehiculares y peatonales de la ciudad de Bogotá, D.C., utilizando para el efecto la plataforma CAPRA-GIS la cual considera la amenaza sísmica y su amplificación por efectos de sitio, la información de exposición, la representación de la vulnerabilidad sísmica de las tipologías predominantes de puentes y la valoración económica de los activos expuestos. Se evalúan los 1006 puentes que conforman la base de datos de los puentes de la ciudad, considerando las excepciones de elementos expuestos que se identifiquen como estructuras que no son puentes como parte de las actividades predecesoras de levantamiento en campo, inspección y vulnerabilidad. El riesgo sísmico se expresa en términos de la afectación física y pérdidas económicas esperadas usando diferentes métricas de riesgo.

12. Definición de los escenarios sísmicos críticos y cuantificación de los impactos. Estos escenarios corresponden a aquellos que pueden generar las peores afectaciones físicas con sus correspondientes

pérdidas económicas, o aquellos escenarios que mayor participación pueden llegar a tener considerando conjuntamente el nivel de pérdida económica esperada y su frecuencia de ocurrencia. Los escenarios críticos definidos permiten, además de tener un entendimiento claro del nivel de riesgo de la infraestructura, contar con la información básica para la elaboración de planes de atención de emergencias, y análisis de eventos extremos para evaluar la funcionalidad y/o recuperación de la infraestructura de puentes del Distrito.

13. Definición de estrategias de mitigación del riesgo sísmico del portafolio de exposición compuesto por puentes vehiculares y peatonales, a partir de los resultados de la evaluación del comportamiento estructural, los daños susceptibles de cada uno de los componentes que conforman la estructura de cada puente, y la pérdida física esperada. Las estrategias de mitigación del riesgo sísmico incluyen planes de intervención, reforzamiento y rehabilitación.

14. Evaluación de las relaciones beneficio-costo de las opciones de mitigación en términos de su reducción efectiva del riesgo para cada una de las tipologías representativas de puentes. Estas relaciones permiten establecer cuáles de las intervenciones propuestas resultan costo-eficientes. Por otro lado, dan indicación clara para establecer una priorización de las intervenciones de mitigación ante disponibilidad presupuestal limitada.

15. Definición de estrategias de protección financiera ante riesgos catastróficos del portafolio de puentes, mediante esquemas de retención y transferencia del riesgo, y el análisis de diferentes instrumentos financieros disponibles en el mercado. Esta información permite establecer las bases para un plan de protección financiera de la infraestructura de puentes del Distrito.

CAPITULO
3

3 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

3.1 AMENAZA SÍSMICA EN EL BASAMENTO ROCOSOS

3.1.1 Metodología general

La estimación de los niveles de aceleración a nivel del basamento rocoso o roca se realiza mediante un análisis probabilista de amenaza sísmica, metodología que puede ser resumida en cuatro pasos (Kramer, 1996):

a) En primer lugar, se lleva a cabo la identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, para lo cual es necesario realizar una revisión bibliográfica para la definición de las principales fuentes activas en la zona de interés, así como para establecer su trazo y geometría en profundidad.

b) En segundo lugar, se realiza la caracterización de la ocurrencia de sismos en las fallas, para lo cual se utiliza un modelo de recurrencia que permita especificar las tasas de excedencia anuales de diferentes magnitudes. Para el presente caso, el modelo de recurrencia utilizado corresponde a un modelo de Gutenberg – Richter doblemente truncado con unos parámetros que se describirán más adelante.

c) Adicionalmente se seleccionan los modelos o leyes de atenuación, los cuales permiten relacionar el decaimiento de la intensidad de un parámetro sísmico (PGA o aceleración espectral) a medida que aumenta la distancia del epicentro donde ocurre el evento y en función de la magnitud del evento sísmico. Dichos modelos de atenuación tienen asociada una incertidumbre, la cual es considerada dentro del cálculo de la amenaza sísmica.

d) Finalmente se lleva a cabo la estimación de curvas de amenaza probabilista, las cuales relacionan las tasas anuales de excedencia asociados a diferentes niveles de intensidad (PGA o aceleración espectral). A partir de una colección de curvas de amenaza calculadas para diversos periodos estructurales es posible determinar espectros de amenaza uniforme para periodos de retorno de interés.

La Figura 3-1 presenta de manera simplificada los pasos de la metodología para el análisis probabilista de amenaza sísmica en cada punto de la zona de interés.

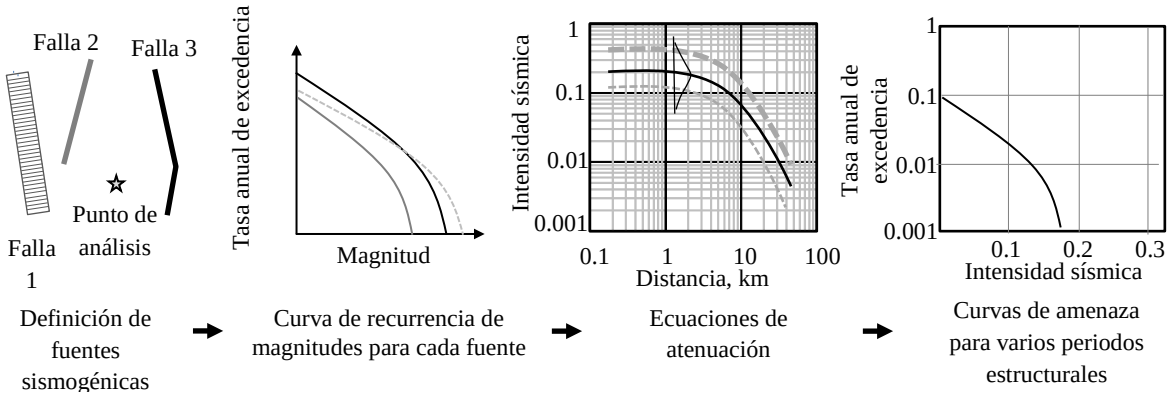


Figura 3-1. Metodología del análisis probabilista de amenaza sísmica

3.1.2 Catálogo sísmico

La evaluación de la amenaza sísmica se basa en buena parte en la información existente de eventos sísmicos históricos la cual es generalmente insuficiente y defectuosa. El Servicio Geológico Colombiano (SGC) es la entidad nacional encargada de la recopilación de información referente a mapas geológicos, catálogo sísmico y manejo de la Red Nacional de Acelerógrafos entre otros. El catálogo sísmico representa una base de datos con todos los sismos registrados en el territorio nacional o cerca al mismo, en el cual se tiene para cada evento información asociada a su ubicación (longitud, latitud y profundidad), fecha y hora de ocurrencia, así como su magnitud. Para el presente estudio se utilizó el catálogo sísmico oficial del Servicio Geológico Colombiano SGC (Servicio Geológico Colombiano SGC, 2017) con un total de 34,653 eventos registrados entre el año 1610 y 2014, unificado en magnitud de momento. La Figura 3-2 presenta el mapa de los eventos contenidos en el catálogo sísmico, mientras que la Tabla 3-1 presenta el número de eventos en los diferentes rangos de magnitudes de momento.

Tabla 3-1. Distribución de eventos del catálogo por rangos de magnitud

Rango	N. eventos
≤ 4.0	24,985
4.1 - 4.5	4,443
4.6 - 5.0	3,620
5.1 - 5.5	926
5.6 - 6.0	352
6.1 - 6.5	207
6.6 - 7.0	75
7.1 - 7.5	30
7.6 - 8.0	13
> 8.0	2
TOTAL	34,653

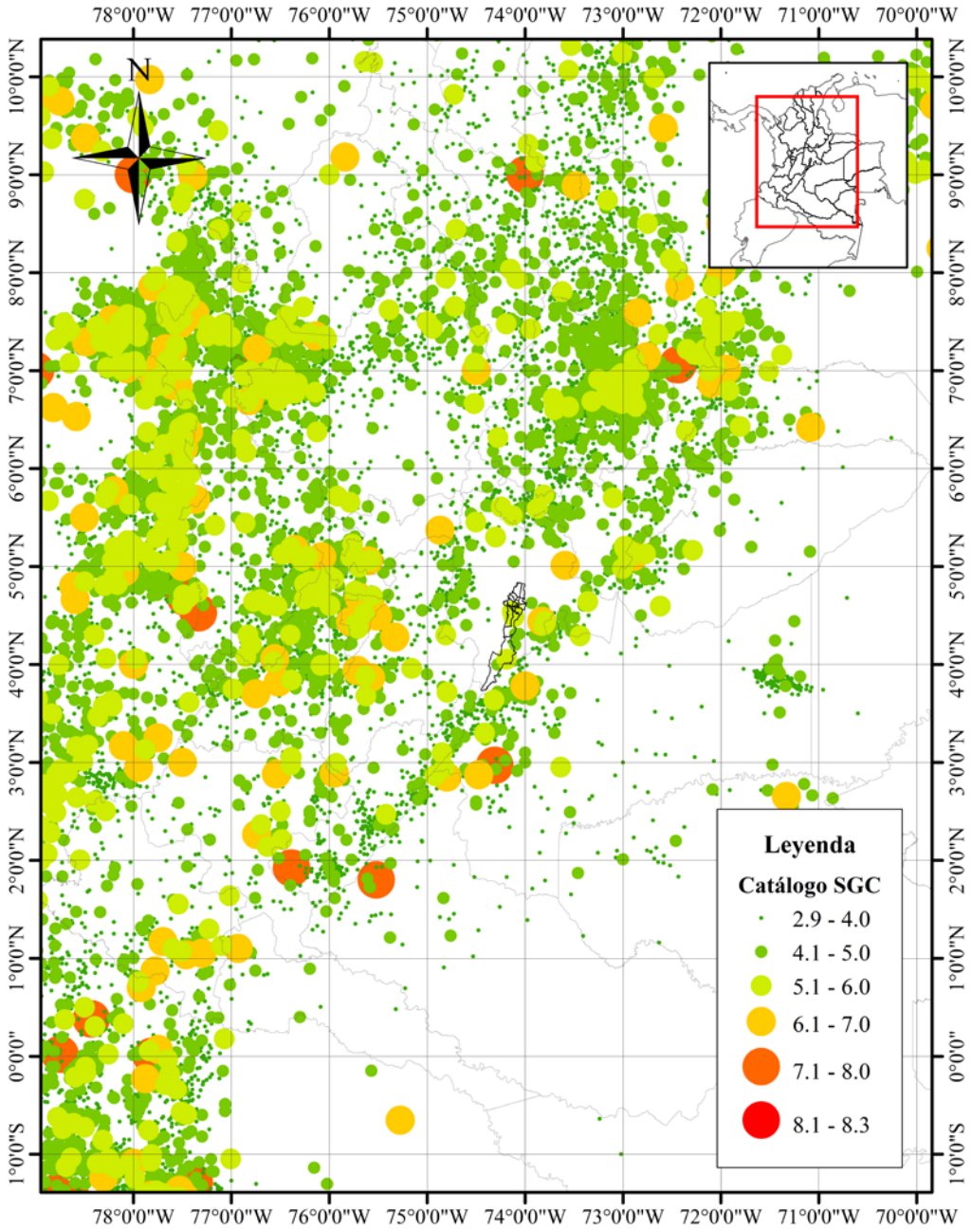


Figura 3-2. Catálogo sísmico de Colombia unificado en magnitud de momento M_w

Con el objetivo de determinar los parámetros que describen la sismicidad de las fuentes se precedió a depurar el catálogo sísmico, ya que la ocurrencia de eventos sísmicos corresponde a un proceso de Poisson en el cual se asume que los eventos ocurren de forma independiente en el tiempo. La depuración del catálogo sísmico corresponde a un proceso en el cual se separan los eventos principales de eventos premonitorios y réplicas, con el objetivo de identificar los eventos principales a utilizar para el cálculo de los parámetros de sismicidad de las fuentes. Para este fin se utilizó el algoritmo propuesto por Reasenberg (Reasenberg, 1985), en el cual se agrupan los eventos sísmicos de acuerdo a ventanas espaciales y temporales definidas en

función de la magnitud del evento principal. Al final, el evento con mayor magnitud de cada grupo se considera el evento principal, mientras que los eventos restantes se dividen entre eventos premonitorios y réplicas.

De igual manera, se definió una magnitud umbral igual a 4, y por lo tanto se eliminaron los eventos con magnitud inferior este valor. Este valor de magnitud umbral ha sido utilizado en estudios anteriores como el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia de 2009 (Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009), además se puede encontrar correlaciones de magnitudes con la escala de Mercalli modificada, en las que se encuentra que sismos con magnitud inferior a 4 generan un efecto casi imperceptible en las estructuras (United States Geological Survey USGS, 2018). Tras el proceso de depuración y eliminación de eventos con magnitud menor a la magnitud umbral se obtuvo un catálogo con un total de 8,389 eventos. La Figura 3-3 presenta el número de eventos acumulado por año, lo cual permite establecer que el catálogo presenta una completitud aceptable a partir del año 1963 aproximadamente, definiendo así una ventana de tiempo de análisis de 51 años.

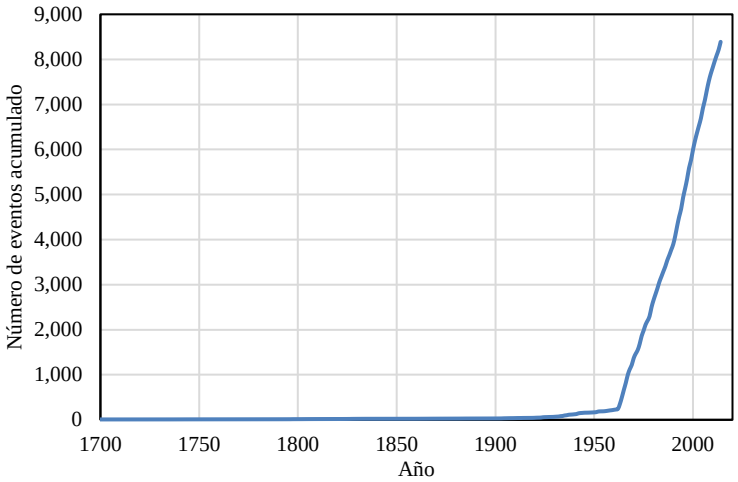


Figura 3-3. Número de eventos acumulados por año

3.1.3 Fuentes sismogénicas

La definición de las fuentes sismogénicas se realiza a partir de una recopilación de estudios referentes al movimiento de las placas que convergen en el norte de Suramérica y su interpretación (Bird, 2003), las cuales determinan de forma importante la concentración de la sismicidad en el país (Tobón, 2017) (Herrera, 2017). De igual manera, se consultó la última versión del mapa geológico de Colombia publicado por el Servicio Geológico Colombiano SGC (Servicio Geológico Colombiano, 2018) con el objetivo de conocer el trazado de las principales fallas activas en el territorio nacional, especialmente en el área de influencia de la ciudad de Bogotá (es decir, en una radio de aproximadamente 200 Km donde se pueden localizar las fuentes sísmicas que más aportan a la amenaza sísmica de la ciudad). El modelo geométrico utilizado corresponde a 40 fallas sismogénicas en todo el territorio nacional. La Figura 3-4 y la Figura 3-5 presentan las fuentes sismogénicas corticales y las zonas de subducción definidas para el presente estudio respectivamente.

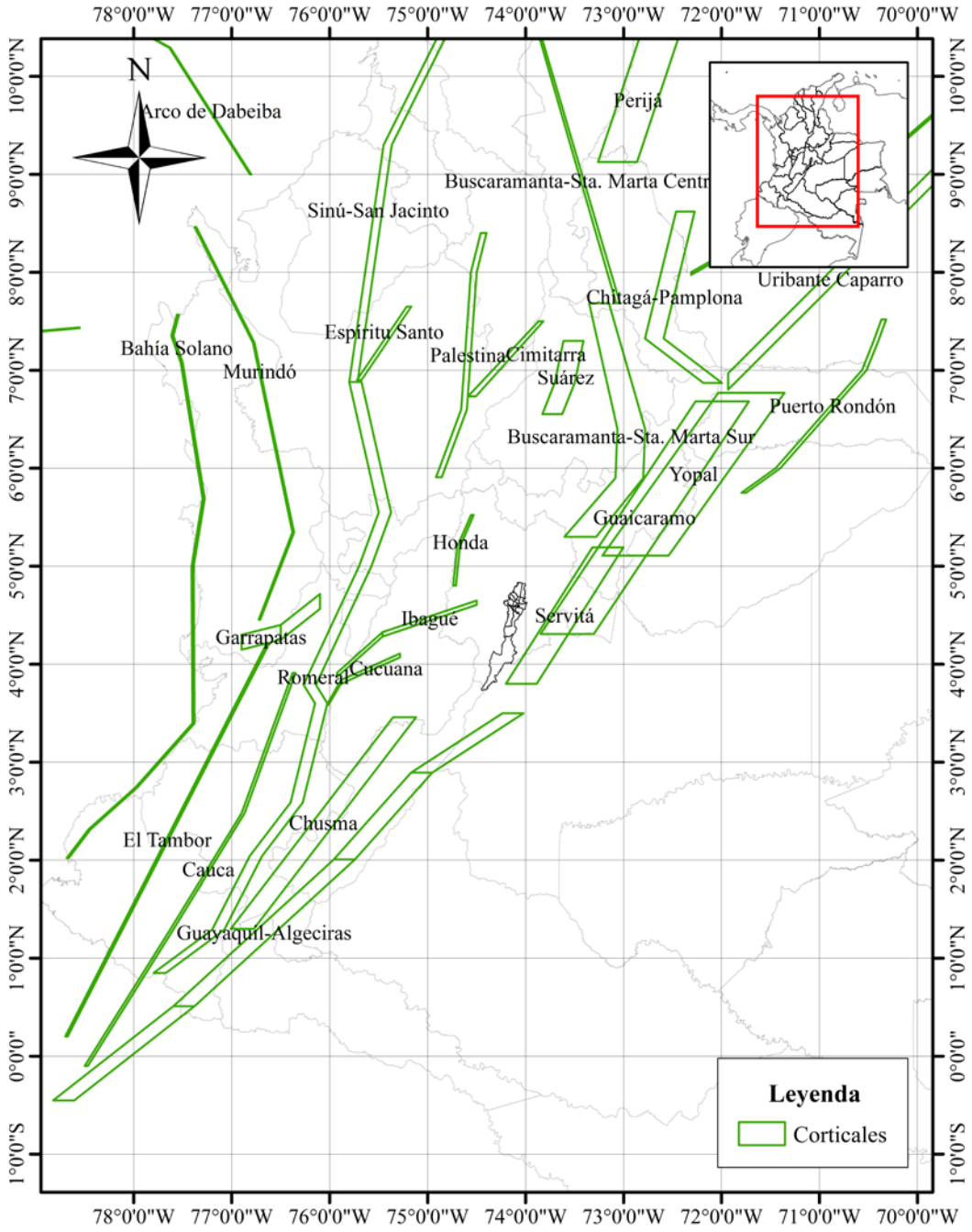


Figura 3-4. Zonas sismogénicas corticales

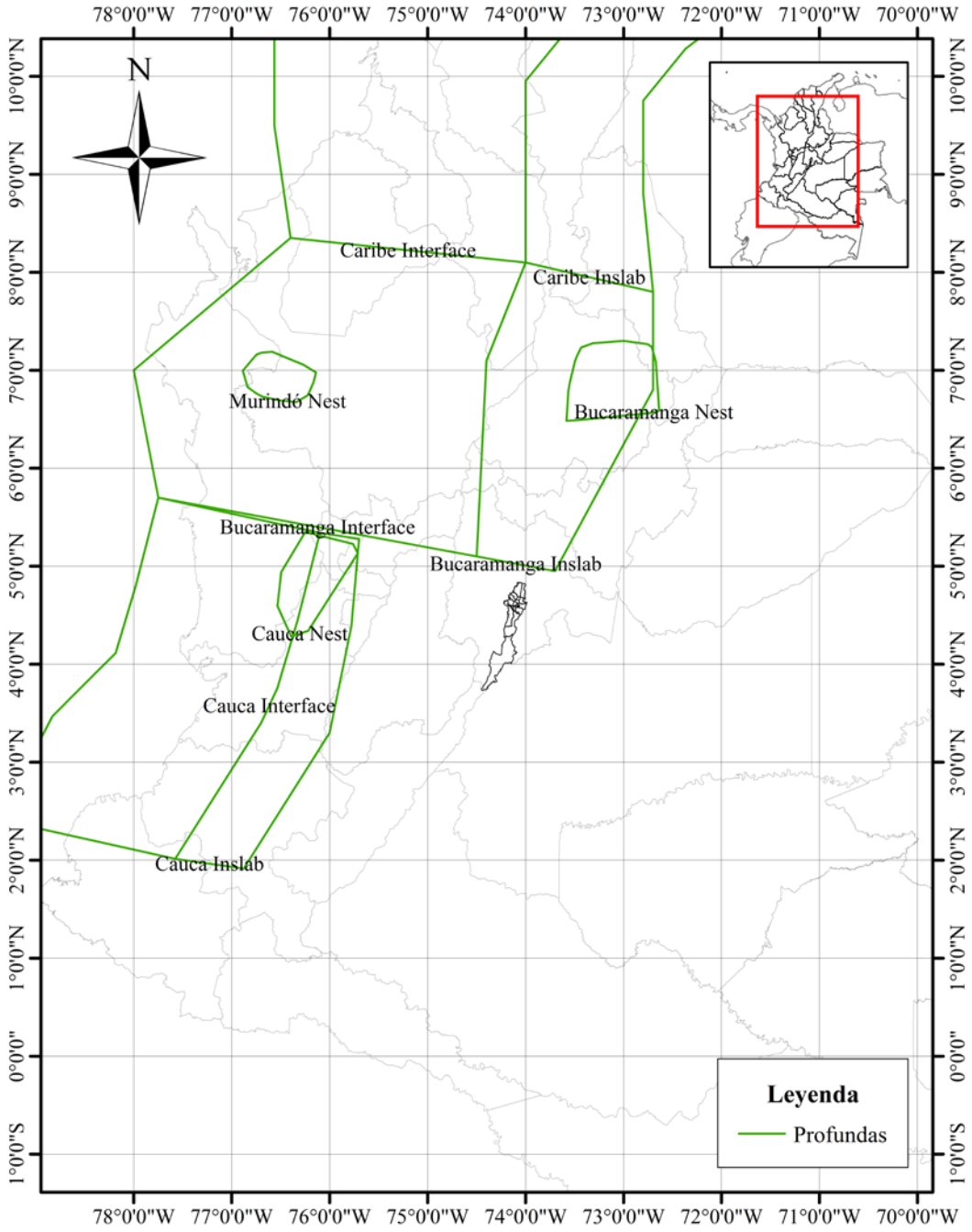


Figura 3-5. Zonas sismogénicas de subducción

Adicionalmente, la Tabla 3-2 presenta las características más relevantes de las zonas corticales y las zonas de subducción.

Tabla 3-2. Características de las zonas sismogénicas corticales y de subducción

Zona	Características
Cortical	Las fallas corticales representan fracturas de las placas tectónicas, en las cuales se generan eventos movimientos por acumulación de esfuerzos. Los sismos asociados a fallas corticales son superficiales, con profundidades no mayores a los 35 Km aproximadamente (Pacific Northwest Seismic Network PNSN, 2018).
Subducción	Las zonas de subducción son lugares donde dos placas de la litósfera se juntan, provocando que una se hunda bajo la otra (United States Geological Survey USGS, 2018). Las rupturas sísmicas que ocurren en estas zonas se pueden dividir en rupturas de *interface* (donde hay contacto entre las dos placas) o *inslab* (es decir, rupturas que ocurren dentro de la placa tectónica) (Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 2018).

3.1.4 Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas

Para efectos de los estudios de amenaza sísmica probabilista es necesario caracterizar la actividad de cada una de las fuentes sismogénicas, la cual puede ser representada como un proceso de Poisson. En este, la actividad de cada una de las fuentes se especifica como función de la tasa de excedencia de las magnitudes, $\lambda(M)$, de los eventos que allí se generan. Esta tasa mide qué tan frecuentemente se generan eventos con magnitud superior a un valor determinado. En el presente estudio, se ajusta la sismicidad de cada fuente con un modelo de Gutenberg y Richter truncado, cuya tasa de excedencia está definida por la siguiente expresión (Cornell, 1968):

$$\lambda(M) = \lambda_0 \left(\frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \right) \qquad (1)$$

Donde, λ_0 corresponde a la tasa anual de excedencia de la magnitud umbral ($M_0 = 4$) de cada una de las fuentes sísmicas expresada en número de eventos por año y β corresponde a la pendiente de la curva. En la Figura 3-6 se muestran curvas de recurrencia de magnitudes ilustrativas para dos zonas sísmicas distintas, una para una zona de alta sismicidad capaz de generar sismos con M > 8 (curva azul) y otra de sismicidad intermedia (curva roja).

A partir del modelo geométrico presentado anteriormente se realizó la asignación de los eventos contenidos en el catálogo sísmico depurado a las diferentes fallas con el objetivo de obtener los parámetros de sismicidad requeridos.

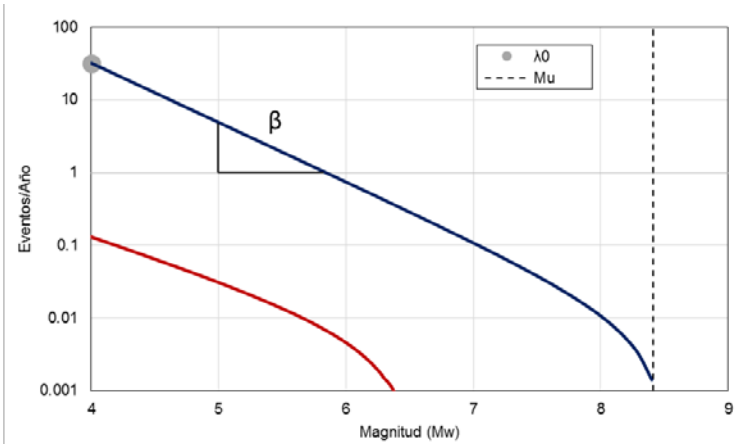


Figura 3-6. Tasas de excedencia de magnitudes para el modelo de sismicidad de Poisson

El parámetro λ_0 representa la tasa anual de excedencia de la magnitud umbral, definida anteriormente igual a 4. Para el cálculo de este parámetro en cada una de las fallas se utiliza la siguiente expresión:

$$\lambda_0 = \frac{N}{t} \qquad (2)$$

Donde N corresponde al total de eventos asignados a la falla y t corresponde al periodo de tiempo en el cual se tiene completitud del catálogo sísmico, es decir, 51 años como se definió en la sección 3.1.2.

El parámetro β representa la relación de sismos de magnitudes pequeñas y grandes que se puedan presentar en una falla. Así, un valor de β grande indica que la sismicidad de una falla está controlada por eventos de magnitudes bajas, mientras que un valor bajo indica que la sismicidad se encuentra controlada por eventos de magnitudes grandes. Para el cálculo de este parámetro se utilizó la expresión propuesta por (Aki, 1965), presentada a continuación:

$$\beta = \frac{1}{\bar{m} - m_0} \qquad (3)$$

Donde $\bar{m}$ representa el promedio de las magnitudes de los sismos asociados a la falla, y m_0 corresponde la magnitud umbral, es decir, 4.

El coeficiente de variación CV del parámetro β se calcula como una relación entre la desviación estándar y el valor medio del parámetro. La desviación estándar del parámetro β se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SD_\beta = \frac{\beta}{\sqrt{N}} \qquad (4)$$

Donde N representa el número de eventos asignados a cada falla. Por último, la magnitud última Mu fue definida teniendo en cuenta valores de magnitudes máximas observadas en el catálogo sísmico histórico y magnitudes máximas esperadas basadas en relaciones empíricas. En la Tabla 3-3 se muestran los valores de los parámetros de sismicidad para las fuentes corticales y de subducción identificadas en el territorio colombiano.

Tabla 3-3. Parámetros de sismicidad de las fuentes

ID	Falla	λ_0	β	CV β	Mu
1	Arco de Dabeiba	0.340	1.972	0.236	8.2
2	Bahía Solano	0.962	1.100	0.140	8.0
3	Boconó	2.509	1.509	0.087	8.3
4	Bucaramanga-Sta. Marta Centro	0.302	2.707	0.250	6.1
5	Bucaramanga-Sta. Marta Norte	0.130	1.333	0.440	6.0
6	Bucaramanga-Sta. Marta Sur	0.472	2.363	0.200	6.7
7	Cauca	0.642	2.396	0.171	7.7
8	Chitagá-Pamplona	0.698	1.530	0.164	7.6
9	Chusma	0.302	2.010	0.250	7.5
10	Cimitarra	0.321	3.148	0.243	6.4
11	Cucuana	0.208	1.398	0.302	6.6
12	Cuiza	0.283	2.419	0.258	7.5
13	El Tambor	0.736	2.822	0.160	8.7
14	Espíritu Santo	0.113	3.681	0.408	6.2
15	Garrapatas	0.094	2.083	0.447	6.4
16	Guaicaramo	0.679	1.887	0.167	7.5
17	Guayaquil-Algeciras	4.340	2.615	0.066	8.1
18	Honda	0.245	2.041	0.277	7.0
19	Ibagué	0.226	2.899	0.289	7.3
20	Murindó	1.377	2.116	0.117	7.1
21	Oca	0.736	1.663	0.160	6.9
22	Palestina	0.396	1.875	0.218	6.6
23	Perijá	0.302	1.672	0.250	6.8
24	Puerto Rondón	0.094	1.282	0.447	7.1
25	Romeral	0.566	1.847	0.183	7.4
26	Servitá	0.604	2.053	0.177	7.4
27	Sinú-San Jacinto	0.094	3.086	0.447	6.7
28	Suárez	0.340	1.731	0.236	6.5
29	Transformante Panamá-Pacífico	3.189	1.294	0.077	8.0
30	Uribante Caparro	0.830	1.345	0.151	7.5
31	Yopal	0.415	1.618	0.213	6.9
32	Bucaramanga Interface	9.396	1.545	0.045	7.9
33	Caribe Interface	3.208	1.960	0.077	7.9
34	Cauca Interface	11.679	1.510	0.040	7.5
35	Bucaramanga Inslab	5.000	2.358	0.061	7.9
36	Caribe Inslab	1.981	2.091	0.098	8.0
37	Cauca Inslab	2.283	1.422	0.091	8.1
38	Bucaramanga Nest	21.453	1.898	0.030	6.9
39	Cauca Nest	1.717	1.386	0.105	7.3
40	Murindó Nest	1.226	1.879	0.124	6.7

3.1.5 Leyes de atenuación

Uno de los componentes que más incidencia tienen en los resultados de los modelos probabilistas de amenaza sísmica corresponde a las leyes de atenuación, las cuales tienen incidencia no solo en la amplitud de los resultados sino en las formas espectrales obtenidas. Para la selección de las leyes de atenuación se

realizó una comparación entre los espectros obtenidos de las señales de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) (Servicio Geológico Colombiano, 2018) y los espectros teóricos obtenidos con diferentes leyes de atenuación consideradas.

A partir de los resultados obtenidos de la asignación de eventos, cada registro asociado a un evento específico se asignó bien sea a una falla cortical o a una zona de subducción interplaca o intraplaca (Herrera, 2017). Para cada uno de los registros de eventos se calculó el residual para diferentes ordenadas espectrales mediante la siguiente expresión:

$$Residual = Ln\left(\frac{Sa_{real}}{Sa_{calculado}}\right) \qquad (5)$$

Como resultado de este proceso se encontró que las leyes de atenuación más adecuadas para el territorio colombiano de acuerdo con la información disponible en el momento son las siguientes:

- Fallas corticales: (Bindi, y otros, 2014)
- Subducción intraplaca: (Abrahamson, Gregor, & Addo, 2016)
- Subducción interplaca: (Abrahamson, Gregor, & Addo, 2016)

A continuación se presenta una breve descripción de los modelos de atenuación considerados:

- Modelo de Bindi (Bindi, y otros, 2014):
  Este modelo de atenuación fue desarrollado para estimar PGA, PGV y aceleración espectral para periodos estructurales hasta de 3 segundos, considerando el promedio de las componentes horizontales de los registros sísmicos. Es válido para distancias hasta de 300 Km y permite considerar dos tipos de distancia: Joyner & Boore y distancia hipocentral.
- Modelo de Abrahamson (Abrahamson, Gregor, & Addo, 2016):
  Es un modelo que permite estimar PGA y aceleraciones espectrales para periodos estructurales hasta de 10 segundos. Fue desarrollado con registros de bases de datos globales, para eventos de subducción de zonas intraplaca e interplaca y es válido para distancias máximas de 300 Km.

3.1.6 Evaluación de la amenaza sísmica en el basamento recoso

Una vez conocida la tasa de actividad de cada una de las fuentes sismogénicas identificadas y las leyes de atenuación de la intensidad para cada una de ellas, la amenaza sísmica se puede calcular considerando el aporte de cada una de las fuentes sísmicas en un punto de estudio a partir de las tasas de ocurrencia de un evento y la distancia al punto de estudio. La amenaza, expresada en términos de las tasas anuales de excedencia de intensidades *a*, se calcula mediante la siguiente expresión (Ordaz M. , 2000):

$$\nu(a) = \sum_{n=1}^{N} \int_{M_0}^{M_u} \frac{-\partial\lambda}{\partial M} \Pr(A > a|M, R_i)\, dM \qquad (6)$$

Donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas *N* y *Pr(A>a|M,R)* es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo, *M*, y la distancia entre la i-ésima fuente y el sitio, *R*. Las funciones *λ(M)* son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas que se describieron anteriormente para cada fuente. La función presenta una integral que va desde M_0 hasta M_u, en donde se considera la contribución de todas las magnitudes que se pueden generar en cada fuente.

Para el cálculo de la amenaza, cada una de las fuentes sísmicas se divide en triángulos, en cuyo centro se considera localizada la sismicidad. Este proceso permite garantizar la precisión en la integración de la ecuación presentada anteriormente.
La intensidad sísmica (PGA y aceleración espectral) tiene una distribución lognormal, cuya probabilidad de excedencia se calcula mediante la siguiente expresión (Ordaz M. , 2000):

$$\Pr(A > a|M, R_o) = \phi\left(\frac{1}{\sigma_{Lna}} \ln \frac{E(A|M,R_i}{a}\right) \qquad (7)$$

Donde ϕ corresponde a la distribución normal estándar, $E(A|M,R_i)$ es el valor medio del logaritmo de la intensidad (calculado con la ley de atenuación) y σ_{Lna} es su correspondiente desviación estándar (Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009).

La amenaza sísmica se expresa entonces en términos de la tasa de excedencia de valores dados de intensidad sísmica (PGA y aceleración espectral para diferentes periodos estructurales). Para el cálculo de la amenaza sísmica se utilizó el programa CRISIS2007 desarrollado por (Ordaz, Aguilar, & Arboleda, 2007), desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este programa permite el cálculo probabilista de la amenaza sísmica considerando tasas de ocurrencia, modelos de atenuación y distribución geográfica de eventos sísmicos (Ordaz, Aguilar, & Arboleda, 2007). La ocurrencia de eventos sísmicos puede ser modelada mediante procesos de Poisson o mediante modelos del sismo característicos, mientras que la modelación de las fallas puede hacerse mediante puntos, líneas o áreas. Para el proceso de integración espacial, CRISIS2007 asume que dentro de cada fuente la sismicidad está uniformemente distribuida por unidad de área. Para el cálculo de la amenaza, cada fuente es subdividida en triángulos, cada uno de los cuales tiene una sismicidad asociada. El proceso de cálculo se realiza para cada uno de los triángulos contenidos dentro de la falla, y al final se suman los resultados para obtener el aporte total de sismicidad de dicha falla.

La evaluación probabilista de la amenaza sísmica se hizo para las ordenadas espectrales que se presentan en la Tabla 3-4. De acuerdo con esto, para la evaluación del riesgo de cada puente podrá utilizarse cualquiera de estos parámetros buscando aquellos que representen una mejor correlación con los niveles esperados de daño en los componentes principales del cada puente.

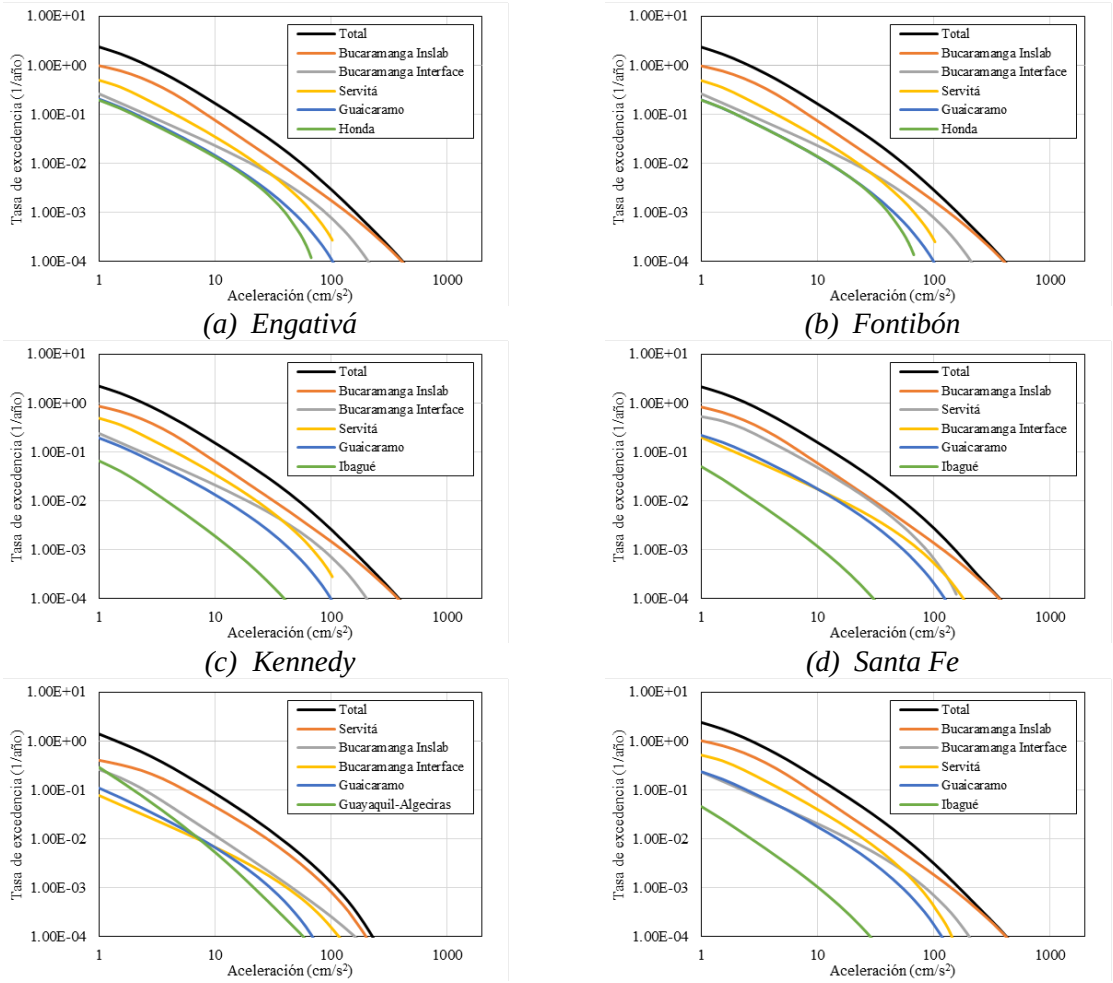
Tabla 3-4. Ordenadas espectrales consideradas en el modelo de amenaza sísmica

Ordenada	T (s)
1	0.00
2	0.10
3	0.20
4	0.30
5	0.40
6	0.50
7	1.00
8	1.50
9	2.00
10	3.00

Como resultado del análisis probabilista de amenaza sísmica a nivel de basamento rocoso se obtienen curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme para una malla de puntos en toda la ciudad. Como primer resultado básico, la Figura 3-7 presenta las curvas de amenaza asociadas a la aceleración máxima del terreno (conocida como PGA por sus siglas en inglés) para las siguientes localidades de Bogotá: Engativá, Fontibón, Kennedy, Santa Fe, Sumapaz y Usaquén.

Por otro lado, la Figura 3-8 presenta los espectros de amenaza uniforme para puntos representativos de las localidades de Bogotá, asociados a los periodos de retorno que se relacionan a continuación:

- TR 31 años: periodo de retorno del sismo de umbral de daño
- TR 225 años: periodo de retorno del sismo de seguridad limitada
- TR 475 años: periodo de retorno del sismo de diseño
- TR 1000 años: periodo de retorno del sismo de diseño de puentes
- TR 2500 años: periodo de retorno del máximo sismo considerado (ASCE 7-10)

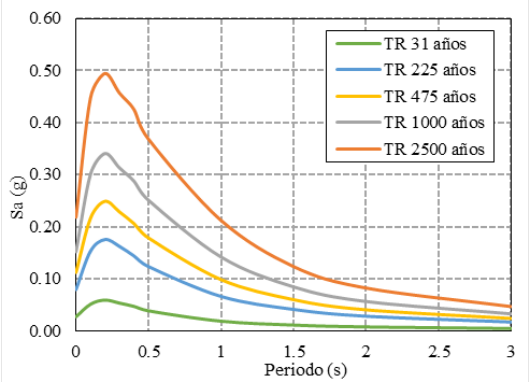


(a) Engativá *(b) Fontibón*

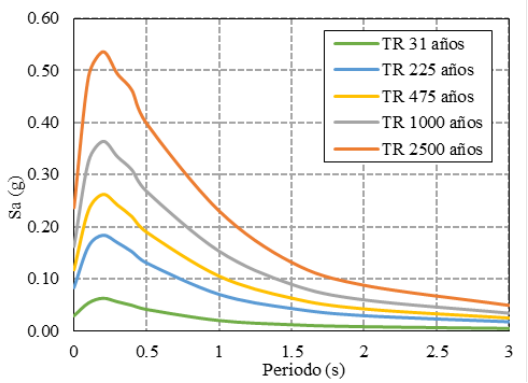
(c) Kennedy *(d) Santa Fe*

(e) Sumapaz *(f) Usaquén*

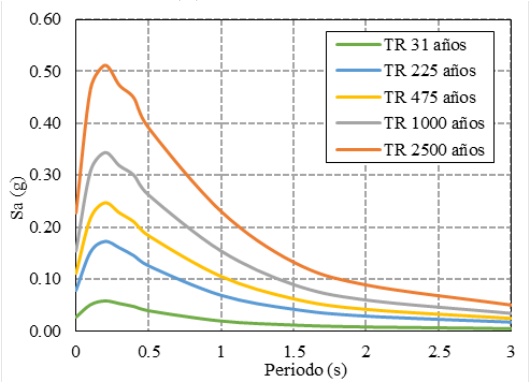
Figura 3-7. Curvas de amenaza para algunas localidades de Bogotá



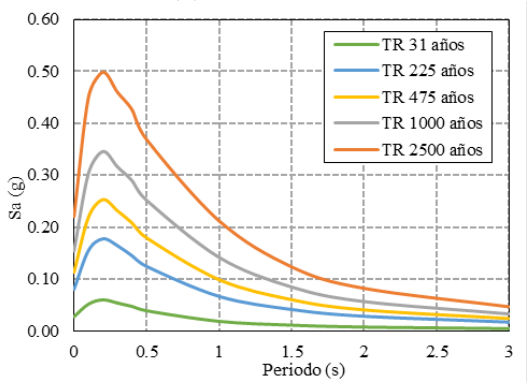
(a) Antonio Nariño



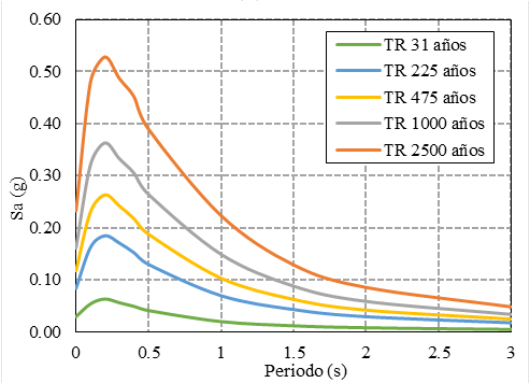
(b) Barrios Unidos



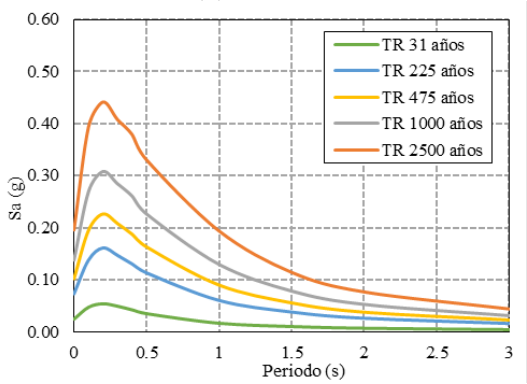
(c) Bosa



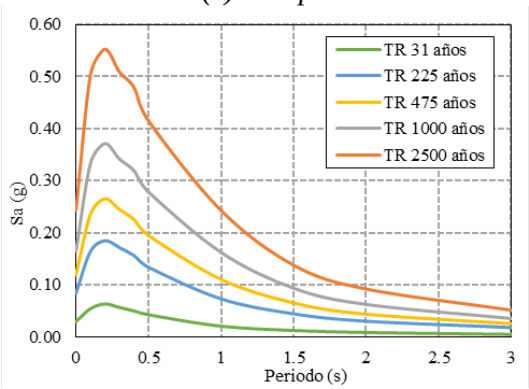
(d) Candelaria



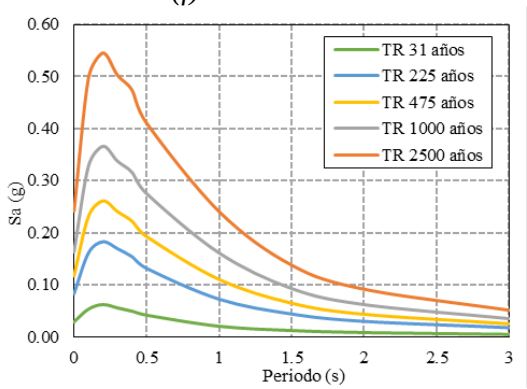
(e) Chapinero



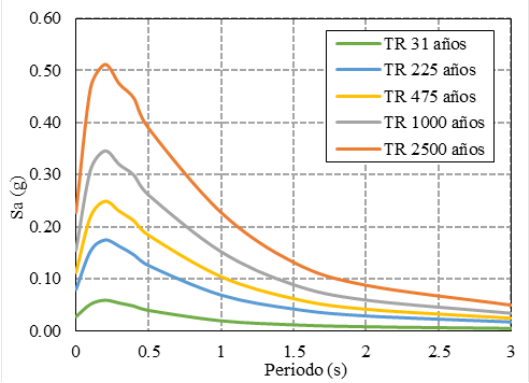
(f) Ciudad Bolívar



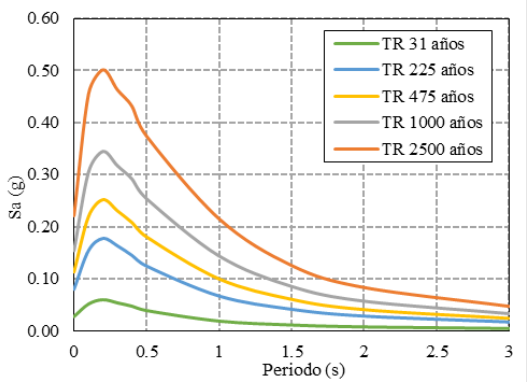
(g) Engativá



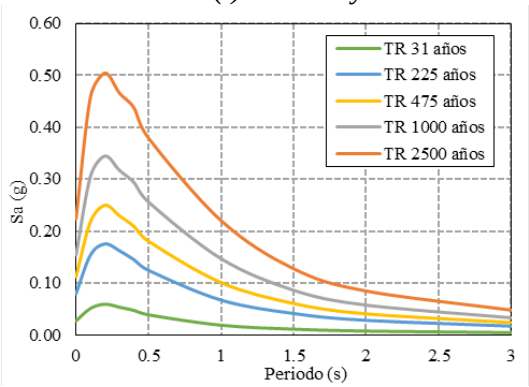
(h) Fontibón



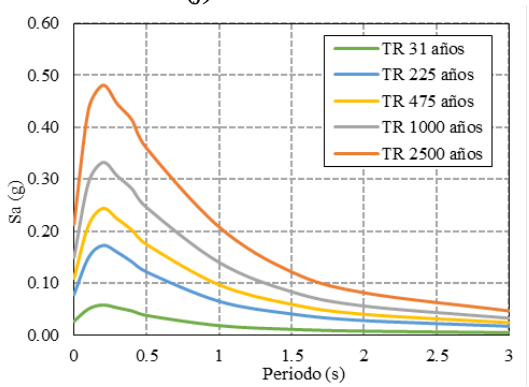
(i) Kennedy



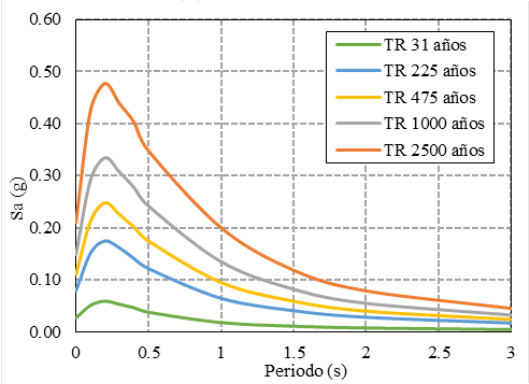
(j) Los Mártires



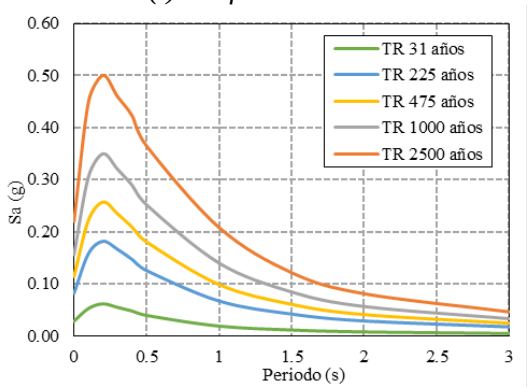
(k) Puente Aranda



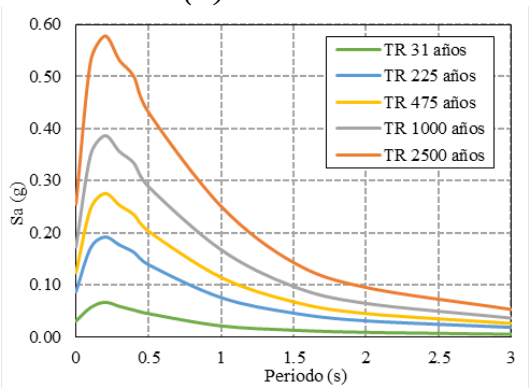
(l) Rafael Uribe Uribe



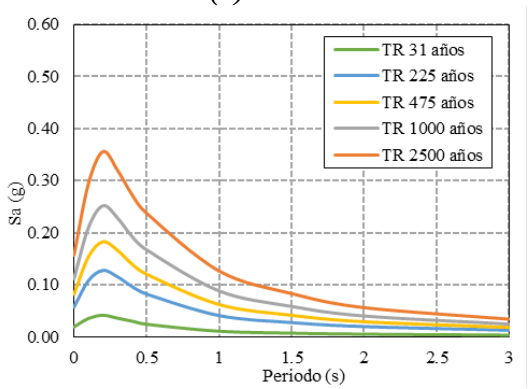
(m) San Cristóbal



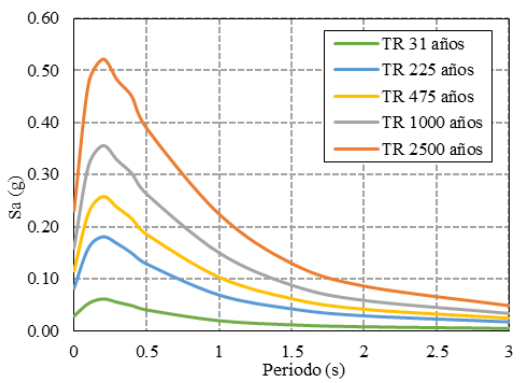
(n) Santa Fe



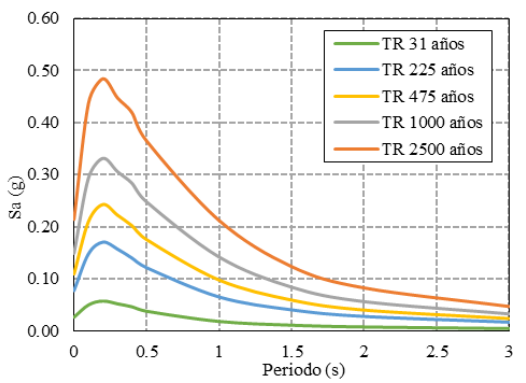
(o) Suba



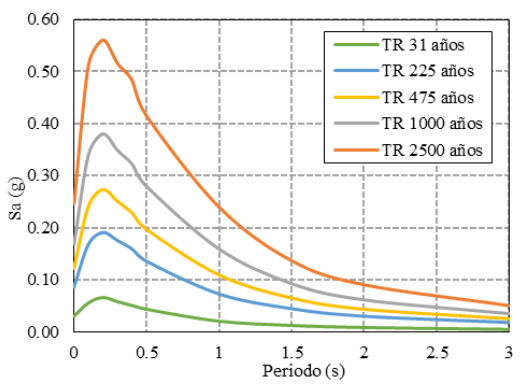
(p) Sumapaz



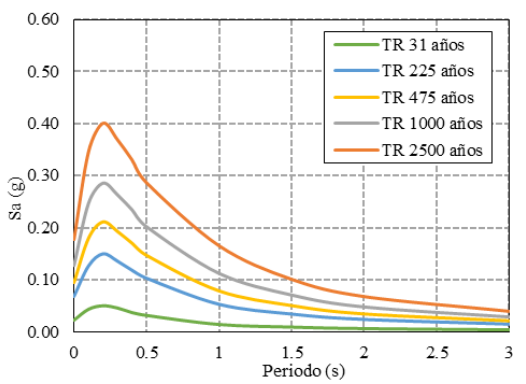
(q) Teusaquillo



(r) Tunjuelito



(s) Usaquén



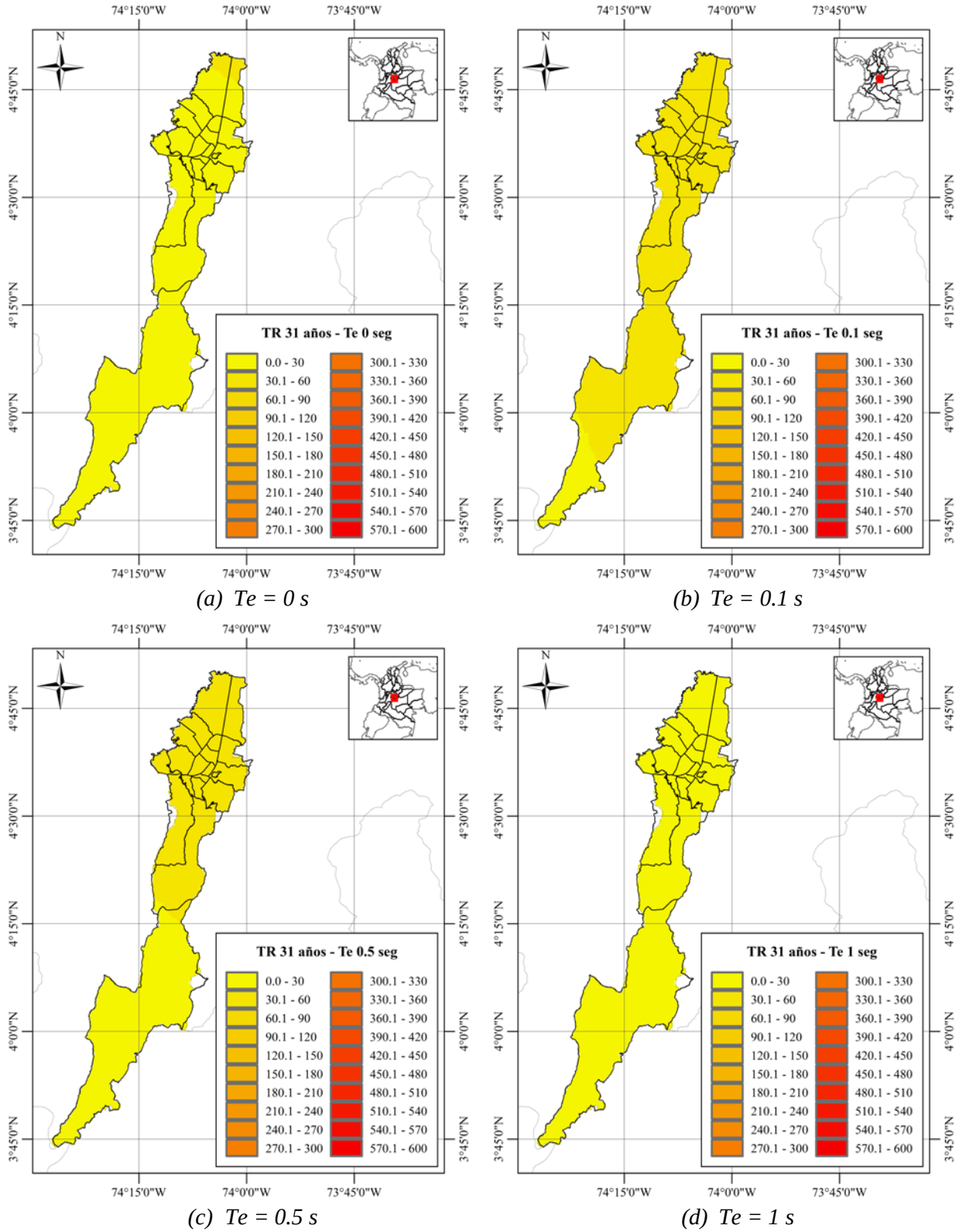
(t) Usme

Figura 3-8. Espectros de amenaza uniforme para algunas localidades de Bogotá

De los espectros de amenaza obtenidos se observa que las localidades con mayor amenaza sísmica corresponden a las ubicadas en la parte nor-occidental de la ciudad, es decir, Barrios Unidos, Engativá, Fontibón y Suba. Así mismo, se encuentra que las localidades con menor amenaza sísmica corresponden a Sumapaz y Usme. Estos resultados se deben a que la amenaza sísmica de la ciudad está controlada por la zona de subducción profunda que domina la amenaza sísmica en la parte norte de la ciudad, la cual se va atenuando hacia el sur.

De igual manera la Figura 3-9 a la Figura 3-13 presentan la distribución geográfica de PGA y aceleración espectral para periodos de 0.1, 0.5 y 1 segundos asociados a periodos de retorno de 31, 224, 475, 1000 y 2500 años. Todos los resultados presentados corresponden a la respuesta esperada en formaciones geológicas competentes (basamento rocoso), con velocidades de onda de corte del orden de 760 m/s (suelo tipo B).

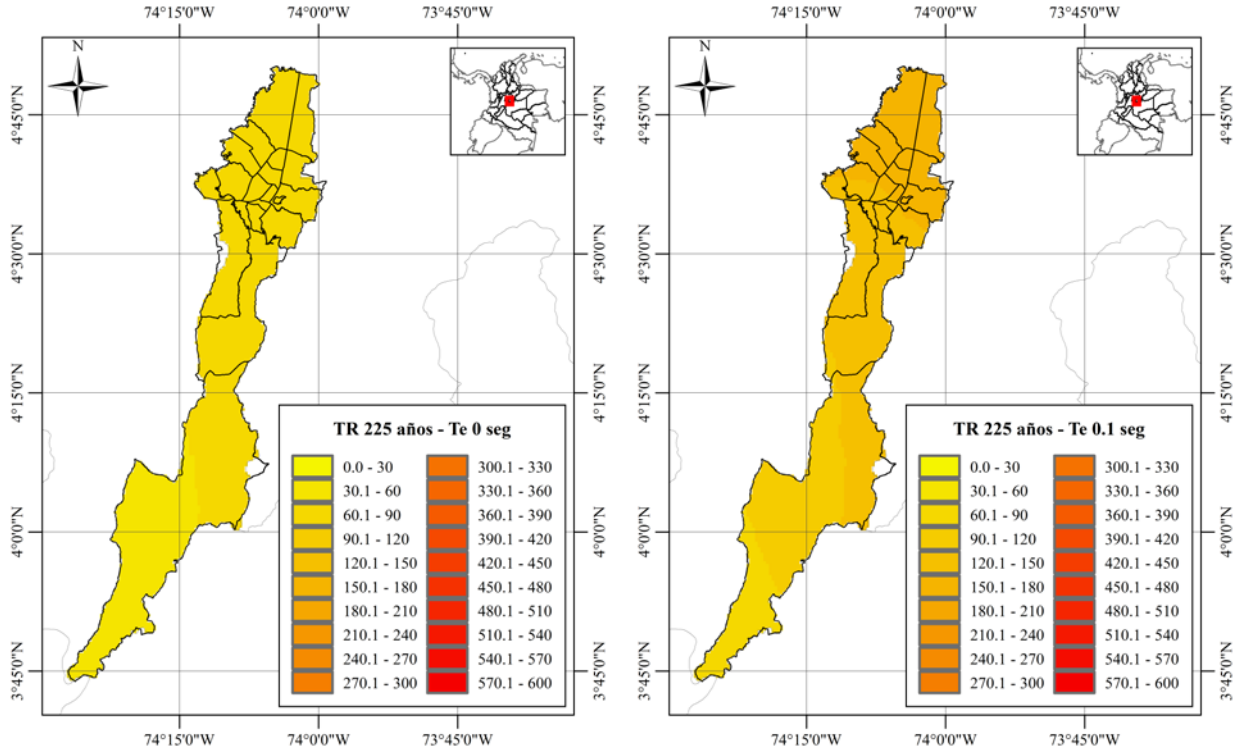
Como se mencionó anteriormente, la distribución de la aceleración (tanto PGA como aceleración espectral) indica que la mayor amenaza sísmica se encuentra al norte de la ciudad, debido a la influencia de la zona de subducción profunda. Se observa que la amenaza sísmica disminuye hacia el sur, a medida que se tiene mayor distancia de estas fallas sísmicas. Esta distribución de aceleraciones se observa para los diferentes periodos de retorno considerados.



(a) Te = 0 s *(b) Te = 0.1 s*

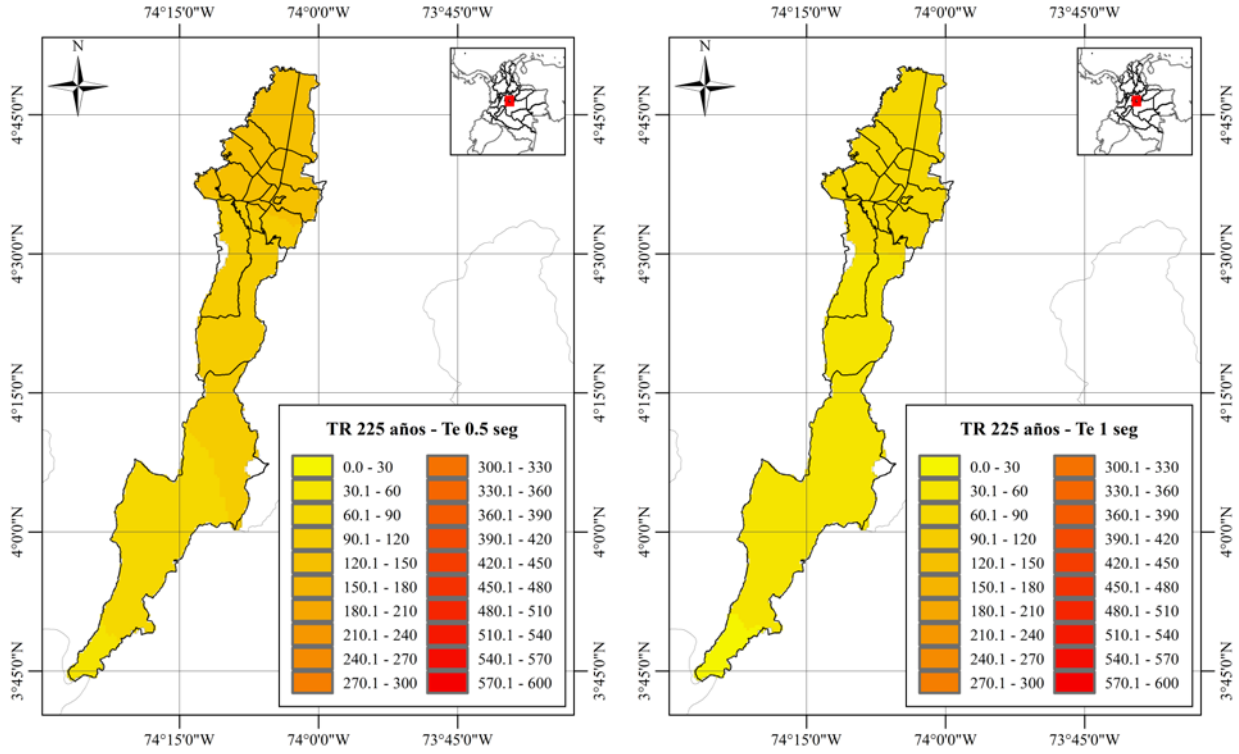
(c) Te = 0.5 s *(d) Te = 1 s*

Figura 3-9. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 31 años



(a) Te = 0 s

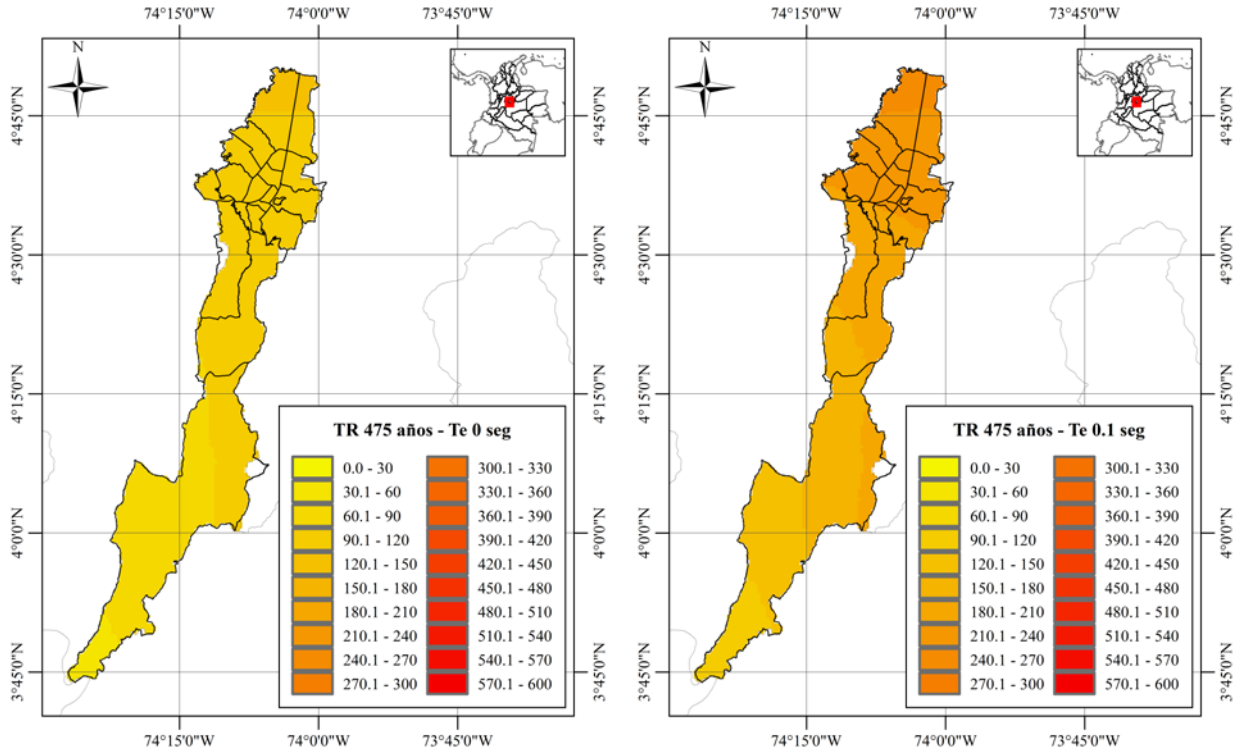
(b) Te = 0.1 s



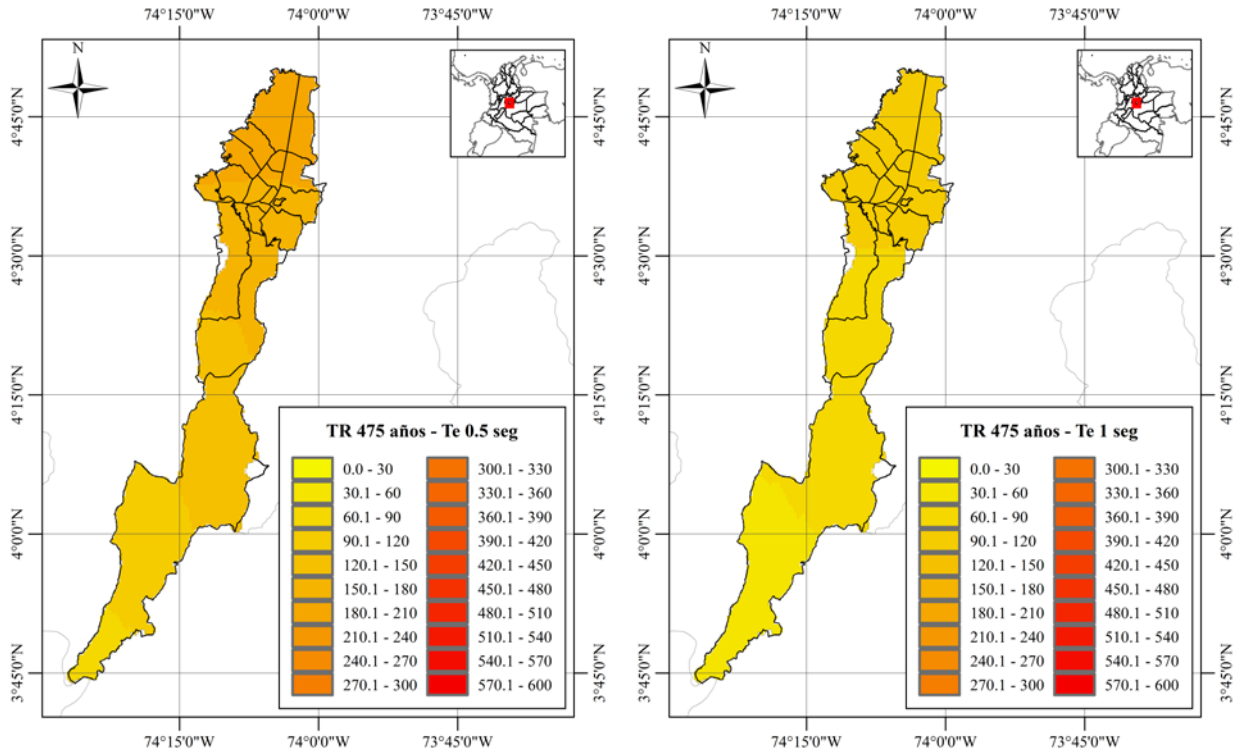
(c) Te = 0.5 s

(d) Te = 1 s

Figura 3-10. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 225 años

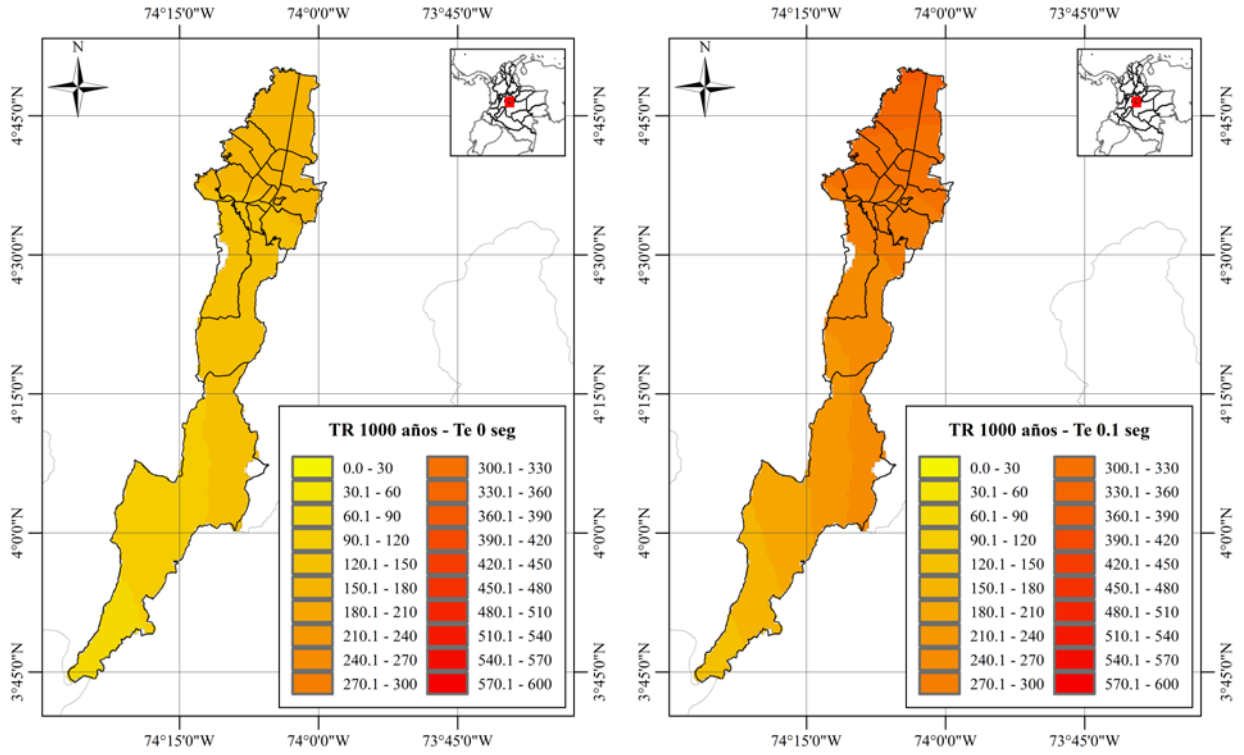


(a) Te = 0 s *(b) Te = 0.1 s*

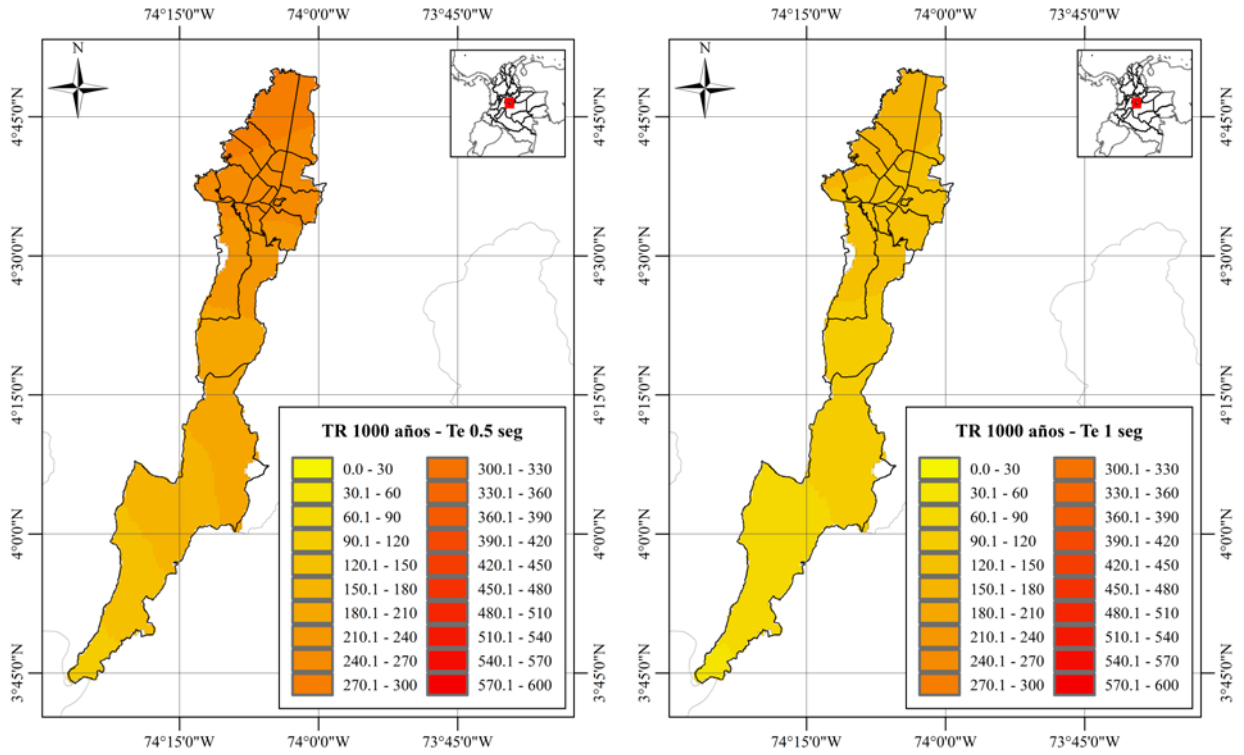


(c) Te = 0.5 s *(d) Te = 1 s*

Figura 3-11. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 475 años

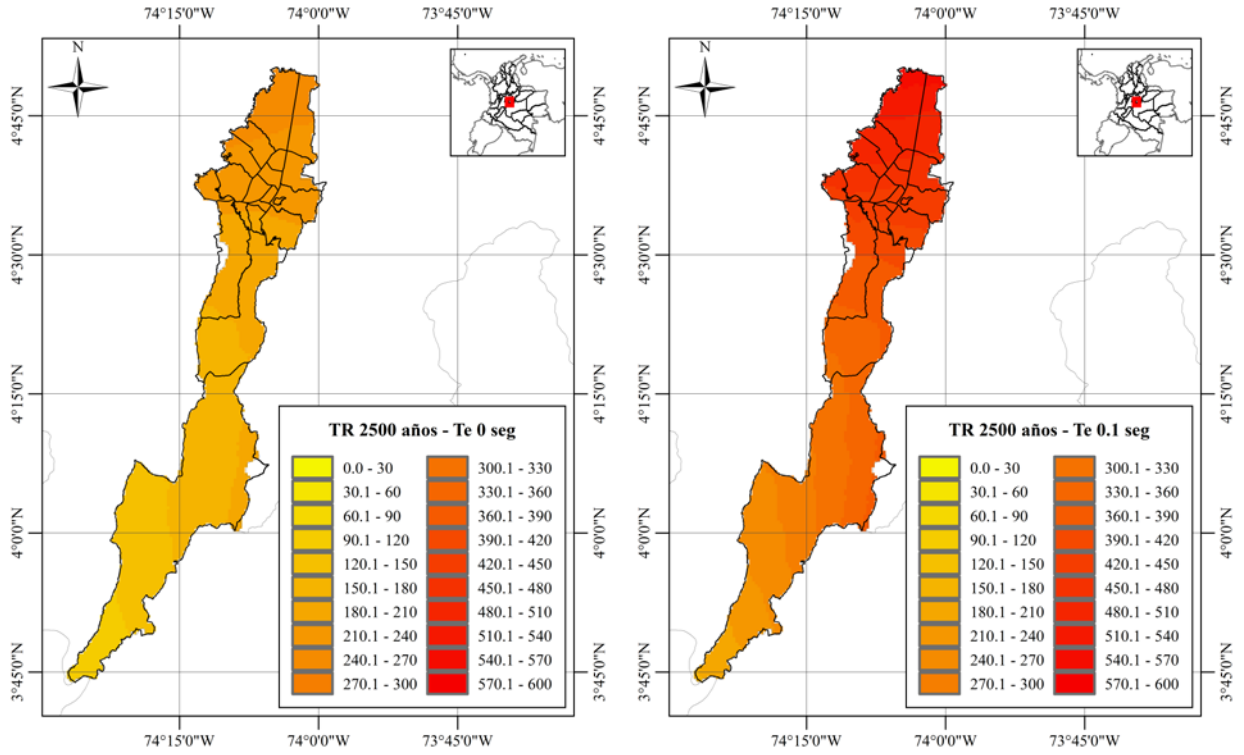


(a) Te = 0 s *(b) Te = 0.1 s*

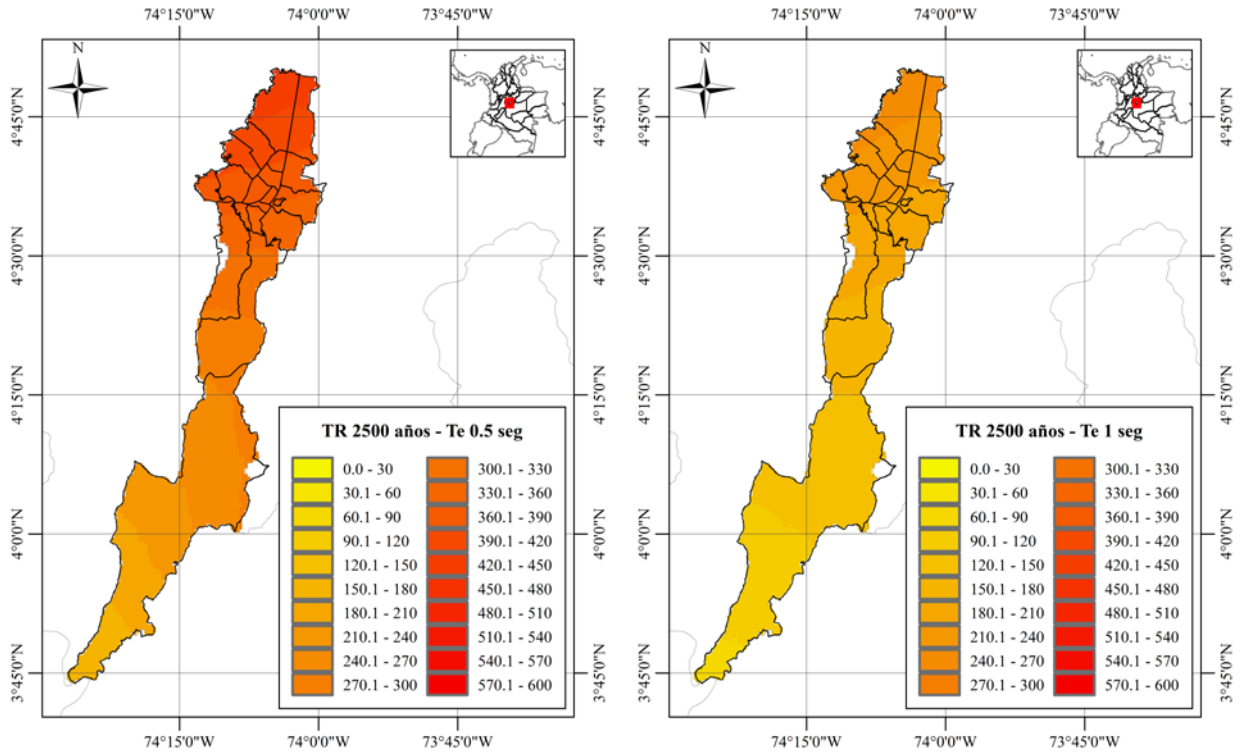


(c) Te = 0.5 s *(d) Te = 1 s*

Figura 3-12. Distribución de la aceleración espectral en roca (cm/s^2) para TR = 1000 años



(a) Te = 0 s *(b) Te = 0.1 s*



(c) Te = 0.5 s *(d) Te = 1 s*

Figura 3-13. Distribución de la aceleración espectral roca (cm/s^2) para TR = 2500 años

3.2 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO Y EFECTOS DE SITIO

3.2.1 Metodología

La respuesta dinámica del suelo se calcula mediante modelos unidimensionales de perfiles de suelo, en los cuales se busca establecer los efectos de posibles amplificaciones o de-amplificaciones que produce un determinado depósito de suelo (usualmente relativamente "blando") sobre la intensidad sísmica de una señal de entrada. Estos análisis requieren de una caracterización rigurosa de las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona de estudio, así como de un conocimiento de la sismicidad esperada en dicha zona. Sin embargo, la información disponible no siempre tiene la calidad necesaria o está incompleta, lo cual genera una alta incertidumbre en las diferentes etapas del análisis. Estas incertidumbres deben ser consideradas para obtener resultados adecuados.

A continuación se presenta la metodología propuesta para determinar los efectos que la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad tienen sobre la amenaza sísmica determinada a nivel del basamento rocoso según los numerales anteriores (Yamin, y otros, 2018). Las principales actividades de este proceso son las siguientes:

1. Recopilación de la información disponible que permita definir las zonas geológicas principales y las características geotécnicas principales de la zona de estudio.

2. Caracterización geotécnica de las diferentes zonas geológicas a partir de las perforaciones recopiladas. Se debe hacer un análisis estadístico con el fin de establecer un valor medio y desviación estándar en profundidad para los diferentes parámetros geotécnicos (Velocidad de onda cortante, índice de plasticidad, peso unitario húmedo, etc.)

3. Selección de señales sísmicas que representen las condiciones sismogénicas de la zona de estudio (cortical o de subducción), así como diferentes niveles de intensidad, PGA ("Peak Ground Acceleration"), que permitan contemplar la no linealidad de los suelos en la respuesta dinámica de los suelos.

4. Generación de perfiles estocásticos mediante simulaciones de Monte Carlo a partir de la caracterización estadística de los parámetros geotécnicos de una zona de análisis. Cada parámetro debe tener una función de probabilidad característica de su comportamiento y de los datos disponibles. En términos generales se proponen las siguientes funciones de probabilidad para cada parámetro importante:

    - Velocidad de onda cortante: distribución de probabilidad Lognormal
    - Peso húmedo unitario: distribución de probabilidad Normal
    - Índice de plasticidad: distribución de probabilidad Normal
    - Espesor de las formaciones de suelo: distribución de probabilidad Uniforme
    - Modelos de comportamiento dinámico: distribución de probabilidad Normal

5. Análisis no lineal equivalente para cada uno de los perfiles generados, y cálculo de los factores de amplificación para cada simulación. Para el análisis no lineal de la respuesta dinámica se utiliza el software SHAKE91 (Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972)(Idriss & Seed, 1991).

6. Agrupación de los resultados obtenidos según el periodo fundamental de vibración (Ts) de los perfiles estocásticos generados, en rangos de 0,2 segundos (para posterior asignación geográfica según el período de vibración del depósito de suelo).

7. Generación de una base de datos de factores de amplificación que dependen del periodo de suelo y de la intensidad sísmica de entrada para cada una de las zonas geológicas definidas

En la Figura 3-14 se presenta un esquema que resume la metodología utilizada la cual está basada en trabajos recientes de investigación (Yamin, y otros, 2018), (Universidad de los andes, 2016), (Prada, Yamin, Rueda, & Rincon, 2017).

(Espacio en blanco intencional)

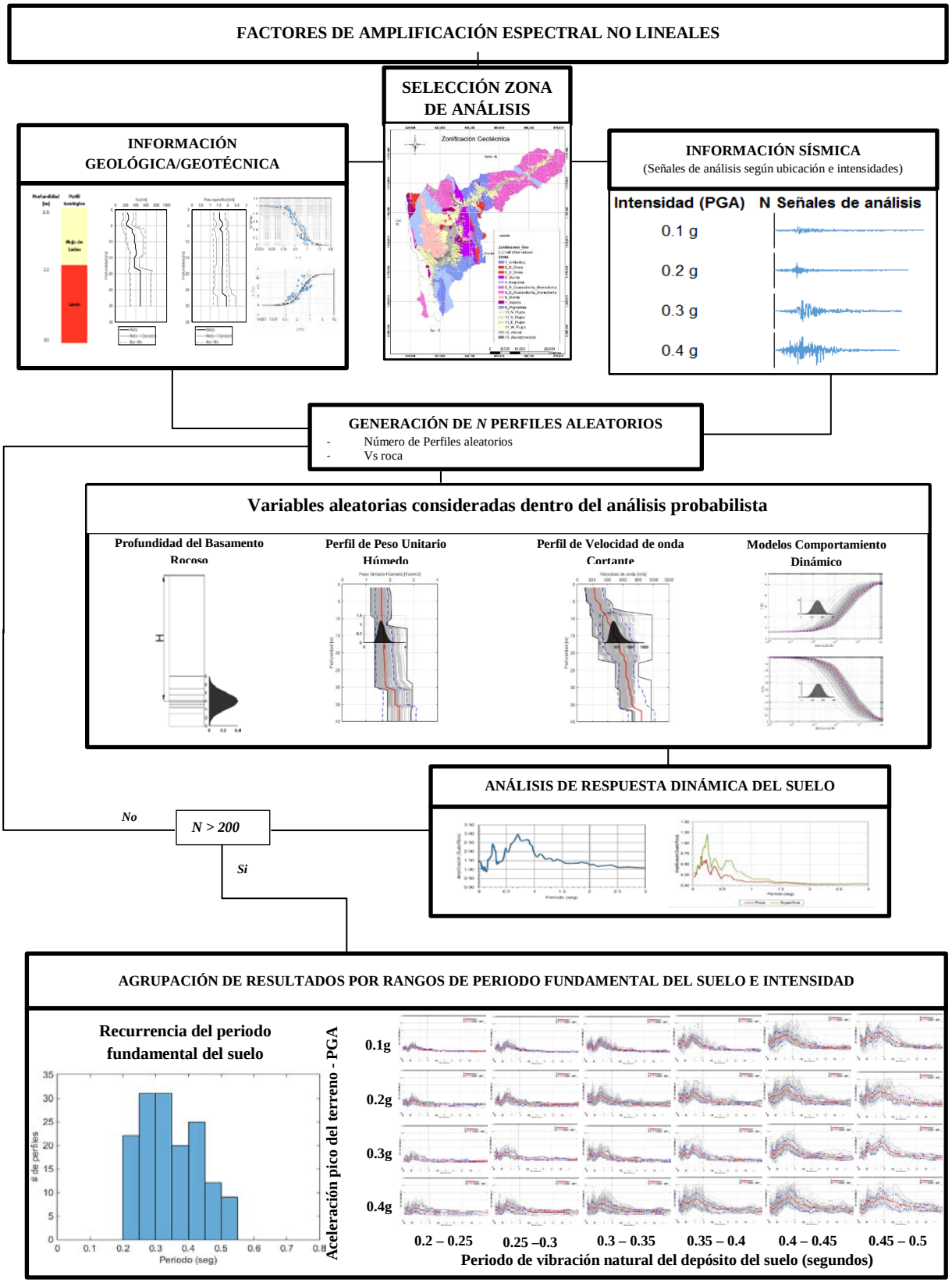


Figura 3-14. Metodología para la obtención de los factores de amplificación para cada zona de análisis

3.2.2 Caracterización geológica y geotécnica

La caracterización geológica y geotécnica de la zona de estudio, requiere de información con un mínimo grado de completitud con el fin de determinar las variaciones con la profundidad de las propiedades geotécnicas estáticas y dinámicas de los depósitos de suelo. Se requiere por lo tanto contar con información correspondiente a una zonificación geológica que establezca espacialmente la ubicación y distribución de las formaciones geológicas, incluyendo sus características principales, su origen, y una descripción general de sus propiedades mecánicas. Adicionalmente es importante contar con la mayor cantidad de información geotécnica posible, la cual generalmente se obtiene de perforaciones realizadas en estudios geotécnicos particulares, de proyectos públicos de infraestructura, o de estudios de microzonificación sísmica. La información mínima requerida que debe contener cada perfil típico de suelo para que sean útiles dentro de la metodología propuesta es la siguiente:

a) Perfil de velocidad de onda cortante (Vs), hasta una profundidad mínima de 30 metros o hasta que se encuentre el basamento rocoso (Vs > 760 m/s).
b) Caracterización geotécnica de los parámetros estáticos en profundidad incluyendo densidades húmedas, índices de clasificación del suelo (Limites de Atterberg) y demás parámetros o medidas de resistencia al corte y compresibilidad del suelo (SPT, CPT, compresión inconfinada, relación de vacíos, ángulo de fricción, etc.).
c) Descripción y estratigrafía continúa en profundidad de los diferentes estratos que componen el suelo.
d) Caracterización geotécnica dinámica de los depósitos de suelo incluyendo ensayos triaxiales, ensayos de columna resonante, corte directo, “Bender Element”, y cualquier otro ensayo que permita medir la rigidez a cortante y el amortiguamiento asociado a deformaciones a cortante.

Para este estudio, se recopiló información correspondiente a estudios previos de microzonificación sísmica realizados en Bogotá. Dentro de estos destacan el estudio de innovación e investigación tendientes a la actualización de la información sísmica de la ciudad de Bogotá (Universidad de los Andes, 2006) y el estudio de zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones (FOPAE, 2010). Dichos estudios presentan una zonificación geológica de la ciudad a partir de los orígenes de las diferentes formaciones geológicas y de las características principales de dichas formaciones. Adicionalmente se tienen 122 perforaciones geotécnicas recopiladas de diferentes fuentes. Esta información se utiliza de base para el análisis. Los resultados de los análisis de esta información y su procesamiento con las metodologías descritas se presentan en los siguientes numerales.

3.2.3 Definición de zonas geológicas

3.2.3.1 Zona urbana de Bogotá D.C.

En el estudio realizado por la Universidad de los Andes (2006) se definieron 38 zonas de respuesta sísmica teniendo en cuenta las características geológicas y geotécnicas, presentes en los depósitos de suelo de la ciudad. Por lo tanto, se espera que en cada una de estas zonas las propiedades geotécnicas y el origen geológico de los suelos sean similares.

Para su definición se tuvo en cuenta que en la ciudad hay depósitos de suelo de origen aluvial y lacustre (mayoritariamente) de diferente espesor, como se evidencia en la microzonificación sísmica de Bogotá D.C (FOPAE,2010). Por esta razón cada una de estas zonas contempla estas dos variables para su delimitación, además de estar relacionada directamente con las perforaciones geotécnicas disponibles. En la Figura 3-15 se presenta un mapa con las zonas geológico/geotécnicas definidas para la zona urbana de Bogotá D.C.

3.2.3.2 Zona rural de Bogotá D.C. utilizando metodología Vs_{30}

Considerando que para las zonas no incluidas en el perímetro urbano de la ciudad no existe información con el mismo nivel de calidad y precisión y con el fin de completar la información requerida para toda la zona de estudio, se procedió a realizar la clasificación de los suelos en dichas zonas a partir de una metodología simplificada. Para representar los efectos de amplificación en esta zona se utilizó la metodología aproximada de clasificación del suelo Vs_{30} (Allen & Wald, 2009; Wald & Allen, 2007), la cual propone la obtención de la velocidad de onda cortante promedio en los primeros 30 metros (Vs_{30}) a través de una relación directa con la pendiente del terreno. Esto se argumenta en el hecho de que una pendiente alta (zona montañosa) se puede asociar a depósitos de suelo rocosos más rígidos, mientras que en zonas de pendiente baja (valles o llanuras) se presentan suelos blandos arcillosos o arenosos. Esta metodología permite clasificar geotécnicamente los suelos a partir de la pendiente del terreno cuando no se cuenta con información geológica o geotécnica detallada. En la Tabla 3-5 se muestran la clasificación de Vs_{30} según los rangos de pendientes del terreno.

Tabla 3-5. Rangos de pendientes para clasificación de suelos

Clasificación Vs_{30}	Clasificación NSR-10	Rango de Vs_{30} (m/s)	Rango de Pendientes (m/m)
1	B	>760	> 0.14
2	C	620-760	0.10 - 0.14
3		490-620	0.05 - 0.10
4		360-490	0.018 - 0.05
5	D	300-360	0.010 - 0.018
6		240-300	3.5E-3 - 0.010
7		180-240	3E-4 - 3.5E-3
8	E	<180	< 3E-4

Nota: basada en (Allen & Wald, 2009; Wald & Allen, 2007).

La clasificación de los suelos por medio del Vs_{30} es un indicador de la rigidez del suelo, por ende las zonas en donde el Vs_{30} es mayor están asociadas a zonas montañosas, caso contario a cuando el Vs_{30} es bajo. Estas se pueden relacionar con los tipos de suelo identificados en la NSR-10, las cuales dependen de este parámetro para determinar la competencia y rigidez del suelo. Por esta razón, se consideró que el modelo simplificado es consistente y adecuado en la definición de los tipos de suelo en zonas donde no hay información de Detalle.

El procedimiento utilizado para aplicar esta metodología para la ciudad de Bogotá D.C. fue el siguiente:

- Se recopiló un modelo de elevación digital para la ciudad (DEM por sus siglas en inglés)
- Se calculó y realizó un modelo de pendientes para la zona de estudio
- Se asignó un valor de Vs_{30} a partir de los rangos de pendientes obtenidos
- Se clasificó el tipo de suelo para la zona de estudio, con base al Vs_{30}

En la Figura 3-16 se puede ver la distribución de tipos de suelo en Bogotá D.C. utilizando la metodología simplificada propuesta. En esta se observa que las zonas montañosas de la ciudad (cerros orientales, de suba, y cerros de Sumapaz y Ciudad Bolívar) son caracterizadas adecuadamente mediante este modelo

3.2.3.3 Zonas geológico/geotécnicas para la totalidad de la ciudad.

Con base en la información disponible y a los modelos generados se establecieron las zonas geológico/geotécnicas para Bogotá D.C, incluyendo la zona urbana y rural de la ciudad. Para su definición se consideró la mejor información de detalle disponible, lo que significa que, aunque el modelo simplificado Vs_{30} fue calculado para toda la extensión de la ciudad, este solo se utilizó para clasificar los tipos de suelo de la zona rural de la ciudad. En la Figura 3-17 se presentan las zonas geotécnicas definitivas para Bogotá D.C. mediante un número consecutivo integrando las dos fuentes de información.

En la Figura 3-17 se evidencia que para las zonas planas de la ciudad (centro, norte, occidente) hay una discretización mayor de las zonas debido a la complejidad geológica de la zona dado el origen de los suelos (aluviales, lacustres) y el espesor de los mismos. Caso contrario ocurre en las zonas montañosas de la ciudad (cerros orientales, cerros de suba, cerros de Sumapaz) donde sus condiciones geológicas y geotécnicas son similares a lo largo de la ciudad, lo cual se refleja en un número reducido de zonas que caracterizan su comportamiento. Adicionalmente puede observarse que la zona urbana y la zona rural tienen diferentes resoluciones de análisis. Sin embargo, el análisis espacial es consistente en términos de los parámetros principales que definen la respuesta dinámica. Las limitaciones en el nivel de resolución final dependen de la información disponible y no es posible en el momento mejorar dicha resolución.

(Espacio en blanco intencional)

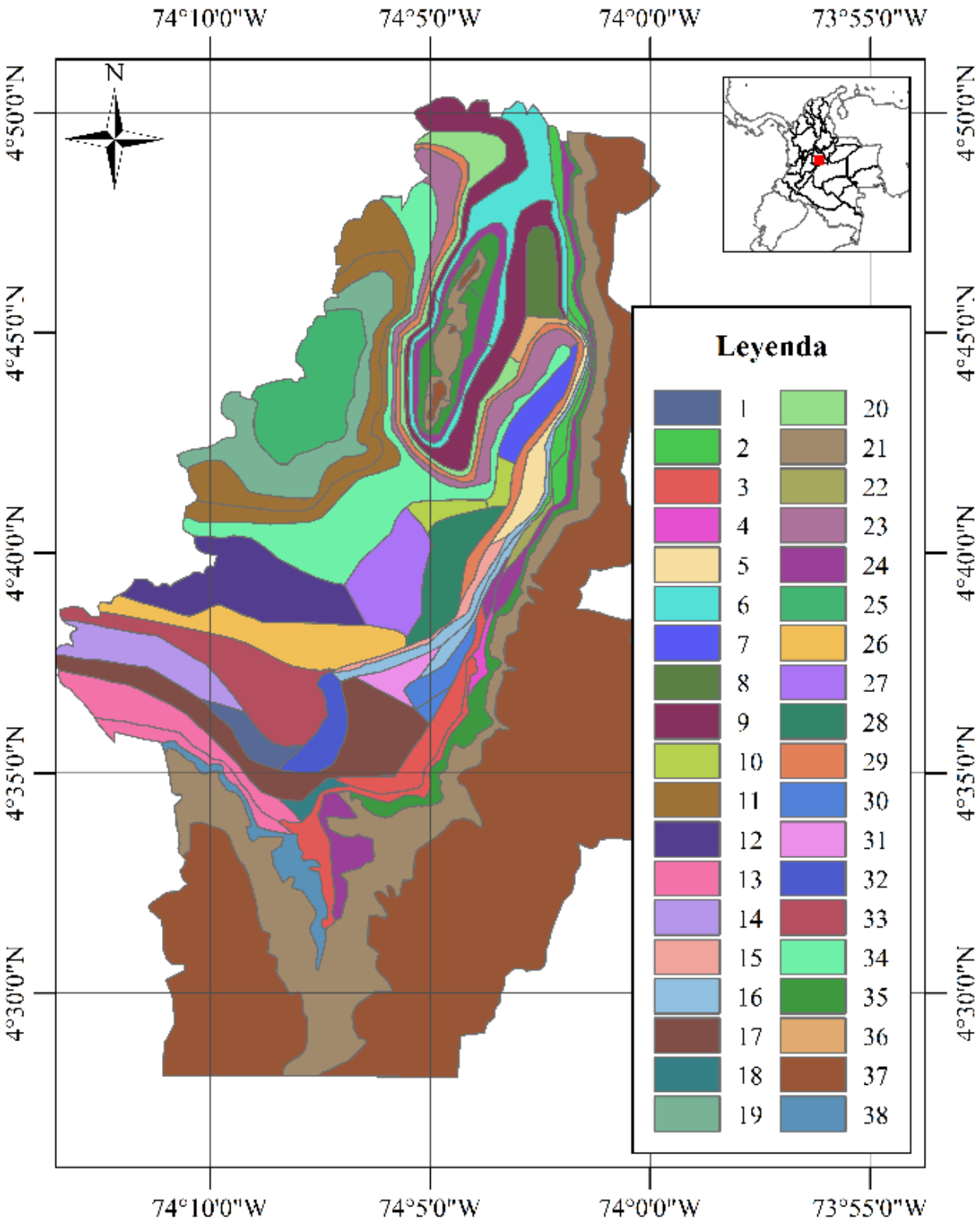


Figura 3-15. Zonas geológico/geotécnicas de respuesta sísmica para la zona urbana de Bogotá D.C.

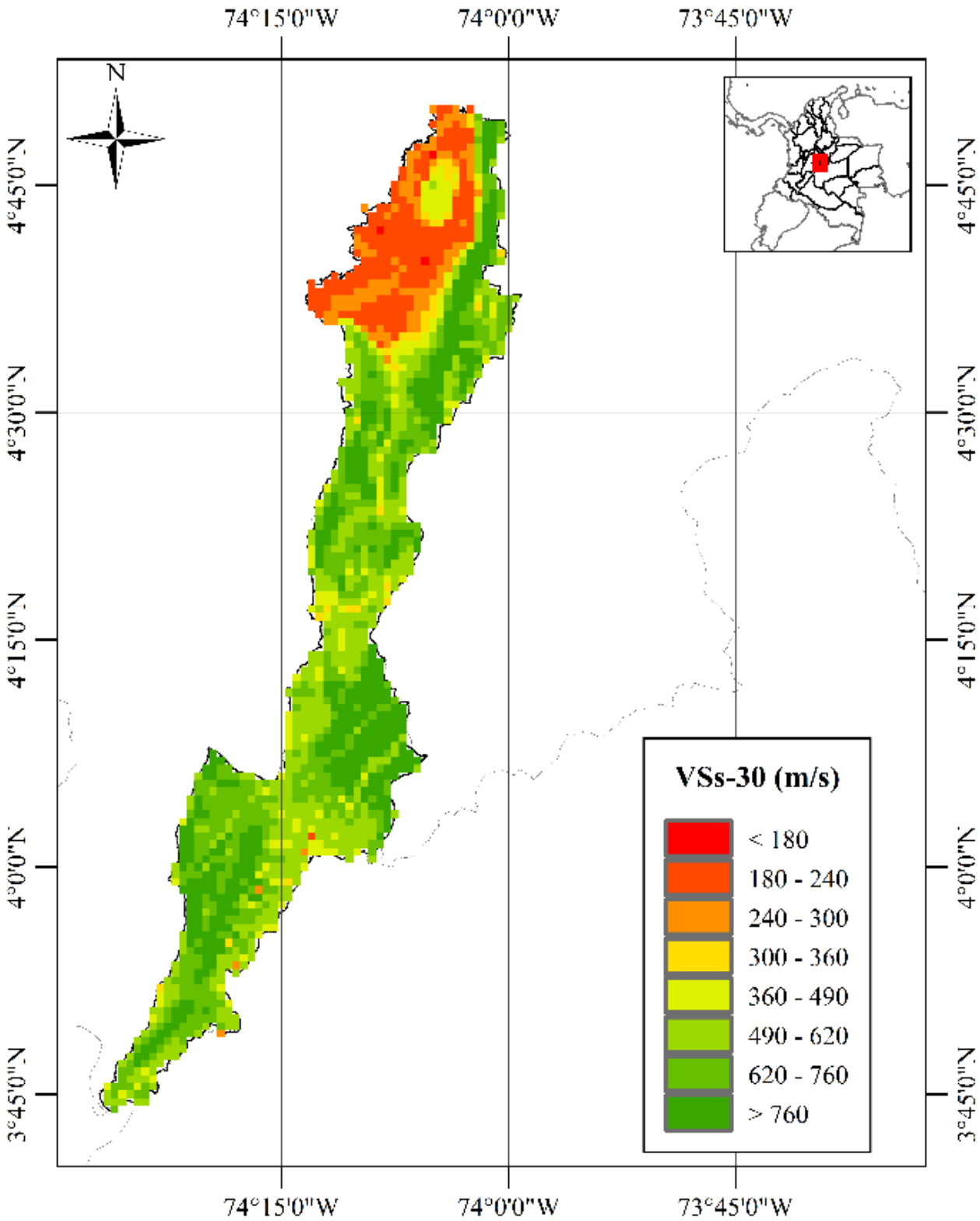


Figura 3-16. Modelo de Vs-30 para la ciudad de Bogotá D.C.

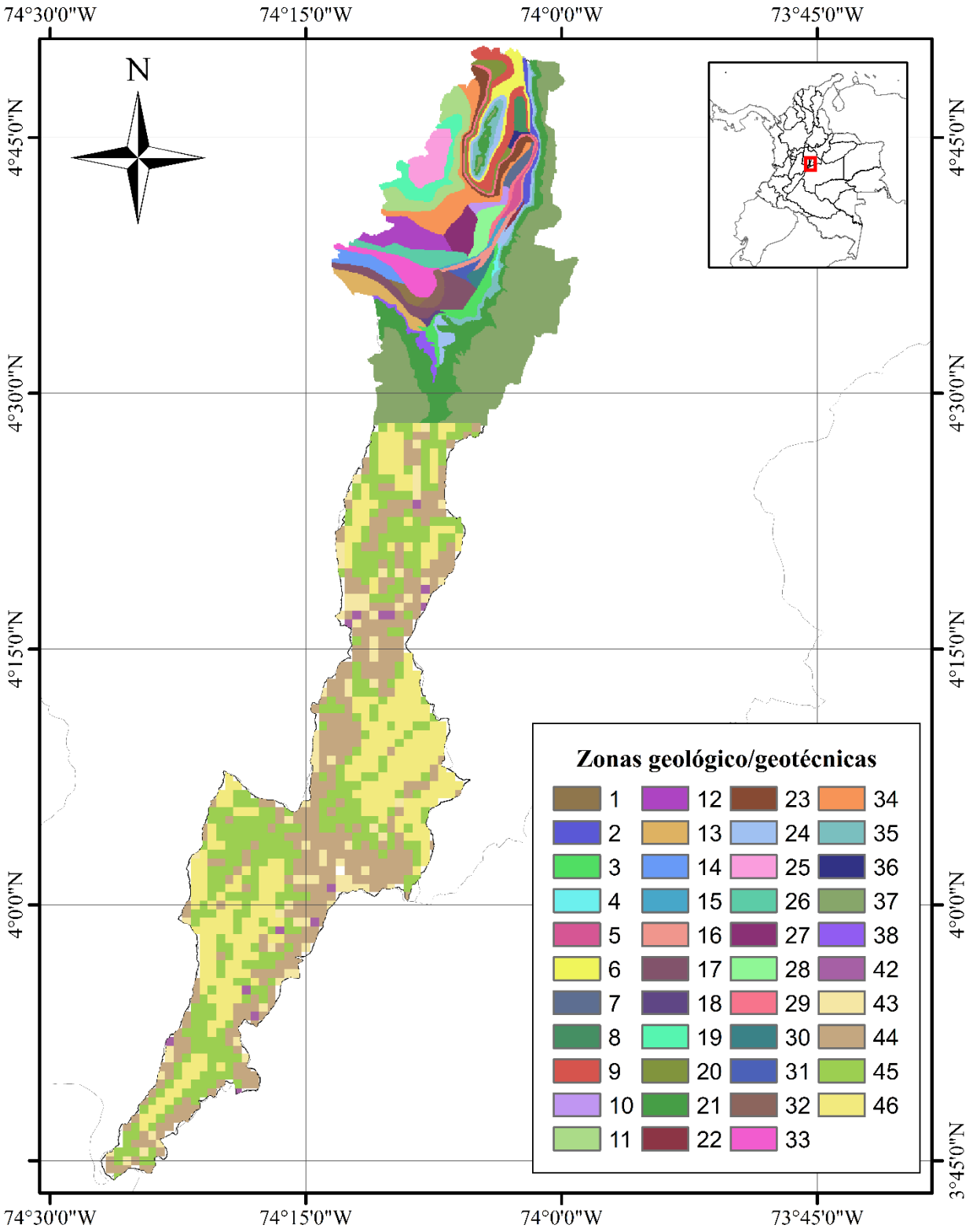


Figura 3-17. Zonas geológico/geotécnicas definitivas para Bogotá D.C.

3.2.4 Caracterización de parámetros geotécnicos

Se recopilaron un total de 122 perforaciones con información geotécnica suficiente para llevar a cabo los análisis de respuesta dinámica. De estas, 104 perforaciones se obtuvieron del estudio de la Universidad de los Andes (2006). Por otro lado, se cuenta con 18 perforaciones pertenecientes y vinculadas a las estaciones de la red de acelerógrafos de la ciudad de Bogotá (RAB). Estos perfiles contienen una caracterización geotécnica completa, incluyendo velocidad de onda cortante, peso húmedo unitario, límites de Atterberg, etc. En la Figura 3-18(a) se muestra la ubicación de las perforaciones recopiladas.

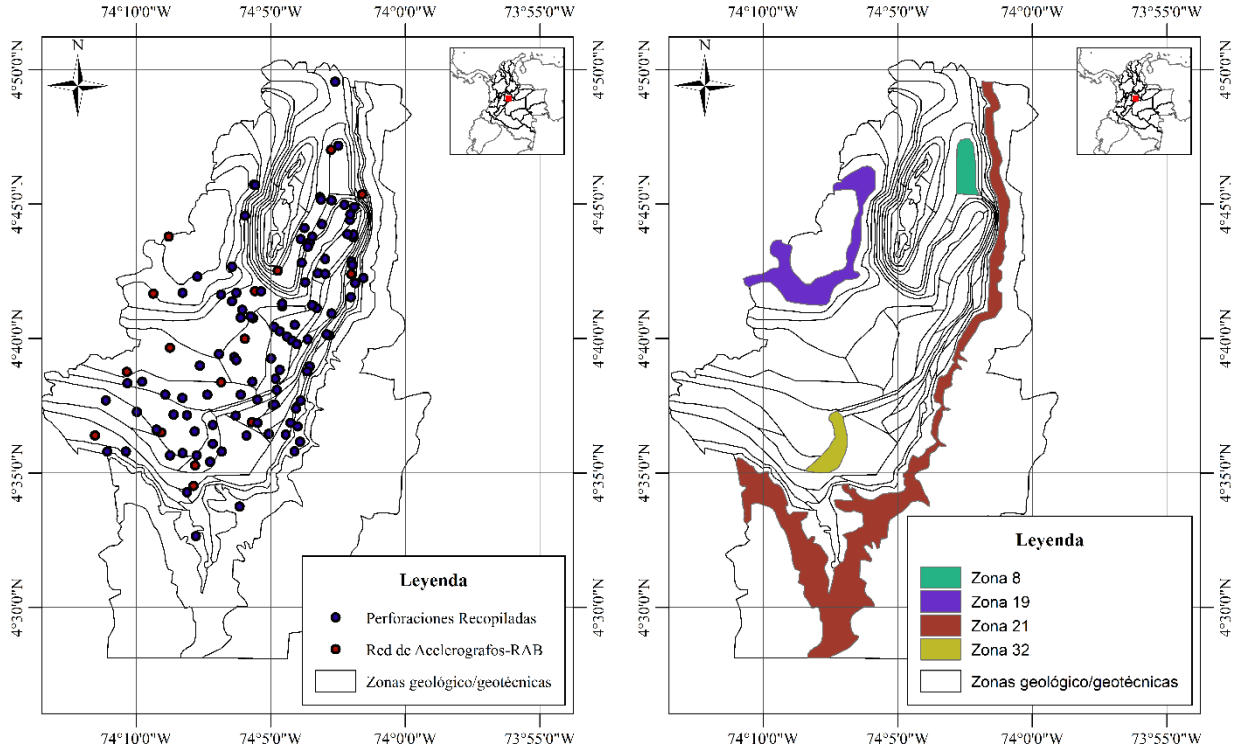


Figura 3-18. (a) Perforaciones geotécnicas recopiladas; (b) Zonas representativas de la ciudad

Con base en esta información de perforaciones se procedió a caracterizar cada una de las zonas definidas previamente, mediante un análisis estadístico de las propiedades geotécnicas estableciendo valores medios y desviaciones estándar en profundidad de acuerdo a las perforaciones asignadas a cada zona. El número de perforaciones asignadas para cada zona se presenta en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Número de perforaciones en zonas geotécnicas

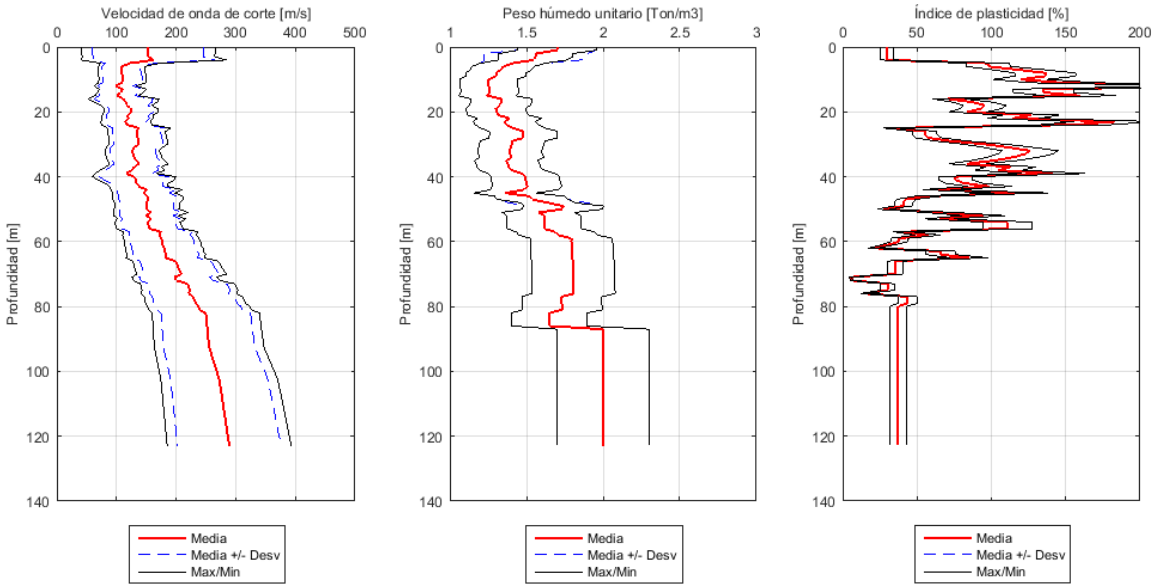
Zona Geotécnica	Número Perforaciones	Zona Geotécnica	Número Perforaciones	Zona Geotécnica	Número Perforaciones
1	2	15	1	29	4
2	1	16	3	30	3
3	2	17	3	31	3
4	1	18	2	32	4
5	3	19	3	33	7
6	1	20	1	34	10
7	4	21	4	35	6
8	2	22	1	36	1
9	3	23	7	37	0
10	3	24	5	38	2
11	2	25	1		
12	2	26	7		
13	2	27	7		
14	2	28	7		

En la Tabla 3-6. Se puede apreciar como para algunas zonas el número de perforaciones disponibles para la caracterización dinámica no es significativa para el análisis estadístico (menos de 3 perforaciones), Por lo tanto, se realizó un ajuste para poder caracterizar la variabilidad del suelo en estas zonas basado en recomendaciones y estudios de diferentes autores (Hashash, 2011) (Moss, 2008) (Rathje, Pehlivan, Gilbert, & Rodriguez-Marek, 2015). Esta se puede contemplar mediante el coeficiente de variación, el cual indica la relación que hay entre la desviación y la media de cada parámetro geotécnico caracterizado. El coeficiente de variación mínimo definido para este estudio es el siguiente:

$$CV = \frac{Desvación, \sigma}{Media, \mu} = 15\%$$

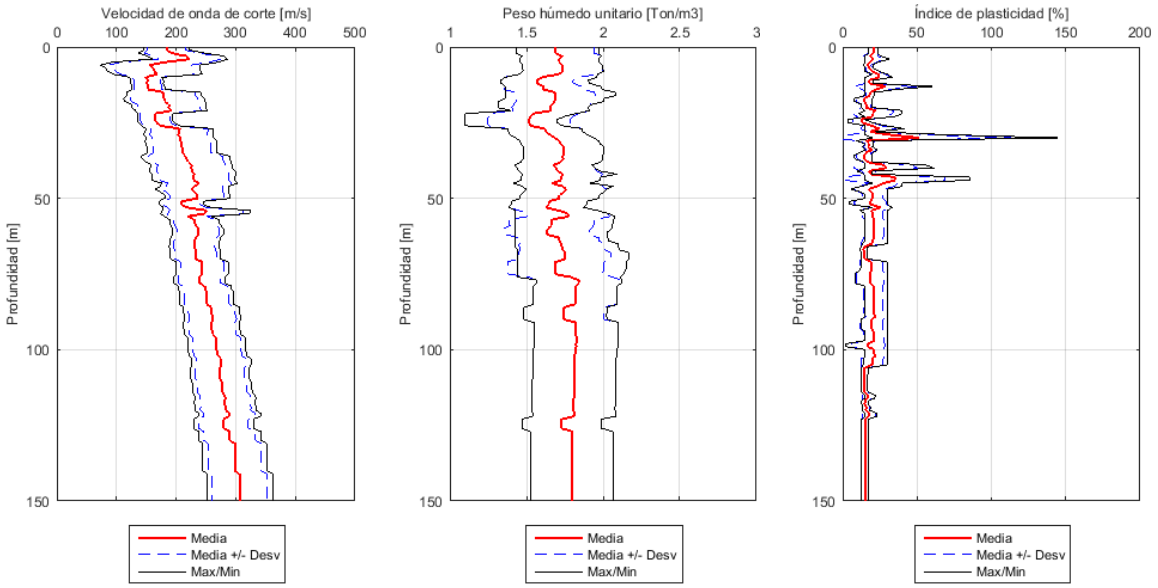
Finalmente, cabe recalcar que para la zona 37 no se tiene ninguna perforación, ya que esta hace referencia a la zona más escarpada de los cerros orientales y de Suba. En estas zonas no se va a presentar amplificación sísmica

De la Figura 3-19 a la Figura 3-22 se muestra el perfil medio, con su respectiva incertidumbre en profundidad, para zonas características del Norte, Sur, Occidente, y Oriente de la ciudad respectivamente (Figura 3-18 (b)).



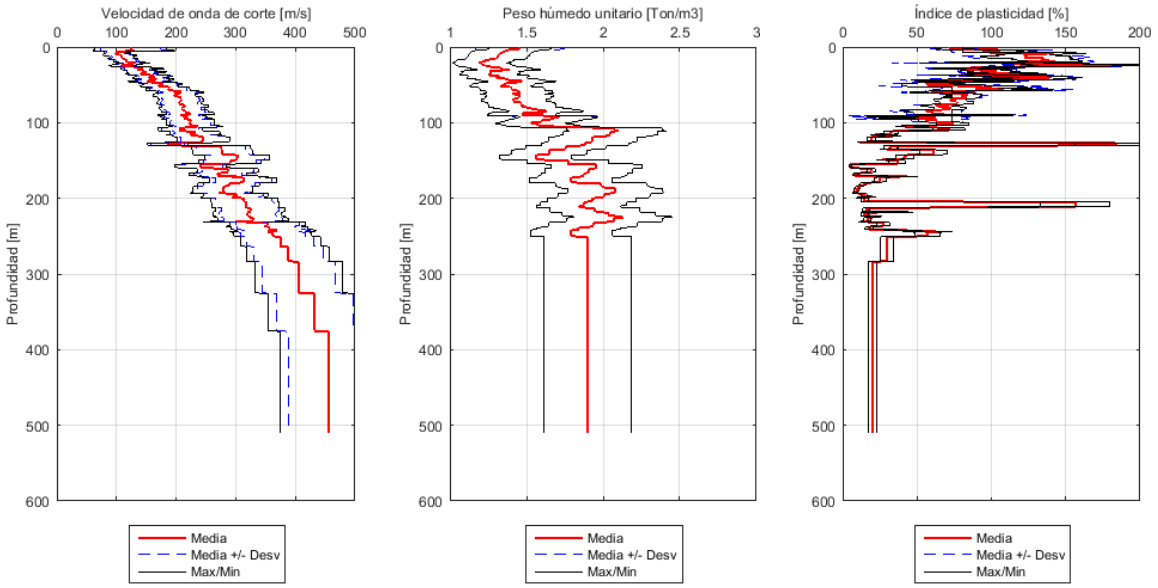
(b) *(c)* *(d)*

Figura 3-19. Caracterización estadística de la Zona 8 (Norte): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad



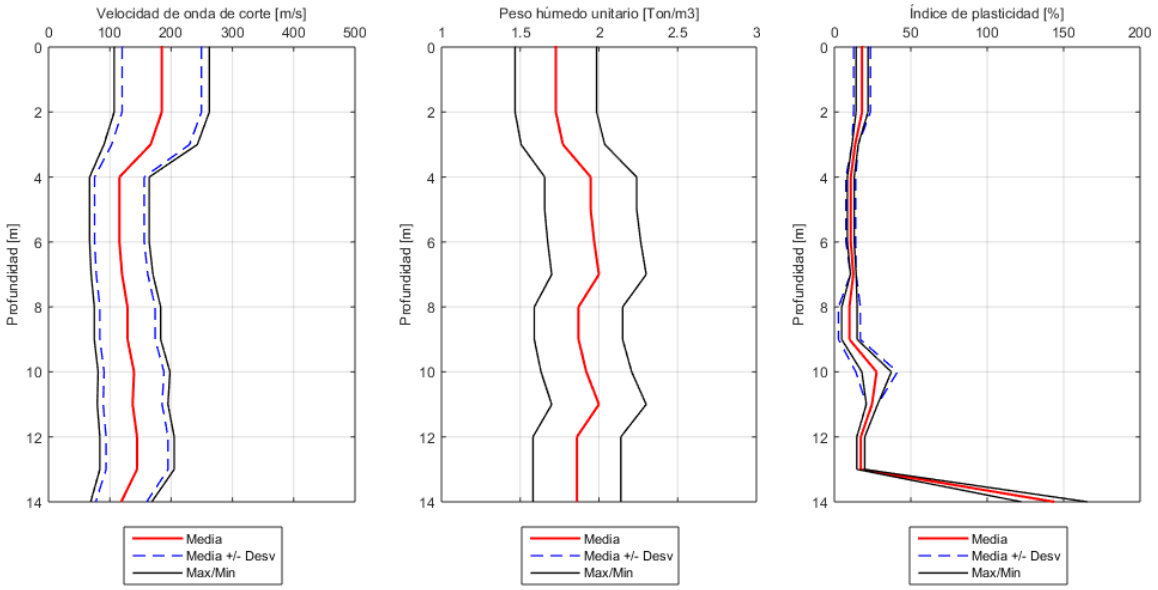
(a) *(b)* *(c)*

Figura 3-20. Caracterización estadística de la Zona 32 (Sur): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad



(a) *(b)* *(c)*

Figura 3-21. Caracterización estadística de la Zona 19 (Occidente): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad



(a) *(b)* *(c)*

Figura 3-22. Caracterización estadística de la Zona 21 (Oriente): (a) perfil de velocidad de onda cortante, (b) peso unitario húmedo, (c) índice de plasticidad

3.2.5 Periodo fundamental del suelo

El periodo fundamental del suelo (Ts) es un indicador fundamental del comportamiento dinámico de los depósitos del suelo, y se utiliza para definir en cada punto del terreno el nivel esperado de amplificación que puede llegar a presentarse. Con el fin de integrar la información geográficamente se elabora un mapa con la distribución geográfica del periodo de vibración fundamental esperado de los depósitos del suelo. Para este efecto se utilizó como base la información reportada en diferentes estudios para su elaboración (Universidad de los Andes, 2006; FOPAE,2010), y se realizaron modificaciones y ajustes para contemplar barreras geológicas y algunas zonas especiales existentes (cerros de Suba, y cerros orientales). En la Figura 3-23 se observa el mapa de periodo fundamental del suelo utilizado en los análisis subsecuentes.

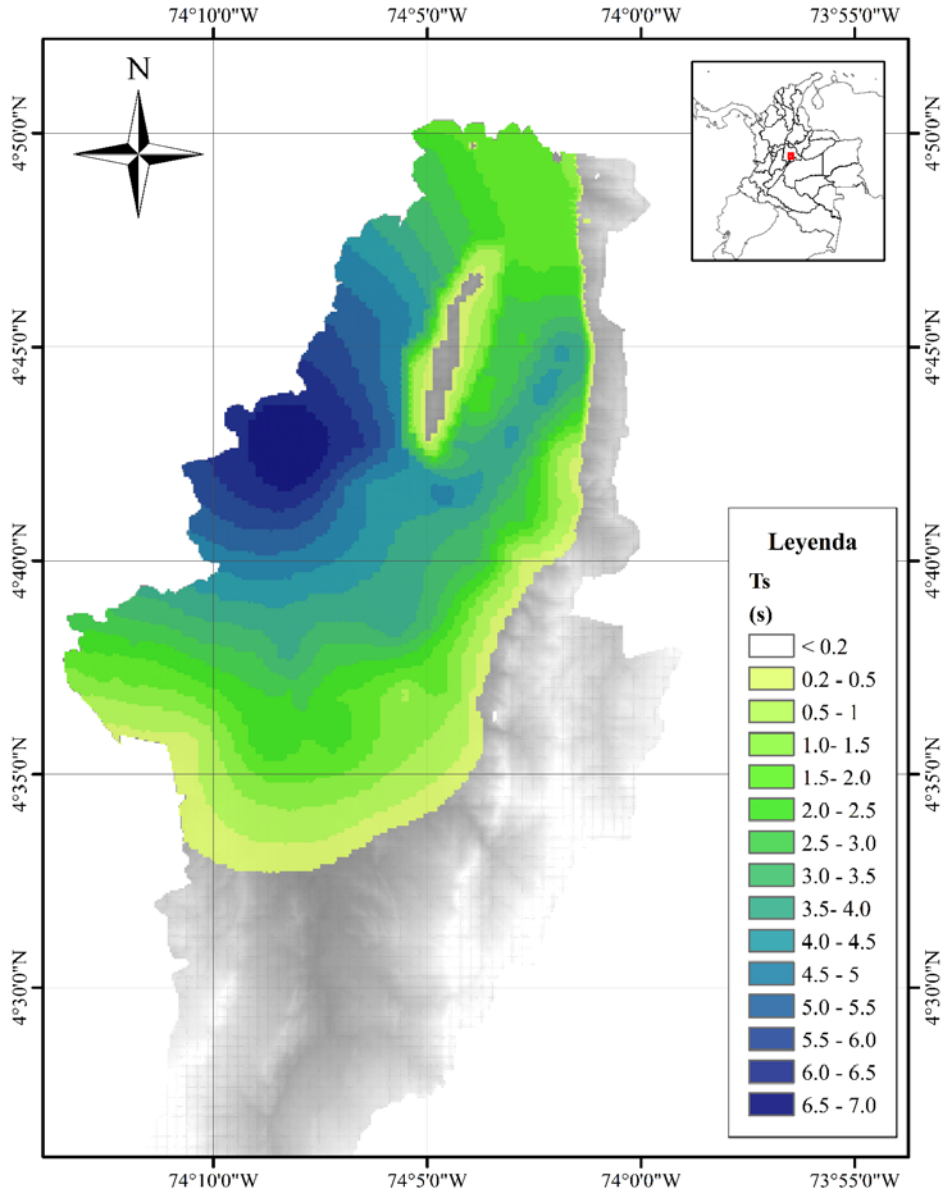


Figura 3-23. Distribución espacial del periodo fundamental de vibración del suelo (Universidad de los Andes, 2006)

3.2.6 Análisis de respuesta unidimensional del suelo

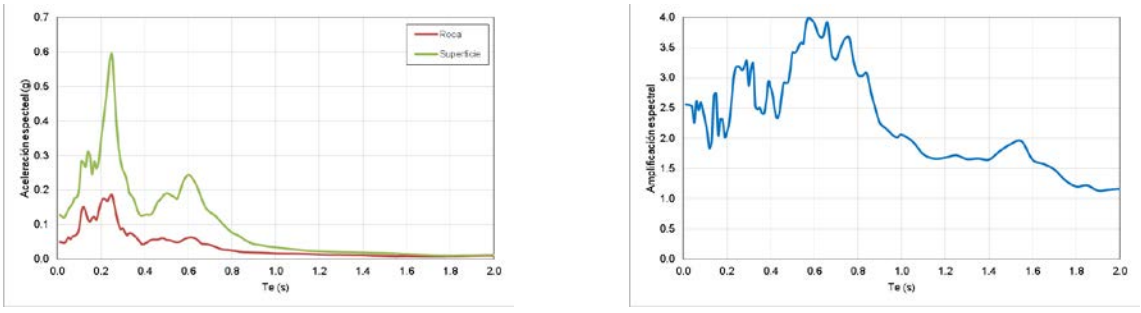
La evaluación de la respuesta dinámica se hace mediante análisis unidimensionales basados en el concepto de matriz propagadora planteado por Haskell en 1953 y a Idriss y Seed (1968) que intordujeron el concepto de análisis no lineal equivalente para contemplar el comportamiento dinámico de los estratos de suelo durante un evento sismico. Estos análisis permiten resolver las ecuaciones dinámicas y obtener la solución usualmente en términos de las señales de respuesta de estratigrafías características del suelo ante señales incidentes. Estos por lo general usan modelos hiperbólicos para determinar las curvas de comportamiento histéricos del suelo a partir de los parámetros estáticos y dinámicos de cada uno de los tipos de suelo que conforman la columna estratigráfica. Los programas más utilizados a nivel mundial para este tipo de análisis son:

- Programa DEEPSOIL (Hasash et al 2016)
- Programa SHAKE (Schnabel et al, 1972) y SHAKE91 (Idriss & Sun).

Las hipótesis en las que se basan estos modelos de análisis son las siguientes:

- Los estratos de suelo se extienden uniformemente y hasta el infinito en dirección horizontal y la capa inferior es el semiespacio infinito y corresponde al basamento rocoso.
- La respuesta principal del depósito de suelo es la producida por la propagación vertical de ondas de cortante provenientes de la formación de roca subyacente.
- Las propiedades no lineales del suelo se modelan a través de sistemas viscoelásticos lineales equivalentes. Cada estrato que se modela es homogéneo e isotrópico y se caracteriza por su densidad de masa, espesor, módulo de corte y factor de amortiguamiento, y características de degradación de estas últimas propiedades con la deformación por cortante.

Esto análisis permiten obtener los espectros de amplificación del suelo para diferentes perfiles de suelo, mediante la relación entre los espectros de aceleración resultantes entre el basamento rocoso y el estrato más superficial del depósito de suelo. En la Figura 3-24 se presenta un esquema de un espectro de amplificación del suelo



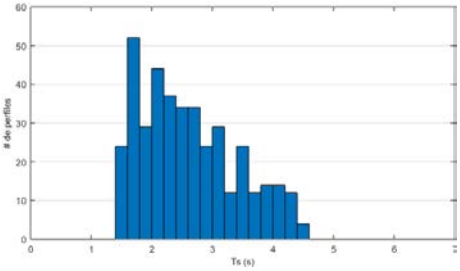
(a) Espectro de aceleraciones en roca y superficie *(b) Espectro de amplificación para un perfil de suelo*

Figura 3-24. Factores de amplificación espectral a partir de los espectros de respuesta en aceleración en roca y superficie

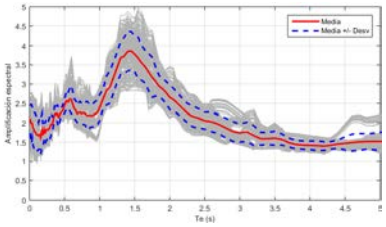
3.2.7 Modelación y análisis de perfiles estocásticos de suelo

La respuesta dinámica de los suelos se evaluó realizando una serie de modelos unidimensionales sobre perfiles estocásticos de suelo generados a partir de simulaciones de Monte Carlo (Prada et al., 2017) (Yamin, y otros, 2018). Para cada una de las zonas definidas se generaron 400 perfiles estocásticos cuya respuesta dinámica fue evaluada con el método de análisis lineal equivalente (Idriss & Seed, 1968), utilizando el software SHAKE91 (Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972)(Idriss & Seed, 1991), frente a un grupo de señales sísmicas con diferente PGA (Peak Ground Acceleration). De estos análisis se calculan los espectros de amplificación para cada uno de los perfiles generados.

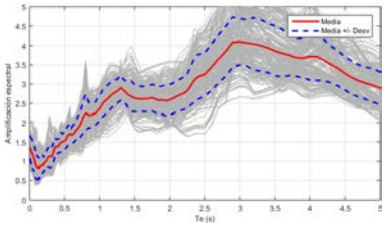
Posteriormente, se agruparon los resultados según el periodo fundamental de los perfiles de suelo (Ts) en rangos de 0.2 segundos y el PGA de la señal de entrada (100, 200, 300, y 400 cm/s^2), con el fin de realizar un análisis estadístico y obtener los valores medios de amplificación espectral junta a su incertidumbre asociada. Los resultados obtenidos con esta serie de análisis se suavizan y promedian para obtener funciones de amplificación representativas de cada una de las estratigrafías características. En la Figura 3-25 se muestra un esquema del proceso de obtención de los factores de amplificación para cada zona. Dichos resultados se agrupan en un diagrama tridimensional como se indica en la figura.



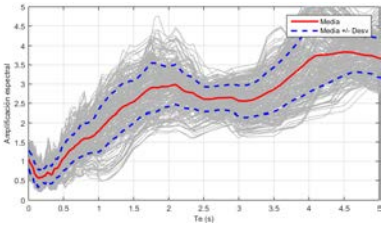
(a) Histograma de perfiles estocásticos de la zona de análisis



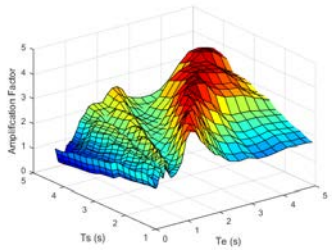
(b) 1.2 s<Ts<1.4 s – PGA= 0.2g



(c) 2.8 s<Ts<3.0 s – PGA= 0.2g



(d) 4.0 s<Ts<4.2 s – PGA= 0.2g



(d) Conjunto de espectros de amplificación para la zona de análisis – PGA=200 cm/s^2

Figura 3-25. Metodología de análisis de respuesta dinámica para las zonas de amplificación definidas

Para cada una de las zonas definidas se obtuvieron los espectros de amplificación probabilista, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. De la Figura 3-26 a la Figura 3-29 se presentan los resultados para 4 zonas representativas de los diferentes sectores de la ciudad.

3.2.8 Amplificación del suelo en superficie

A partir del mapa de periodos fundamentales del suelo (Figura 3-23) y los factores de amplificación calculados por zona geotécnica, se hace una integración de esta información para representar la distribución espacial de los factores de amplificación espectral en los diferentes sectores de la ciudad. En la Figura 3-30 y la Figura 3-31 se presentan los factores de amplificación espectral a lo largo de la ciudad para diferentes periodos estructurales (Te).

Se evidencia que los grandes depósitos de suelo blando generan amplificaciones importantes a lo largo de la ciudad, en especial en la zona occidental donde estos son más profundos. Adicionalmente se observa que el periodo del suelo está relacionado con la amplificación espectral esperada, ya que para periodos estructurales cortos las mayores amplificaciones se dan en la zona oriental y montañosa de la ciudad (zona de periodos bajos), mientras que para periodos estructurales altos, las máximas amplificaciones están asociadas a los depósitos de suelo con un periodo largo (zona occidental y norte). Estos factores permiten establecer entre otras cosas la posible resonancia que pueden presentarse entre las frecuencias dominantes de la señal de entrada, las frecuencias propias de vibración del depósito de suelo y las correspondientes a la vibración del puente, fenómeno que explica la ocurrencia de graves daños en infraestructura sometida a ondas sísmicas intensas en el pasado.

(Espacio en blanco intencional)

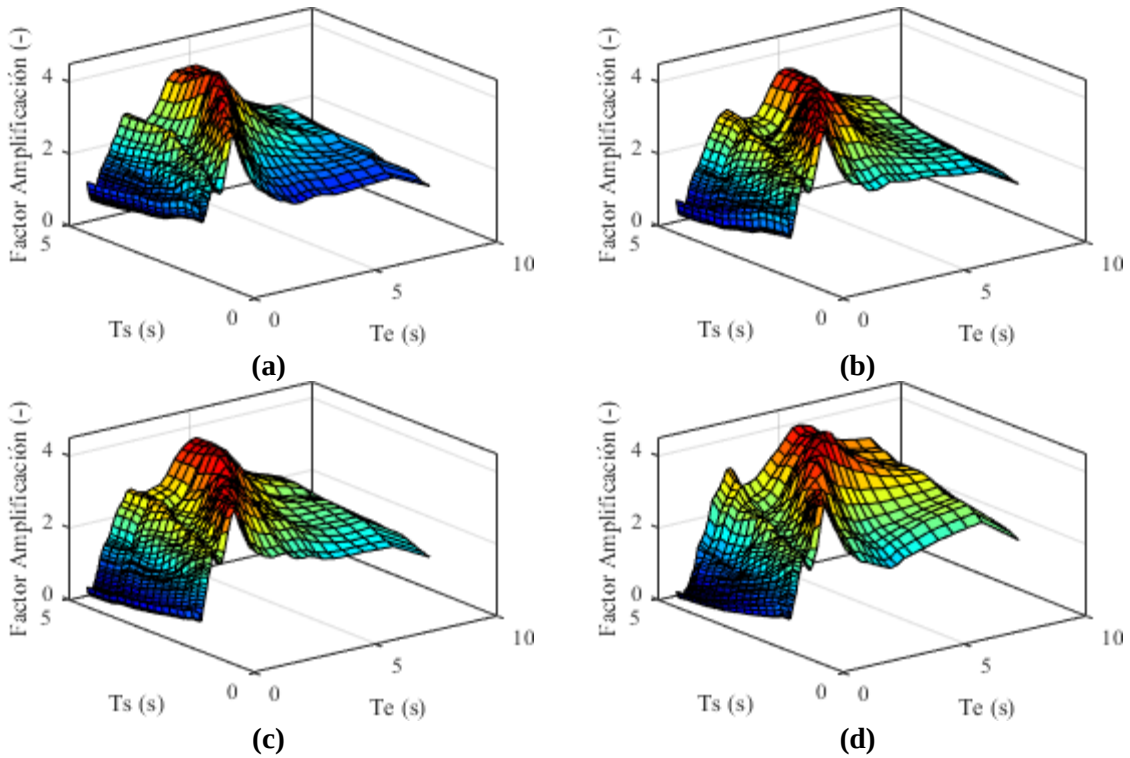


Figura 3-26. Superficies de amplificación espectral de la Zona 8 (Norte) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2

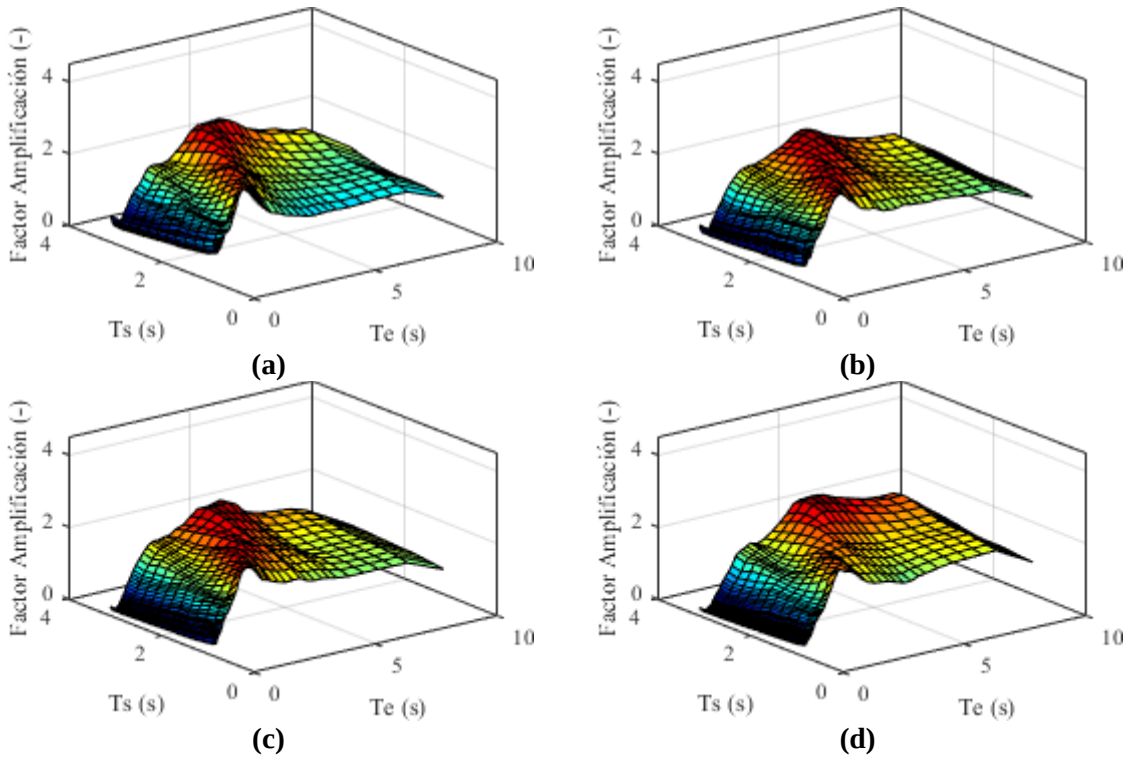


Figura 3-27. Superficies de amplificación espectral de la Zona 32 (Sur) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2

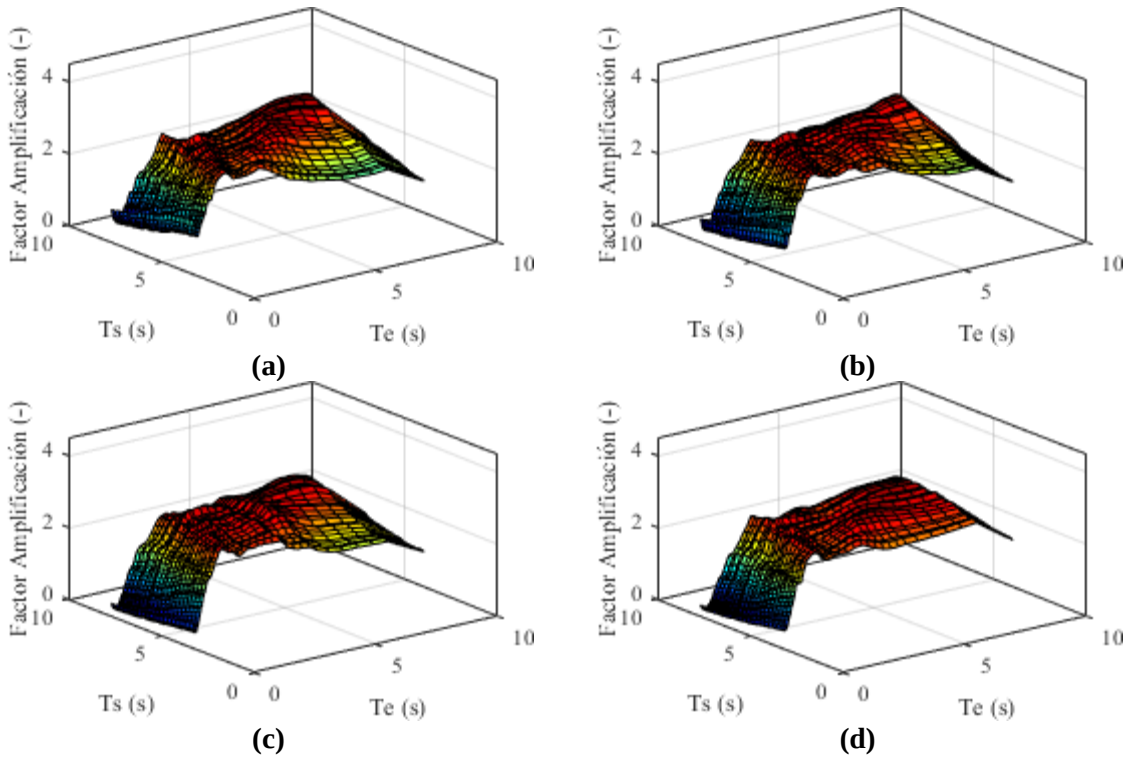


Figura 3-28. Superficies de amplificación espectral de la Zona 19 (Occidente) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2

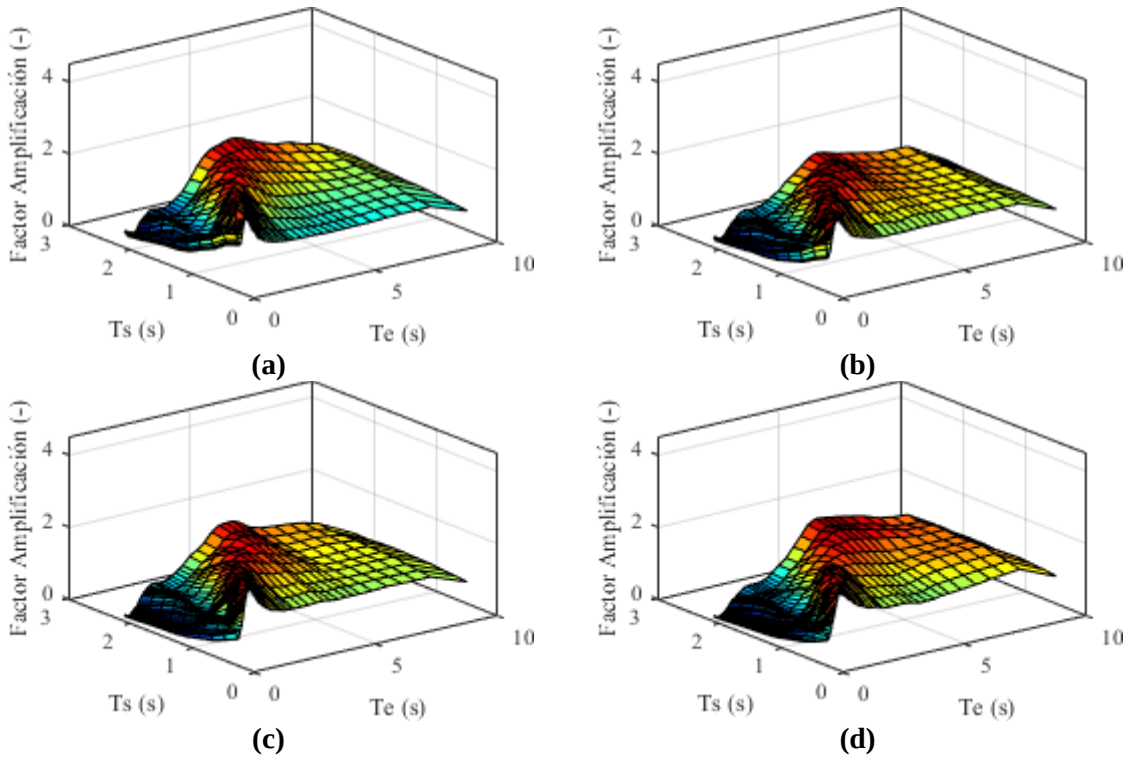


Figura 3-29. Superficies de amplificación espectral de la Zona 21 (Oriente) para (a) 100 cm/s2, (b) 200 cm/s2, (c) 300 cm/s2, (d) 400 cm/s2

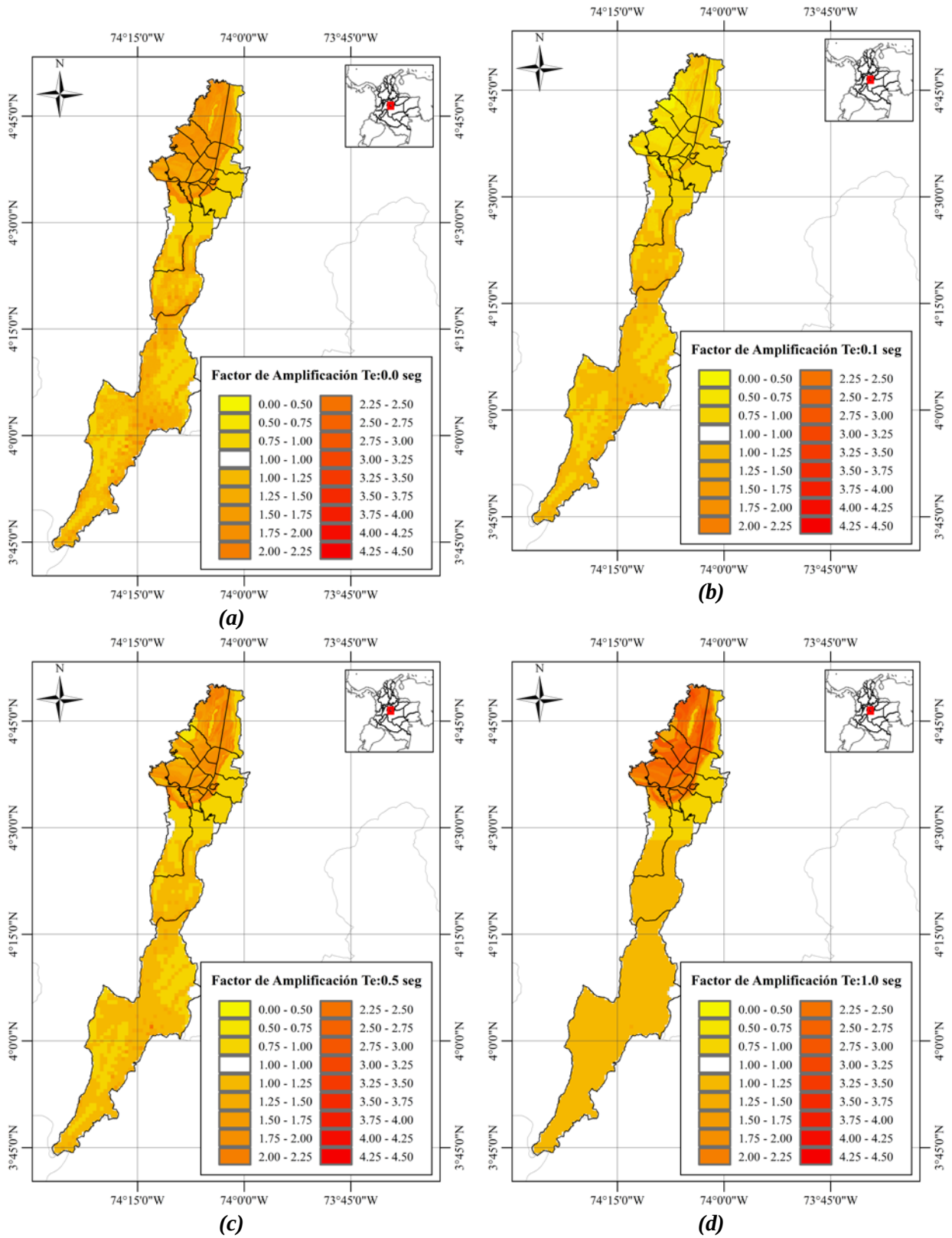


Figura 3-30. Amplificación espectral en superficie para Te = (a) 0.0 segundos, (b) 0.1 segundos, (c) 0.5 segundos, (d) 1.0 segundos

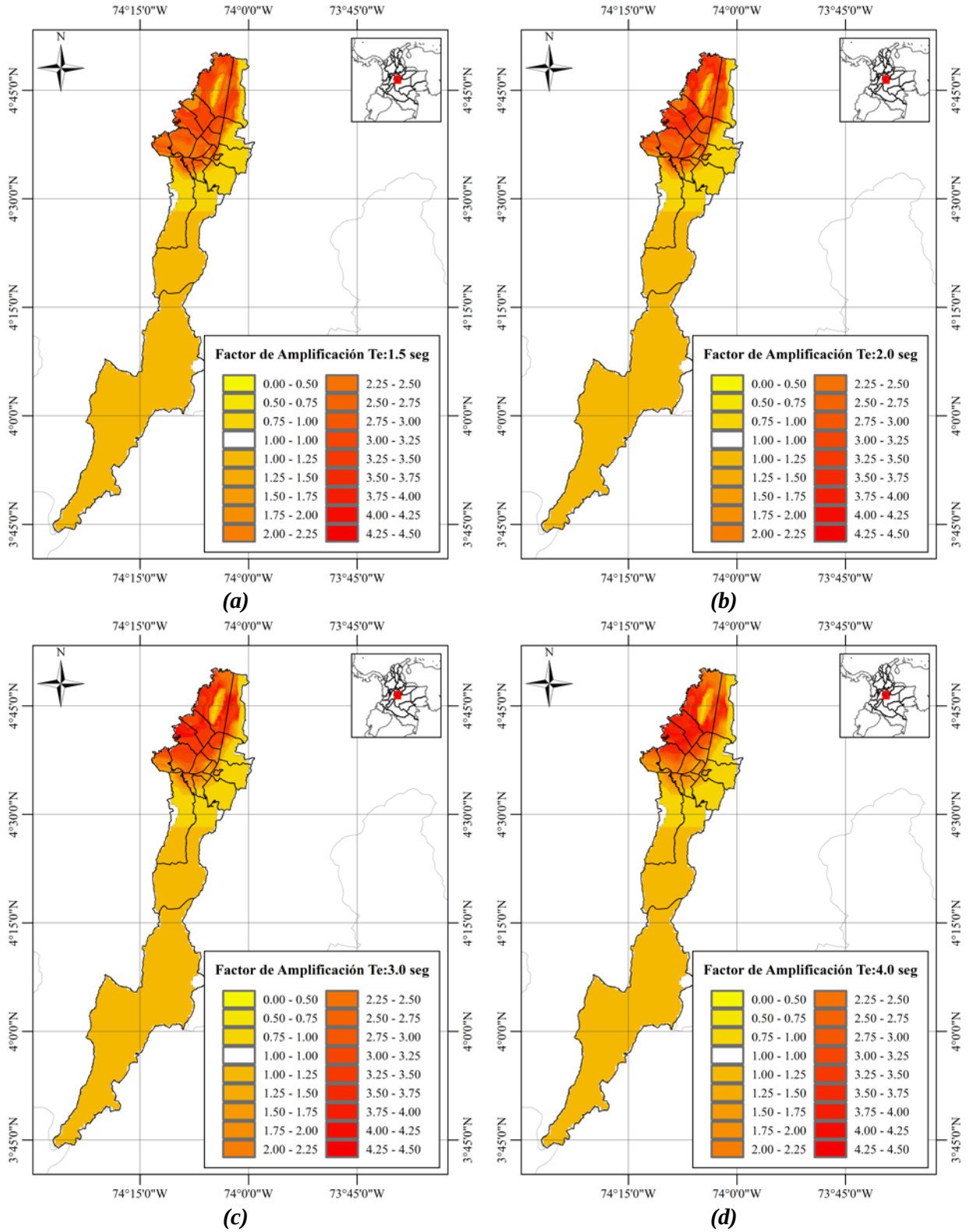


Figura 3-31. Amplificación espectral en superficie para Te = (a) 1.5 segundos, (b) 2.0 segundos, (c) 3.0 segundos, (d) 4.0 segundos

3.3 AMENAZA SÍSMICA EN SUPERFICIE

3.3.1 Metodología para evaluar la amenaza sísmica en superficie

La aceleración espectral en superficie se obtiene integrando los resultados de amenaza sísmica a nivel del basamento rocoso con los efectos de sitio, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la amenaza probabilista y a los factores espectrales de amplificación del suelo. Para llevar el cabo el proceso de integración se genera una malla de cálculo con espaciamiento de 100 m sobre el área de estudio, donde se calculan los espectros de aceleración en superficie mediante el siguiente procedimiento (Universidad de los Andes, 2016) (Yamin, y otros, 2018)):

1. Obtener el espectro de aceleración espectral en roca correspondiente al punto de análisis y definir el PGA (Peak Ground Acceleration) o aceleración para Te=0.0 segundos.
2. Seleccionar el nivel de intensidad de entrada de los efectos de sitio con base en el PGA del espectro de aceleración en roca, mediante el siguiente criterio:

Nivel de Intensidad	**1**	**2**	**3**	**4**
PGA roca (cm/s2)	≤ 150	≤ 250	≤ 350	> 350
PGA efectos de sitio(cm/s2)	100	200	300	400

3. Obtener los factores de amplificación espectral para el punto de análisis, de acuerdo a la zona de amplificación, el periodo fundamental del suelo, y el nivel de intensidad de PGA.
4. Calcular el espectro de respuesta de aceleración en superficie, multiplicando el espectro de aceleración en roca por los factores de amplificación obtenidos para el punto de análisis. En dicho cálculo se integra el tratamiento de las incertidumbres asociadas mediante un análisis de “Latin Hypercube Sampling” (Helton & Davis, 2003; Stein, 2012; Tang, 1993), método en el cual se hacen iteraciones de los posibles espectros en roca y superficie según sus valores medios y desviaciones. El espectro en superficie se obtiene como la media de los espectros calculados luego de un número significativo de iteraciones.

En la Figura 3-32 se presenta un resumen de la metodología empleada para el cálculo de la amenaza sísmica a nivel de la superficie del terreno.

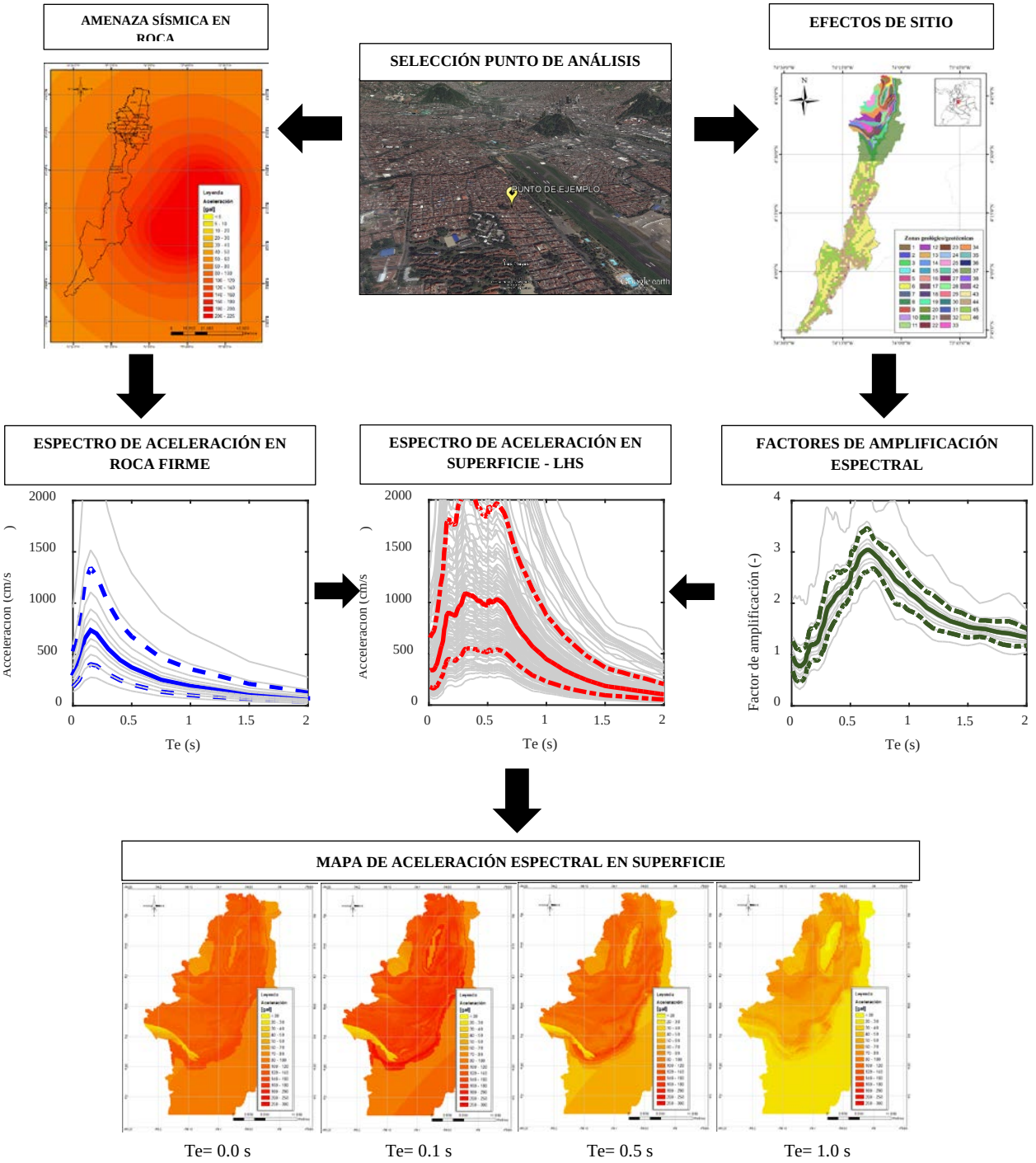
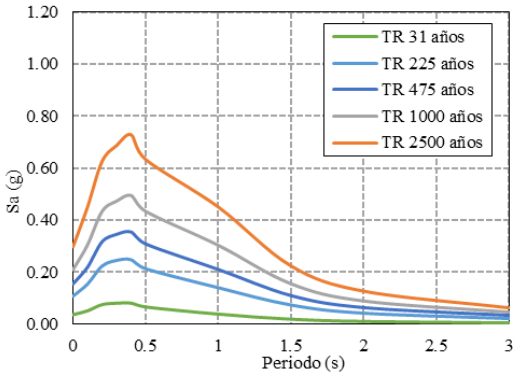


Figura 3-32. Procedimiento para la obtención de los espectros de aceleración en superficie (Uniandes, 2016)

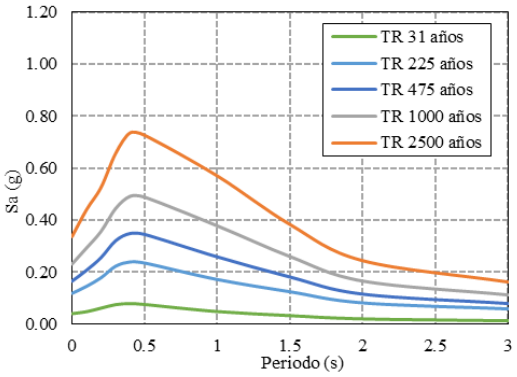
3.3.2 Resultados de amenaza en superficie

Aplicando la metodología anterior se evalúo la aceleración espectral en superficie en la ciudad de Bogotá para diferentes periodos de retorno Tr (31, 225, 475, 1000, y 2500 años). En la Figura 3-33 se presentan los espectros de aceleración en superficie para diferentes puntos ubicados en la ciudad. Adicionalmente de la Figura 3-34 a Figura 3-38 se presenta la distribución espacial de aceleración en superficie para diferentes periodos estructurales y periodos de retorno.

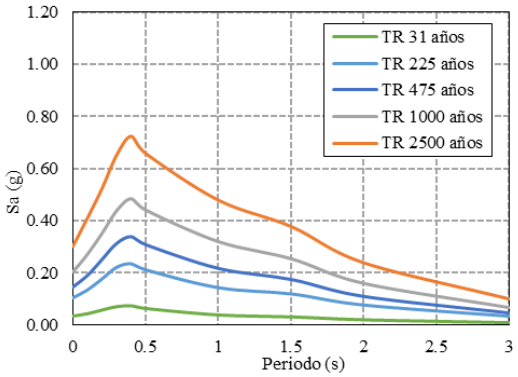
A nivel de superficie la distribución espacial de la aceleración espectral es consecuente con los depósitos de suelo de la ciudad. Por esta razón, para periodos estructurales altos (1.0 segundo) se presentan altos niveles de aceleración en las zonas donde estos depósitos son de gran profundidad, principalmente al norte y occidente del casco urbano. Lo contrario ocurre en zonas de depósitos más duros, como la zona rural o en la cercanía a los cerros de la ciudad, donde las amplificaciones del suelo son muy bajas y las aceleraciones resultantes son mayores para periodos estructurales bajos (0.1 segundos).



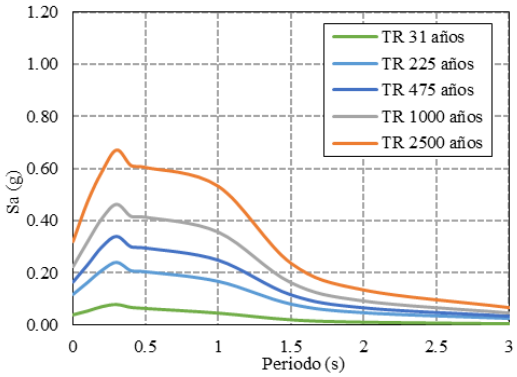
(a) Antonio Nariño



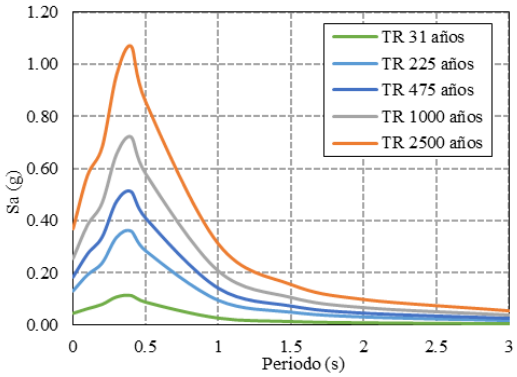
(b) Barrios Unidos



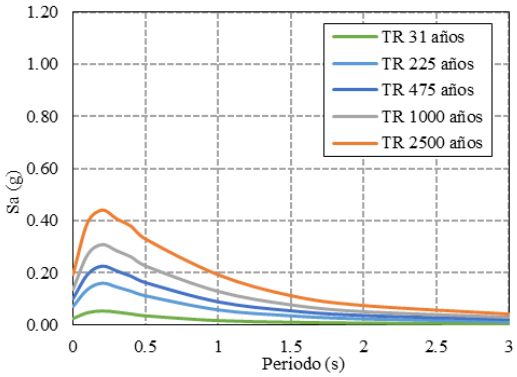
(c) Bosa



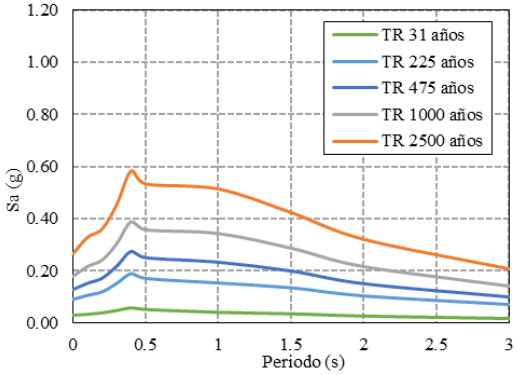
(d) Candelaria



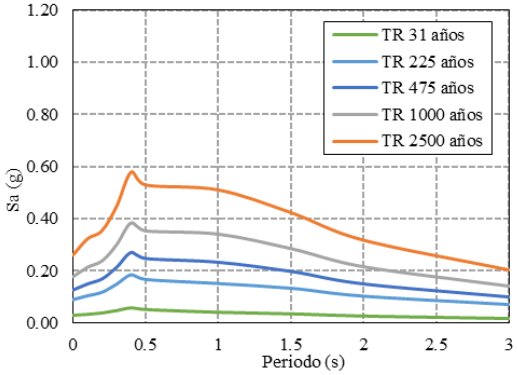
(e) Chapinero



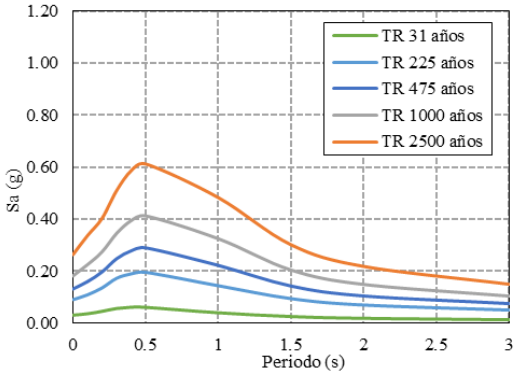
(f) Ciudad Bolívar



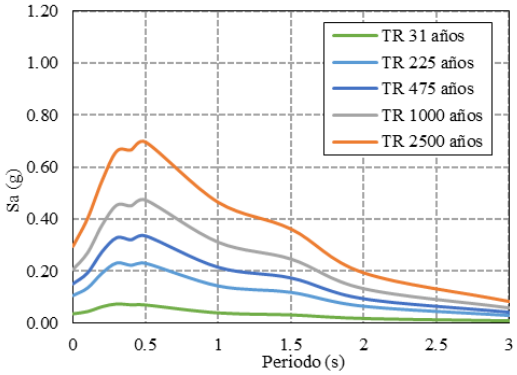
(g) Engativá



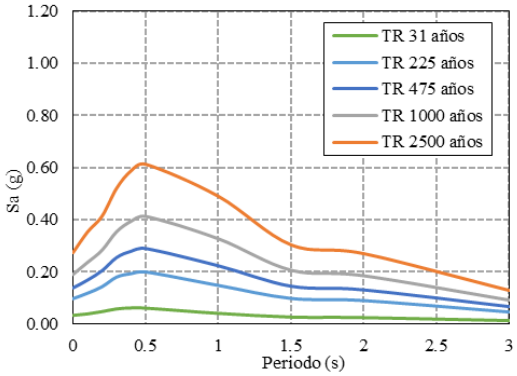
(h) Fontibón



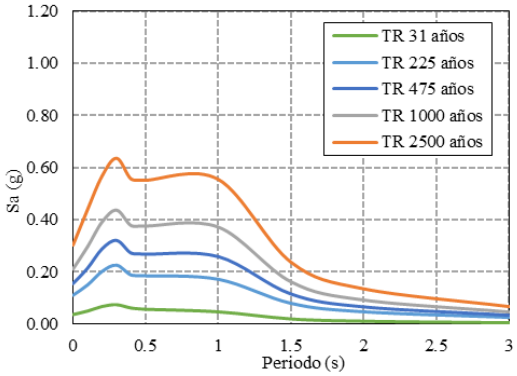
(i) Kennedy



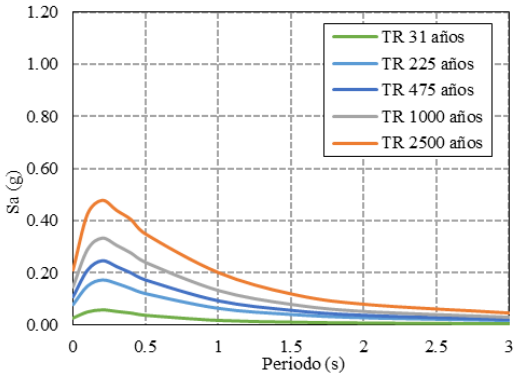
(j) Los Mártires



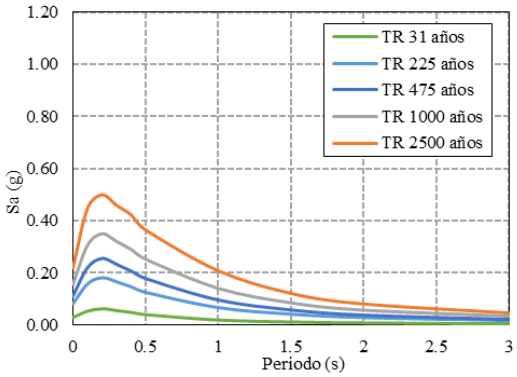
(k) Puente Aranda



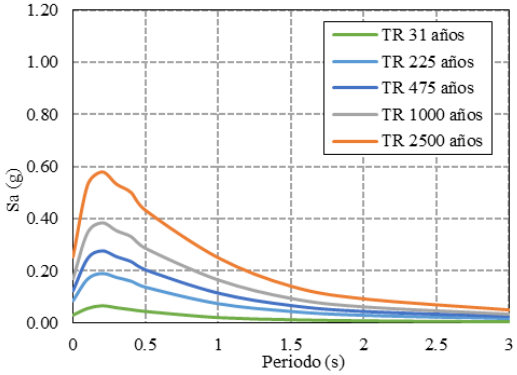
(l) Rafael Uribe Uribe



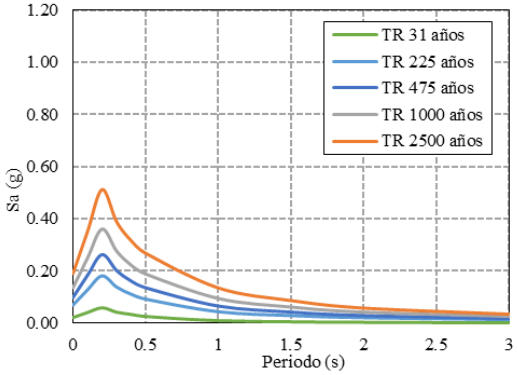
(m) San Cristóbal



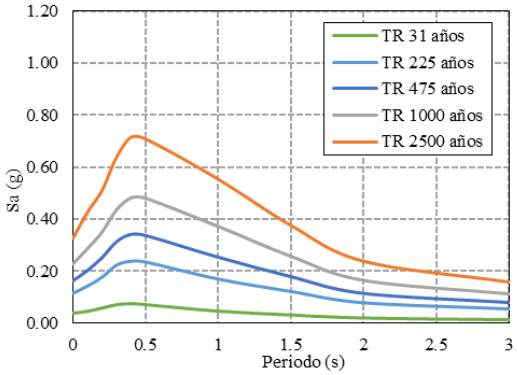
(n) Santa Fe



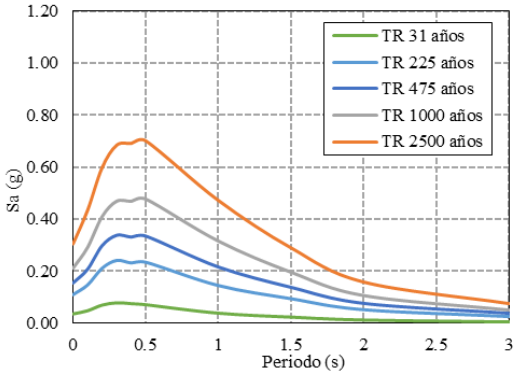
(o) Suba



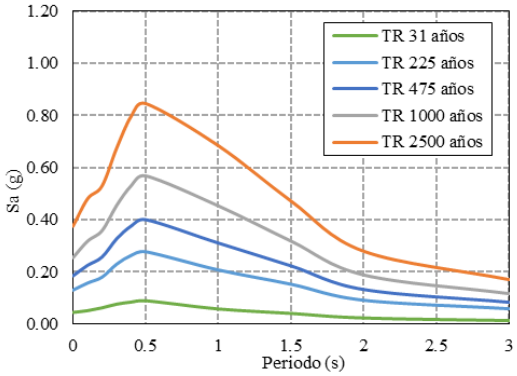
(p) Sumapaz



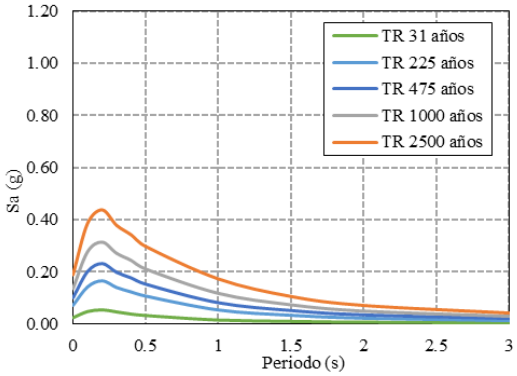
(q) Teusaquillo



(r) Tunjuelito

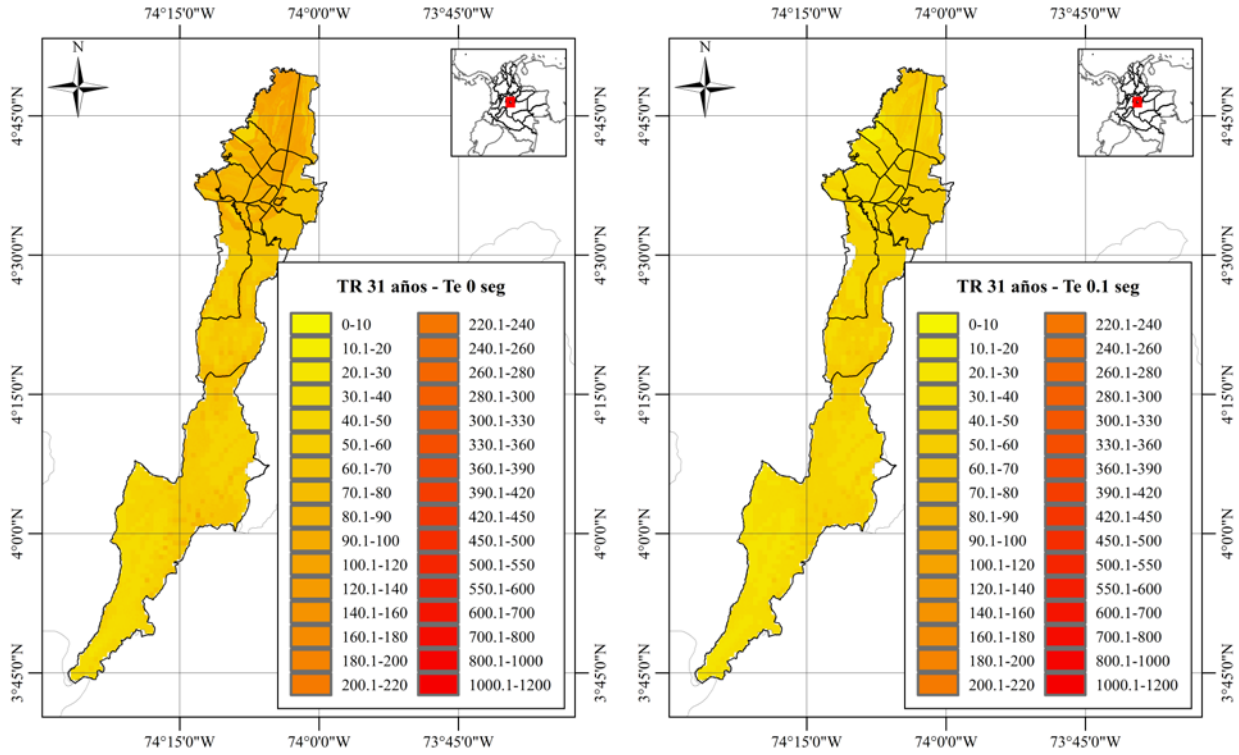


(s) Usaquén

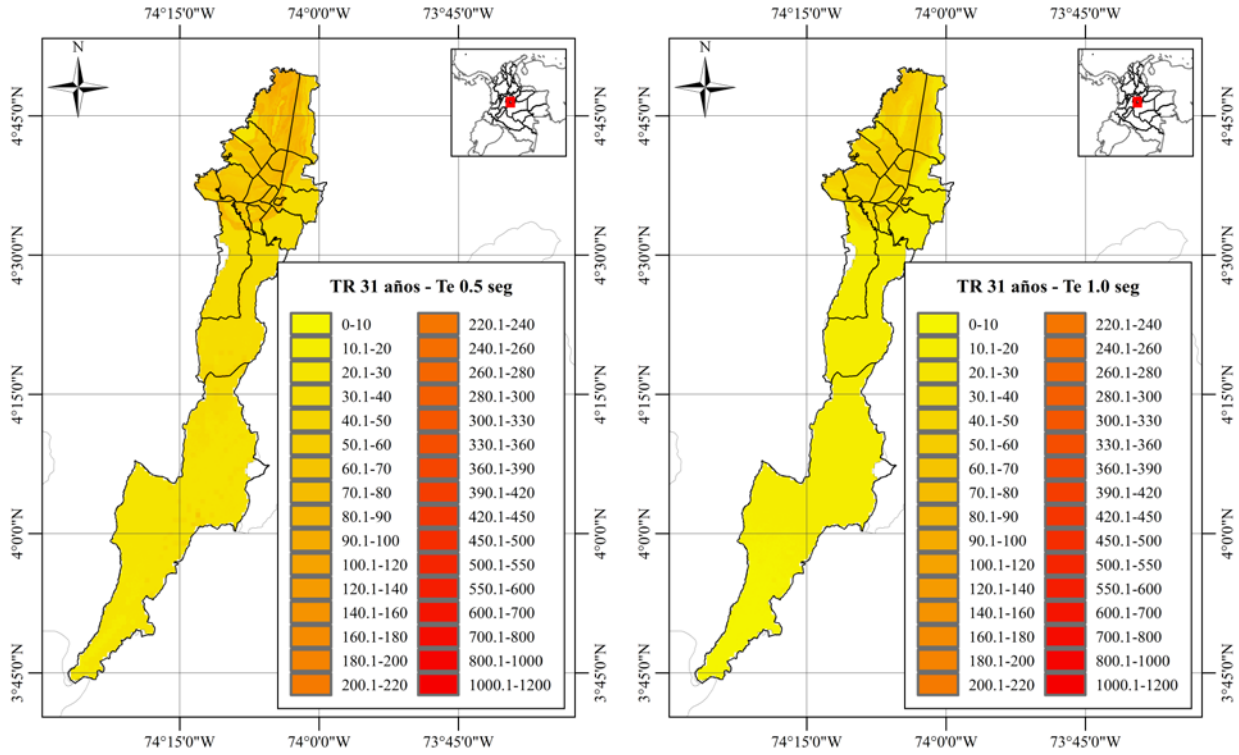


(t) Usme

Figura 3-33. Espectros de aceleración en superficie para diferentes puntos de la ciudad

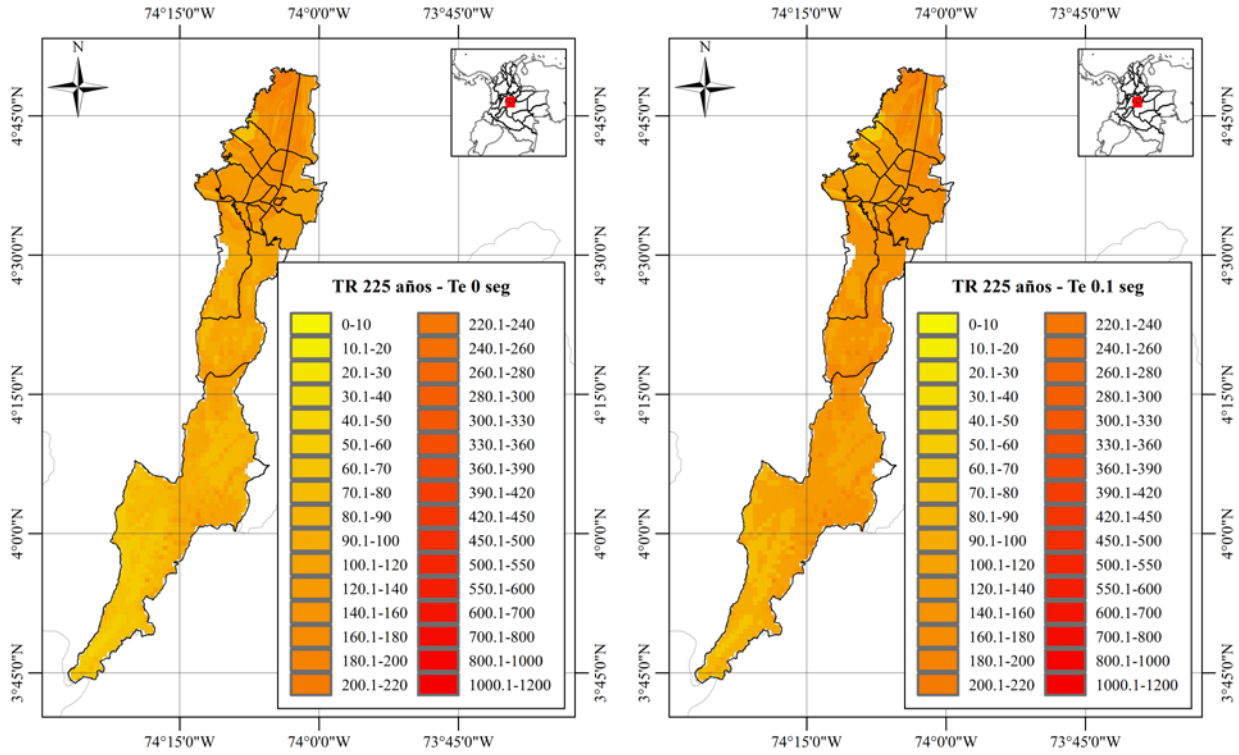


(a) Te = 0.0 s *(b) Te = 0.1 s*



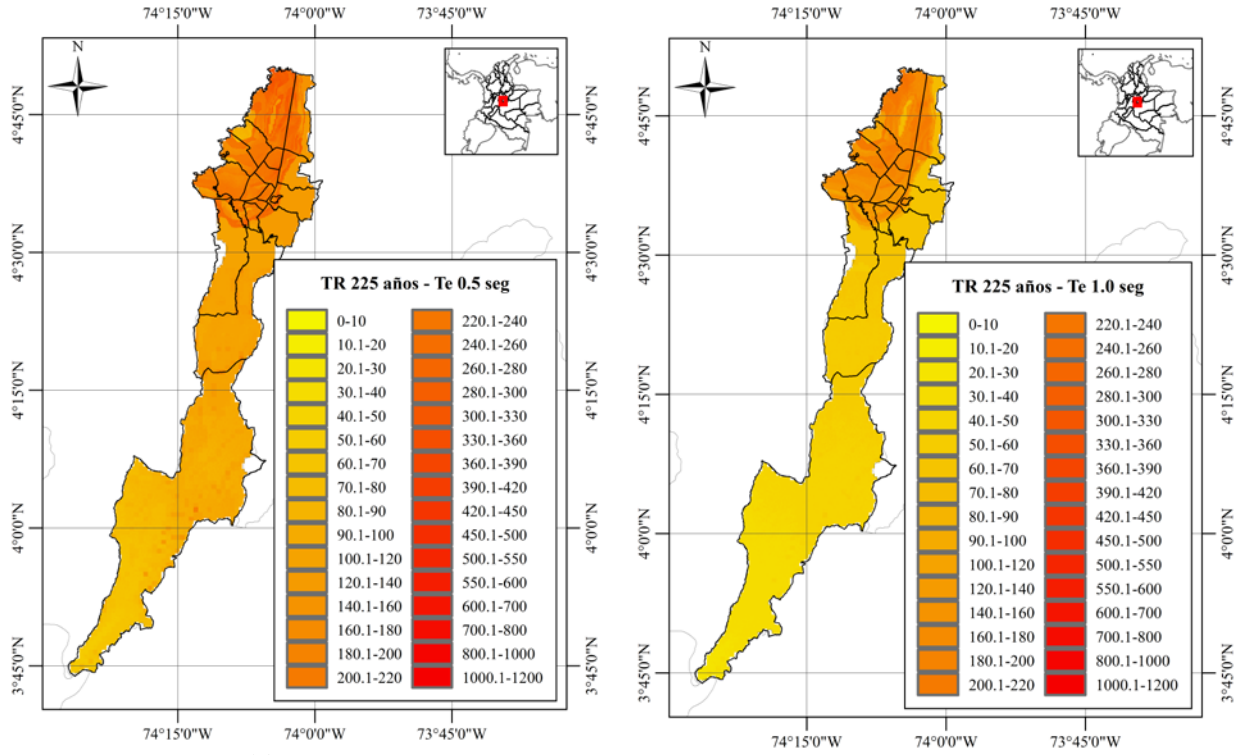
(c) Te = 0.5 s *(d) Te = 1.0 s*

Figura 3-34. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 31 años



(a) Te = 0.0 s

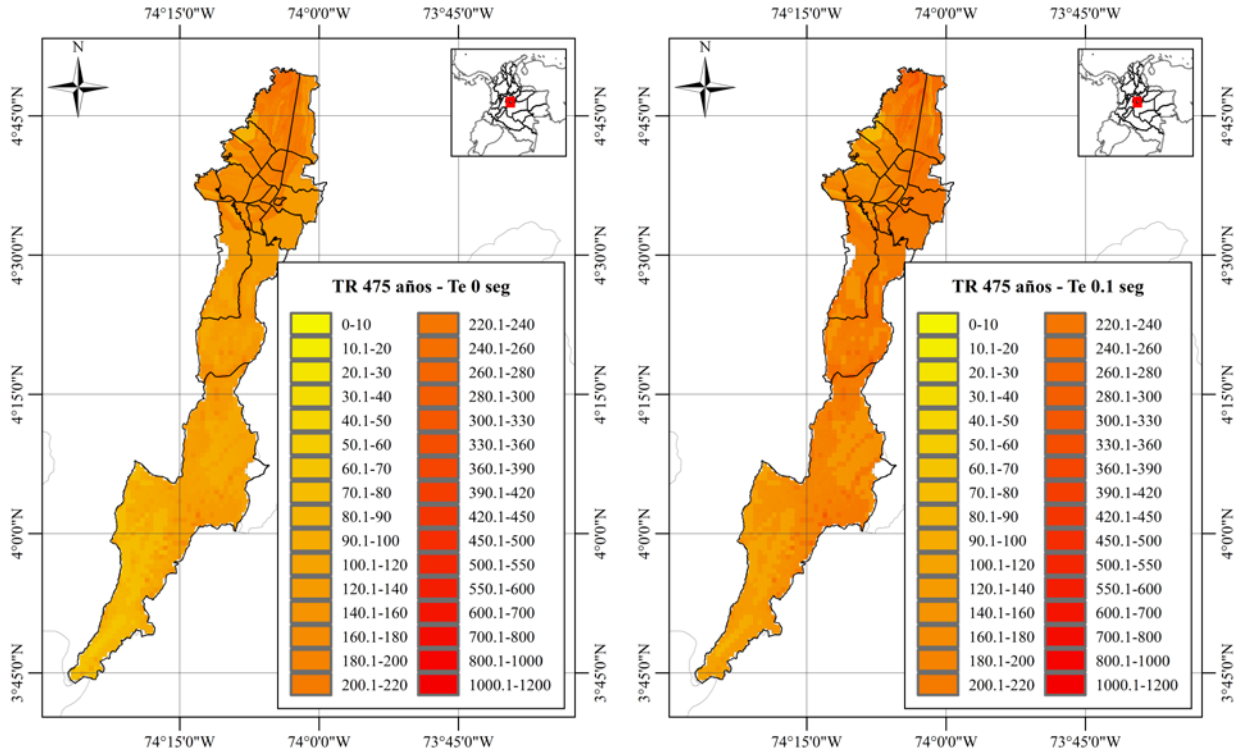
(b) Te = 0.1 s



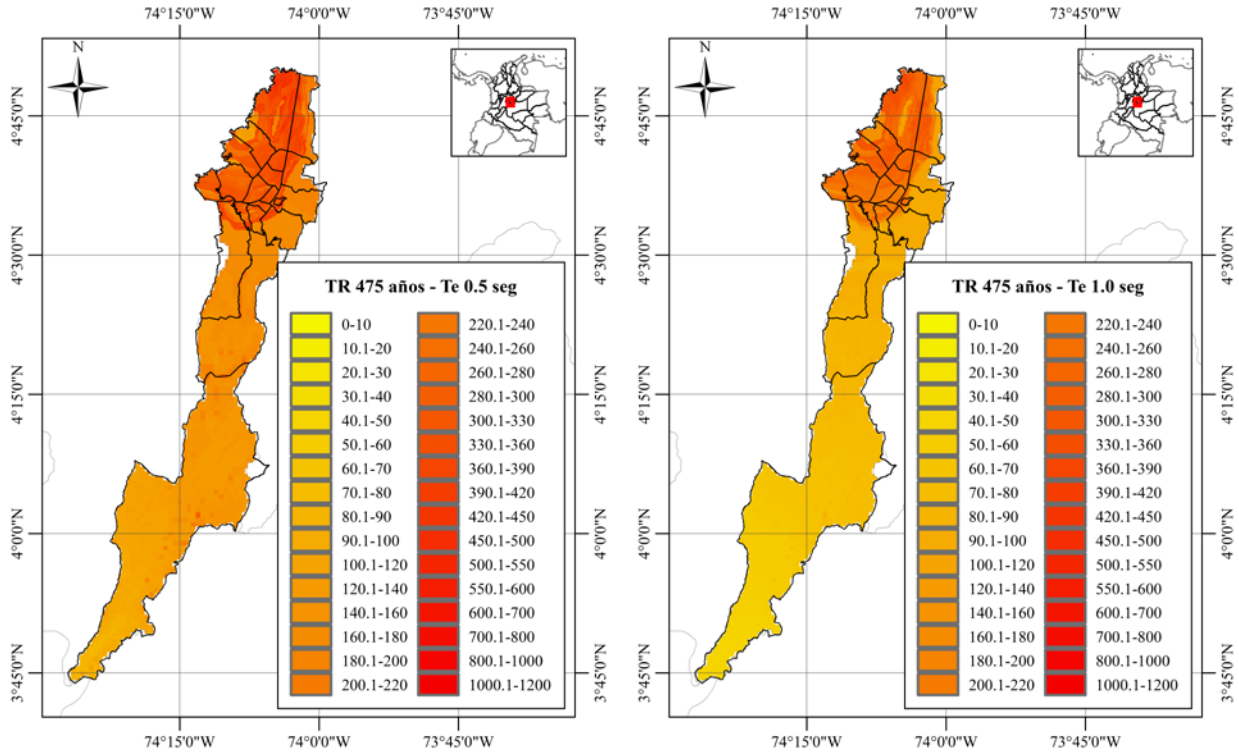
(c) Te = 0.5 s

(d) Te = 1.0 s

Figura 3-35. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 225 años

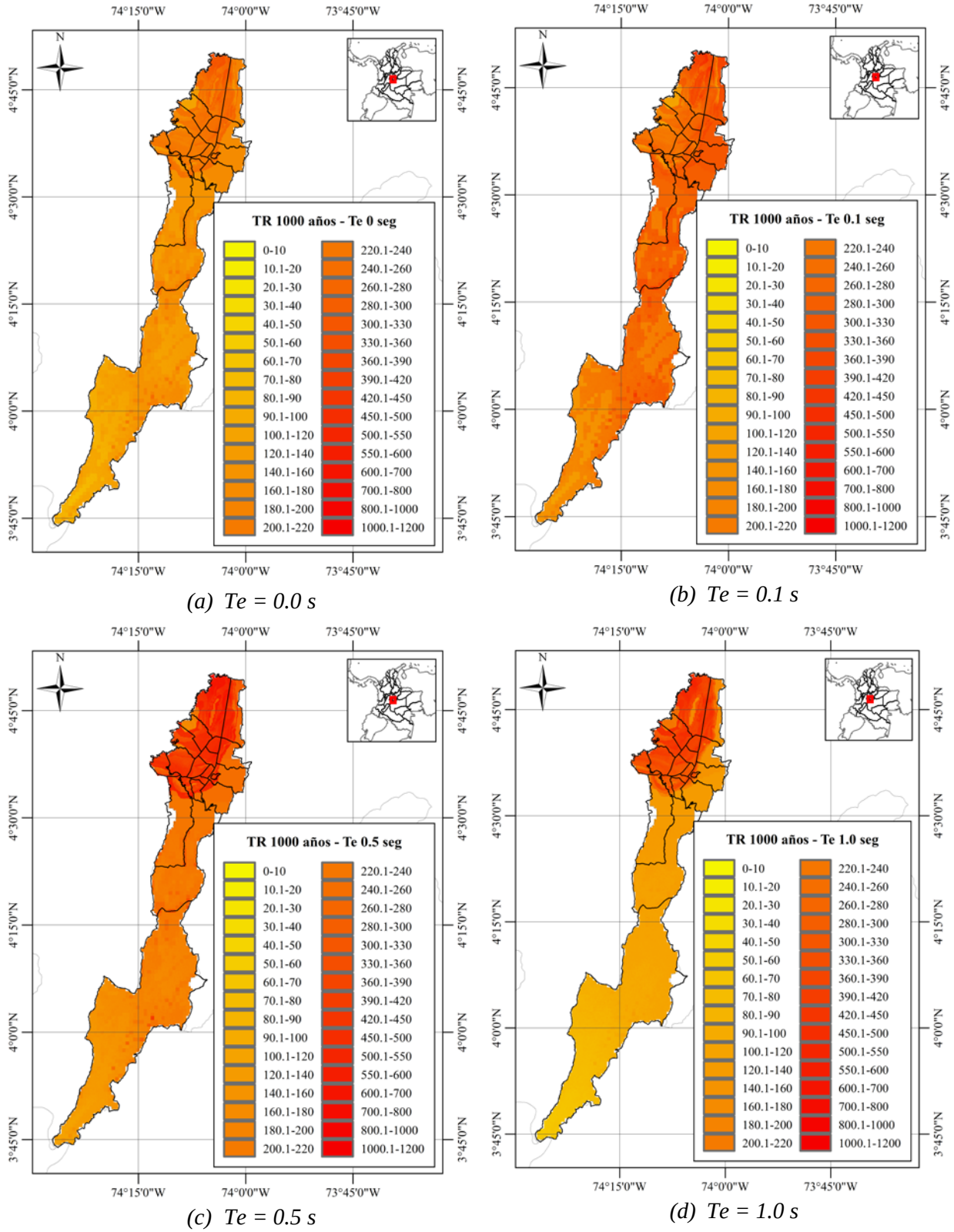


(a) Te = 0.0 s *(b) Te = 0.1 s*



(c) Te = 0.5 s *(d) Te = 1.0 s*

Figura 3-36. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 475 años



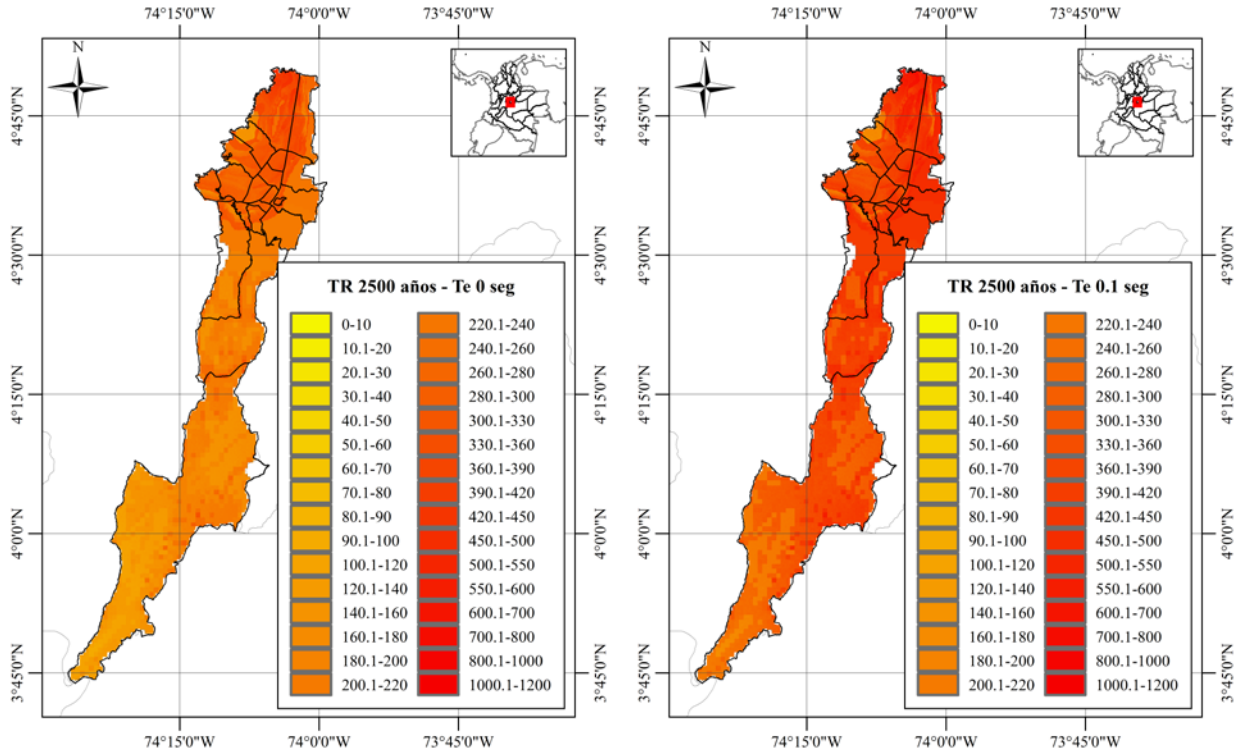
(a) Te = 0.0 s

(b) Te = 0.1 s

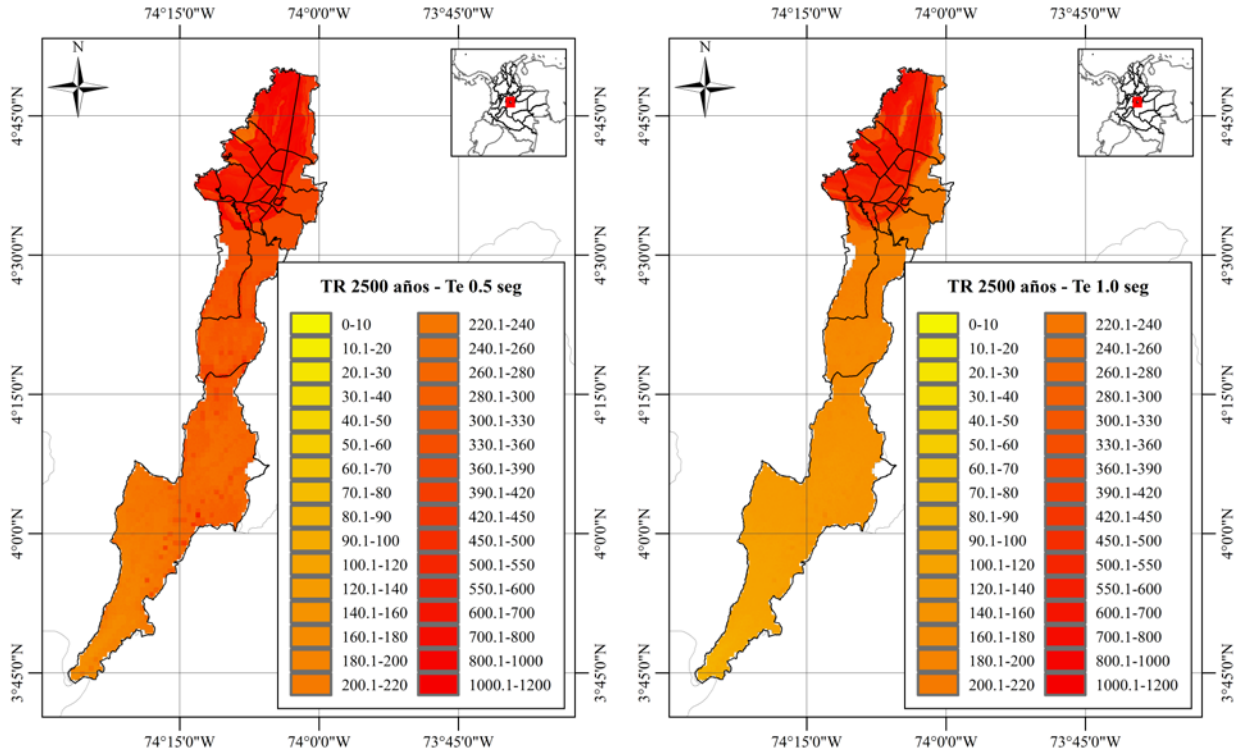
(c) Te = 0.5 s

(d) Te = 1.0 s

Figura 3-37. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 1000 años



(a) Te = 0.0 s *(b) Te = 0.1 s*



(c) Te = 0.5 s *(d) Te = 1.0 s*

Figura 3-38. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para TR = 2500 años

3.4 COMPARACIÓN DE LA AMENAZA FRENTE A LA NORMA

Los resultados obtenidos fueron comparados frente a los espectros de aceleración reportados en el código de diseño de puentes CCP-14, con el fin de establecer las diferencias entre el modelo desarrollado y el código vigente. Para esto se comparan los espectros de aceleración en roca y superficie para diferentes puntos ubicados en toda la ciudad (ver Figura 3-39).

Se observa que en términos generales los espectros calculados, son considerablemente menores a los reportados en el código de diseño de puentes. Sin embargo, esto es de esperarse dada la información de referencia que se utilizó como base para la definición de las fuentes sismogénicas, y la evidencia histórica de sismicidad que presenta el catálogo sísmico nacional. El análisis de esta información (Capítulo 3) refleja que la actividad sísmica de las fuentes que controlan la amenaza sísmica de la ciudad es menor y por ende las aceleraciones esperadas para la ciudad de Bogotá van a ser menores. Sin embargo, más allá de las diferencias observadas el modelo propuesto es consistente con la información de fuentes sísmicas locales y con la sismicidad histórica de las zonas de influencia de la ciudad de Bogotá

Estos resultados deben analizarse a la luz de las siguientes consideraciones:

a) Los espectros de diseño son usualmente conservadores dado que deben cubrir todas las posibles incertidumbres en especial la correspondiente a posibles sismos futuros de los cuales no se tenga información.
b) Los efectos de amplificación del suelo que proponen las normas de diseño y construcción tienen usualmente un alto grado de seguridad por cuanto se pretende cubrir todas las posibles incertidumbres asociadas.
c) Los resultados que se presentan se consideran aplicables a la evaluación del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad con fines de gestión del riesgo y en particular para establecer las bases para un plan de mitigación del riesgo, esquemas de protección financiera y sustentar la realización de planes de emergencia y contingencias.
d) En el proceso de evaluación del riesgo es posible realizar consideraciones adicionales tales como la incidencia en los resultados de un eventual aumento en el nivel de amenaza sísmica para efectos de evaluación de la sensibilidad de los resultados para la toma de decisiones.

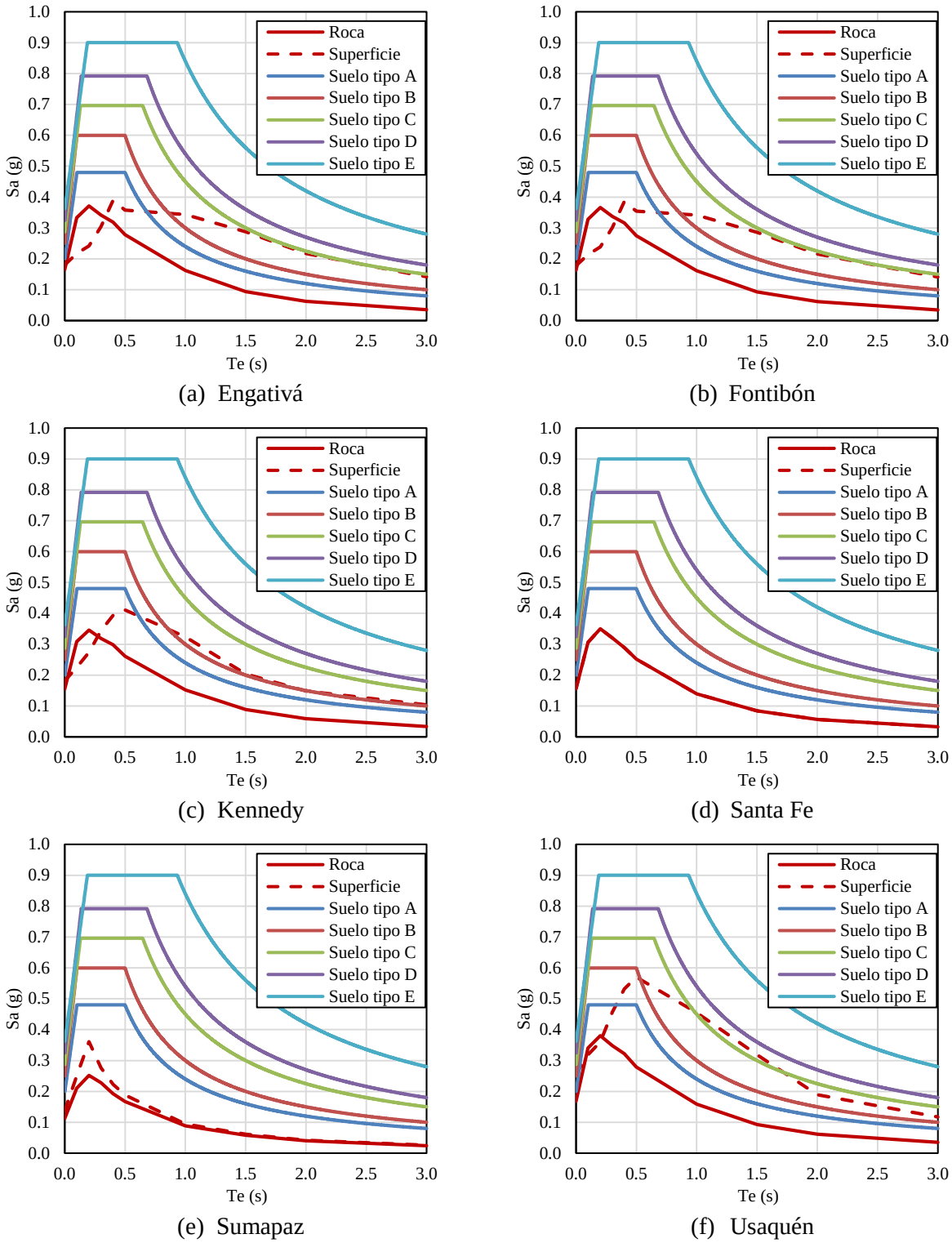


Figura 3-39. Comparación de los espectros de aceleración obtenidas por el modelo frente a los reportados en la CCP-14

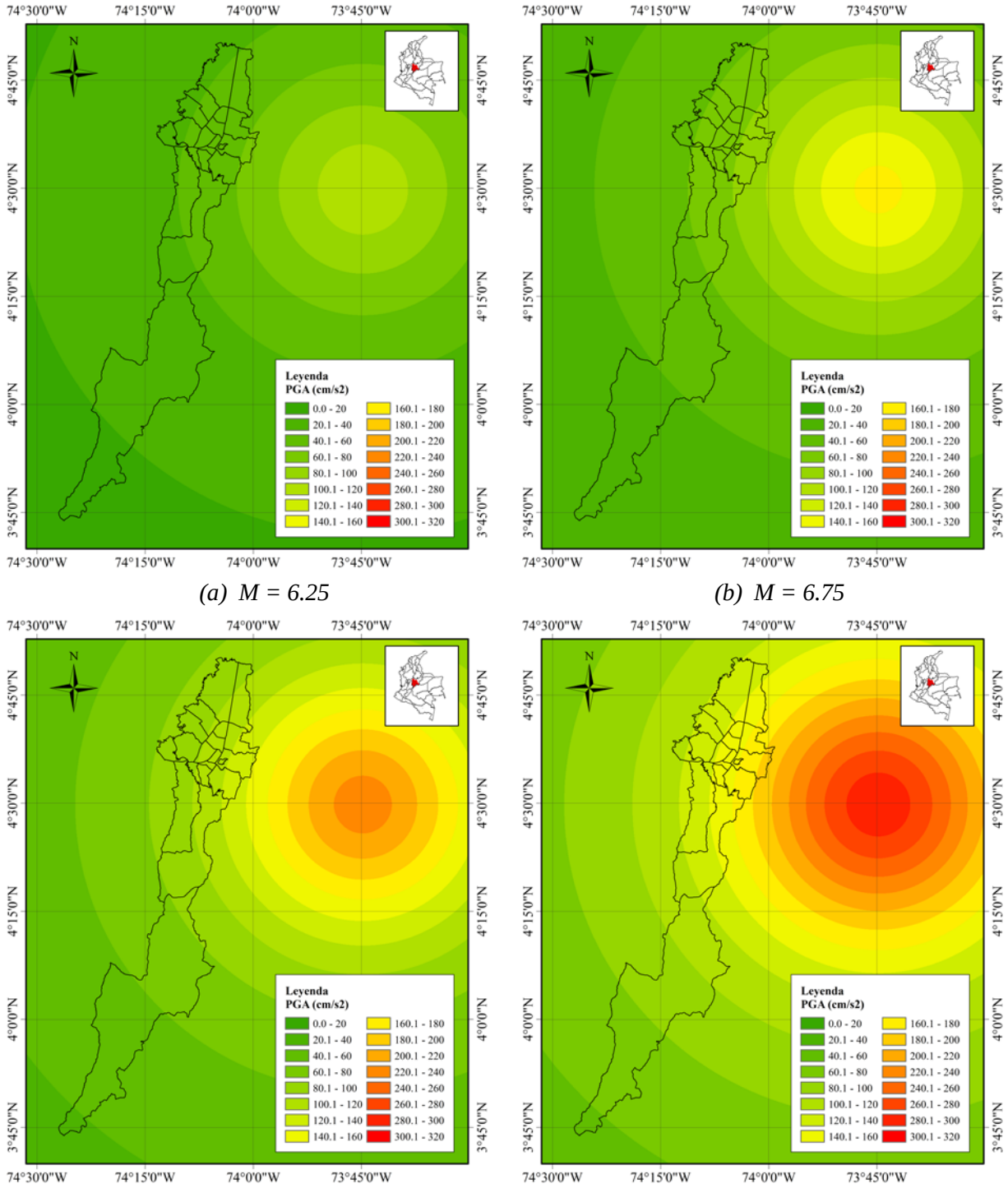
3.5 REPRESENTACIÓN MEDIANTE EVENTOS ESTOCÁSTICOS

La amenaza sísmica probabilista se puede desagregar en un conjunto de eventos estocásticos que representan todas las posibles combinaciones de magnitud y distancia de sismos que puedan afectar la zona de estudio, de forma consistente con la tasa de recurrencia de magnitudes de las diferentes fuentes. Cada uno de estos eventos estocásticos tiene una distribución de aceleraciones propia y una frecuencia anual de ocurrencia asignada, la cual es utilizada posteriormente para el análisis probabilista de riesgo sísmico.

Los resultados de la amenaza sísmica probabilista se representan mediante un conjunto de eventos estocásticos mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos que se agrupan en un archivo con formato AME (ver www.ecapra.org) componente que incluye toda la información de amenaza a nivel de la superficie del terreno para efectos de la evaluación del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad. En total se generaron alrededor de 10,000 eventos estocásticos para las cuales se calcularán las pérdidas esperadas en el análisis probabilista del riesgo sísmico a desarrollarse en la cuarta etapa del presente proyecto.

En la Figura 3-40 se presentan algunos escenarios sísmicos representativos para los análisis del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad.

(Espacio en blanco intencional)



(a) M = 6.25 *(b) M = 6.75*

(c) M = 7.25 *(d) M = 7.75*

Figura 3-40. Distribución de aceleraciones en roca para un periodo estructural de 0 segundos en eventos en la falla Frontal Cordillera Oriental

CAPITULO
4

4 LEVANTAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

4.1 GENERALIDADES

El levantamiento y procesamiento de información se llevó a cabo mediante un intenso y detallado trabajo que incluyó recopilación de información existente, levantamiento de información documental, visitas de inspección y levantamiento de información en campo, procesamiento de información en oficina y cargue de la información en los sistemas de información geográfica y las bases de datos relacionadas. Toda la información importante recopilada, procesada y generada en el proyecto se almacena en el sistema de información geográfica (SIGIDU) la cual contiene información para un total de 1006 puentes y estructuras registradas en la ciudad.

La información básica para cada uno de los puentes consiste en la información topográfica, geométrica y estructural. Esta información se completó mediante una estrategia de interpretación de información existente y levantamiento o verificación en campo de toda la información de la base de datos. Adicionalmente se llevó a cabo un proceso para evaluar y calificar el estado de los puentes de la ciudad. Para el efecto, de manera simultánea con el levantamiento de información geométrica y estructural, se realizó un registro fotográfico de detalle, que permitió posteriormente elaborar la evaluación y calificación del estado de los puentes por parte de ingenieros especialistas.

Por otro lado, se incluye también en la base de datos, información procesada de alta importancia, entre la cual se destacan los parámetros que representan la valoración económica de cada puente, la vulnerabilidad sísmica y el riesgo sísmico en términos de pérdidas anuales esperadas. Toda la información recopilada, procesada y almacenada en el sistema SIGIDU conforma un activo de la mayor importancia para la Entidad en los procesos de gestión del riesgo de la infraestructura de la ciudad. En los numerales siguientes se presenta en detalle la estructura final adoptada para conformar el sistema de información geográfica, y los procesos de recopilación, levantamiento y procesamiento de la información básica de los puentes.

4.2 RESUMEN DEL CONTENIDO DE LA BASE DE DATOS DE PUENTES

4.2.1 Información general

La base de datos de puentes de la ciudad contiene información de detalle de un total de 1006 puentes y estructuras registradas por el IDU en el Distrito Capital, y se presenta en el Anexo A-3. Cada uno de los puentes está identificado mediante su PKID. Los grupos de información principal que incluye la base de datos son los siguientes:

- Características generales de los puentes
- Información geométrica (ver numeral 4.6)
- Información estructural (ver numeral 4.6)
- Información de estado estructural y de servicio (ver numeral 4.7)

Esta información se presenta para cada uno de los componentes del puente tanto estructurales como los no estructurales. Además, se presenta información detallada de valoración económica (Capítulo 5), vulnerabilidad (Capítulo 6) y riesgo (Capítulo 7) para cada uno de los puentes, al igual que los archivos generados en los procesos de recopilación y procesamiento de información.

La base de datos de exposición final está representada por los parámetros indicados en la Tabla 4-1, mientras la Figura 4-1 presenta el resumen de la exposición en formato gráfico. Los mapas de distribución de los puentes de la ciudad según su uso se muestran en la Figura 4-2. La infraestructura de puentes expuesta a la amenaza se categoriza principalmente a través del uso principal del puente (vehicular o peatonal). Se aclara que la base de datos entregada incluye 1006 puentes y estructuras, los cuales corresponden al inventario entregado como parte del inicio del contrato. No obstante, dentro de la base de datos se encontraron estructuras que pueden no ser consideradas como estructuras ingenieriles de puentes como son los túneles, las alcantarillas y los puentes vernaculares o artesanales, los cuales se clasifican bajo el uso de Otros, y las razones para su exclusión de la base de datos se presentan en detalle en el Capítulo 6. Las estructuras que no son puentes tendrán información limitada en algunos campos y productos relacionados, pero se entregan en el nivel de completitud disponible. Únicamente para la evaluación del riesgo y la definición de estrategias de gestión del riesgo se realiza la exclusión de estas estructuras, pues la interpretación y análisis de la información en estas actividades sólo es válida para puentes. La exclusión de las estructuras que no son puentes, entre otras modificaciones de la base de datos (ver Anexo A-3), son entregadas como recomendaciones de este estudio, pero no son incorporadas por el consultor de manera definitiva, pues se entiende que el IDU podrá utilizar esta información y reasignarla al área responsable, según considere.

Dentro del portafolio de exposición conformado, los grupos de uso Vehicular y Peatonal representan alrededor del 95% de todas las estructuras del inventario, y los puentes Vehiculares acumulan el 87% del área construida y el 83% del valor económico expuesto del portafolio completo. Aunque los puentes Peatonales representan en número el 40% del inventario de la base de datos de exposición, agrupan únicamente el 12% del área construida y el 16% del valor económico expuesto. Las diferencias encontradas en la distribución porcentual de los atributos usados para caracterizar los puentes entre los grupos de uso Vehicular y Peatonal evidencian la necesidad de un análisis particular para cada uno de ellos.

Tabla 4-1. Caracterización de la exposición de los puentes según uso

Uso	Número	Dist. Porcentual (%)	Área Construida (m^2)	Dist. Porcentual (%)	Valor expuesto (COPS millones)	Dist. Porcentual (%)
Vehicular	554	55.07	552,330	87.16	$ 3,355,341	82.50
Peatonal	405	40.26	74,198	11.71	$ 655,461	16.12
Otro	47	4.67	7,152	1.13	$ 56,115	1.38
TOTAL	**1006**	**100.00**	**633,680**	**100.00**	**$ 4,066,917**	**100.00**

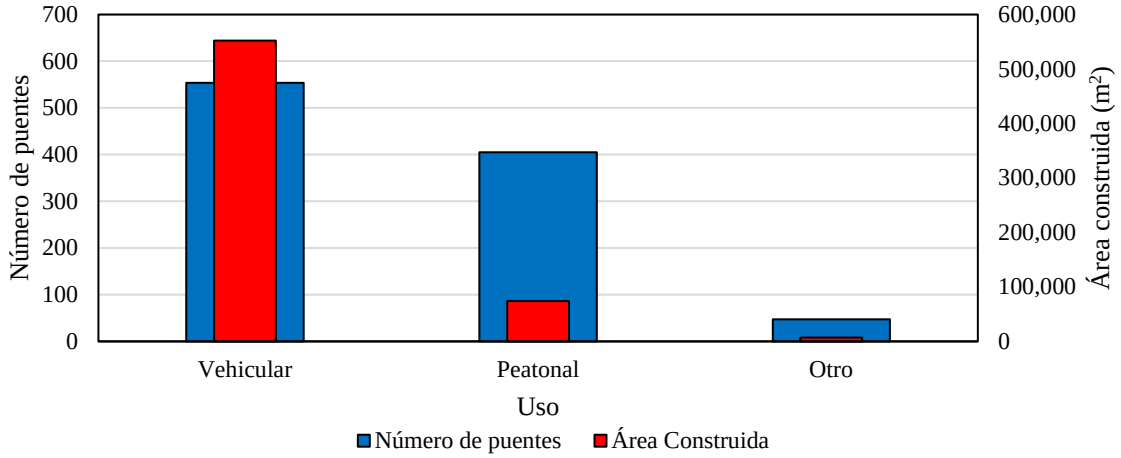


Figura 4-1. Número de puentes y área construida por uso

4.2.2 Caracterización de estructuras con otros usos

Por último, se caracterizan las estructuras que existen dentro de la base de datos de exposición con uso clasificado como Otro. Como se presenta en la Tabla 4-2, existen 47 estructuras que no pueden ser caracterizados como puentes. Las 21 alcantarillas, 9 túneles, 7 puentes vehiculares vernaculares, y 10 puentes peatonales vernaculares asociados a la exposición no serán tenidos en cuenta en los posteriores análisis de riesgo al no ser estructuras que pueden clasificarse como puentes, por lo que no se encuentran dentro del alcance del presente proyecto.

Tabla 4-2. Caracterización de la exposición para las estructuras con otros usos

Tipología	Número	Dist. Porcentual (%)	Área Construida (m^2)	Dist. Porcentual (%)
Alcantarillas	21	2.09	3,722	0.59
Túneles	9	0.89	3,064	0.48
Vehiculares vernaculares	7	0.70	250	0.04
Peatonales vernaculares	10	0.99	116	0.02
TOTAL	**47**	**4.67**	**7,152**	**1.13**

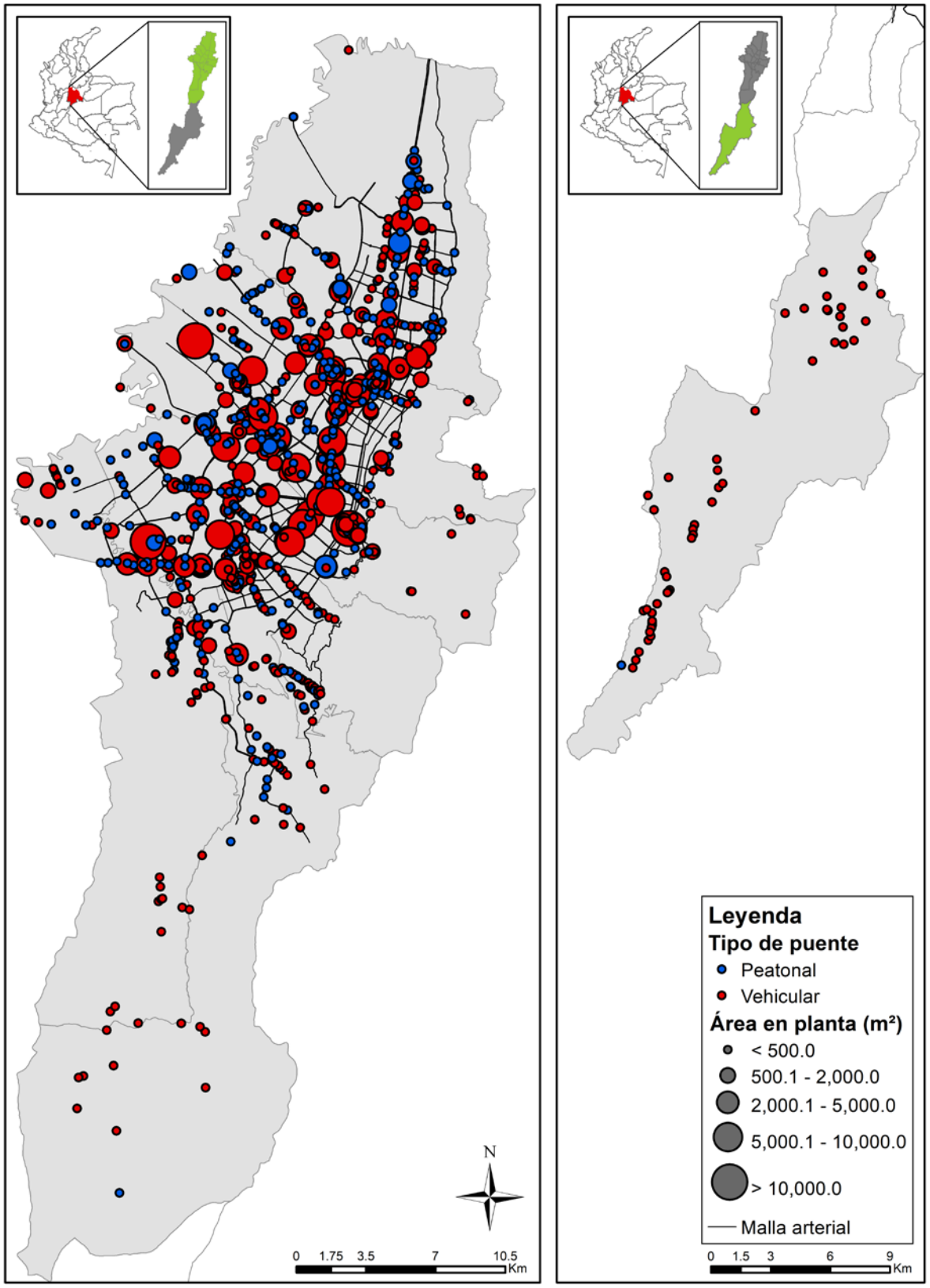


Figura 4-2. Distribución geográfica de los puentes por uso: Vehicular y Peatonal

4.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y BASE DE DATOS

4.3.1 Generalidades

La base de datos geográfica de puentes tiene como objetivo almacenar la información general, geométrica, estructural y patológica del inventario, realizar análisis estadísticos, priorización de mantenimientos o intervenciones, entre otros atributos del inventario de puentes de la ciudad de Bogotá D.C. De igual manera, la base de datos constituye el insumo base para la definición de la vulnerabilidad sísmica, los costos de reparación o reconstrucción y la evaluación probabilista del riesgo sísmico. En este numeral se presenta la definición de los campos de la base de datos, el diseño conceptual de la misma para conformar el modelo y la consolidación de la información producto del proyecto.

4.3.2 Definición de campos de la base de datos

La actividad definición de los campos de la base de datos geográfica se basó en determinar el mayor número de atributos de caracterización de los puentes del inventario, manteniendo una base de datos de fácil implementación y actualización. Con este objetivo, los campos establecidos en la base de datos son producto de una actividad realizada por la Universidad luego de adelantarse mesas de trabajo con la Dirección Técnica Estratégica (DTE) y la Dirección Técnica de Administración de Infraestructura (DTAI). En estas se consideraron los requerimientos para asegurar un adecuado modelo de gestión orientado hacia la conservación de la infraestructura de puentes de la Ciudad. A continuación, se presentan los elementos que conforman la base de datos:

- Capa principal de datos vectoriales con información general y de ubicación:
  - Puente.
- Cuatro (4) capas de datos vectoriales de caracterización estructural de los puentes que almacena información geométrica, estructural y patológica:
  - Apoyos Intermedios.
  - Viga.
  - Tablero.
  - Juntas.
- Diez (10) tablas de información relacionada distribuidas de la siguiente manera:
  - Dos (2) tablas de caracterización estructural que almacenan información geométrica, estructural y patológica:
    - Características generales.
    - Apoyos extremos.
  - Cuatro (4) tablas de caracterización de elementos de servicio que almacenan información geométrica, estructural y patológica de dichos componentes e indican su existencia en el puente:
    - Elementos de servicio – No estructurales.
    - Elementos de servicio – Estructurales.
    - Elementos de servicio – Geométricos.

    - Elementos de servicio – Patológicos.
- Dos (2) tablas de caracterización patológicas de las inspecciones básicas realizadas sobre apoyos intermedios y vigas, proveniente de las inspecciones básicas realizadas en todos los puentes:
    - Inspección básica de apoyos intermedios
    - Inspección básica de vigas
- Una (1) tabla con la información asociada al riesgo sísmico de los puentes:
    - Riesgo.
- Una (1) tabla con el inventario de archivos generados por las actividades de inspección básica, inspección detallada y levantamiento topográfico:
    - Archivos.

4.3.3 Modelo de base de datos geográfica

La arquitectura de la base de datos geográfica es implementada en un modelo relacional, en el cual la información es almacenada en tablas DBMS que contienen en cada columna un atributo de caracterización y en cada fila la información específica para cada uno de los puentes del inventario. Es modelada por medio de una GeoDataBase "INFRAESTRUCTURA_PUENTE" compuesta por un (1) Feature Dataset "Puente" el cual contiene cinco (5) Feature Class o capas de datos vectoriales, diez (10) tablas de atributos y catorce (14) relaciones que permiten almacenar asociaciones entre entidades; su estructura general se presenta en la Figura 4-3.

Las capas de información vectorial y las tablas relacionadas tienen un identificador único asociado al campo cuyo nombre inicia con *PK_ID* y que corresponde a la llave primaria en cada tabla de atributos. A continuación, se presentan los tipos de llaves primarias presentes en la base de datos:

- *PK_ID_Puente*: Código de ocho (8) dígitos correspondiente al identificador único de cada puente del inventario, es la llave primaria de la capa ***Puente***.

- *PK_ID_CaractGeneral*: Código de diez (10) dígitos correspondiente a la combinación del identificador único de cada puente del inventario y un identificador de dos (2) dígitos que es único para cada tabla relacionada. Esta cadena numérica se conforma de la misma manera para todas las tablas relacionadas, las cuales se listan a continuación junto con su correspondiente identificador:
    - *PK_ID_CaractGeneral* – 01.
    - *PK_ID_ApoyoExtremo* – 02.
    - *PK_ID_ElemServicioNoEstr* – 03.
    - *PK_ID_ElemServicioGeom* – 04.
    - *PK_ID_ElemServicioEstr* – 05.
    - *PK_ID_ElemServicioPato* – 06.
    - *PK_ID_Riesgo* – 07.
    - *PK_ID_Archivos* – 08.

- *PK_ID_ApoyoIntermedio*: Código de once (11) dígitos que se obtiene al concatenar el identificador único de cada puente (8), el tipo de elemento (1) y el consecutivo del número asignado a los apoyos intermedios en cada puente (2). Las llaves primarias de todas las capas de datos vectoriales se conforman de la misma manera y se almacenan en los siguientes atributos:
  - *PK_ID_Viga*
  - *PK_ID_Tablero*
  - *PK_ID_Junta*

- *PK_ID_InspBasicaAI*: Código de trece (13) dígitos que resulta de concatenar el identificador único de cada apoyo intermedio (11) y el consecutivo del subelemento evaluado (2). La llave primaria *PK_ID_InspBasicaV* se conforma de la misma manera.

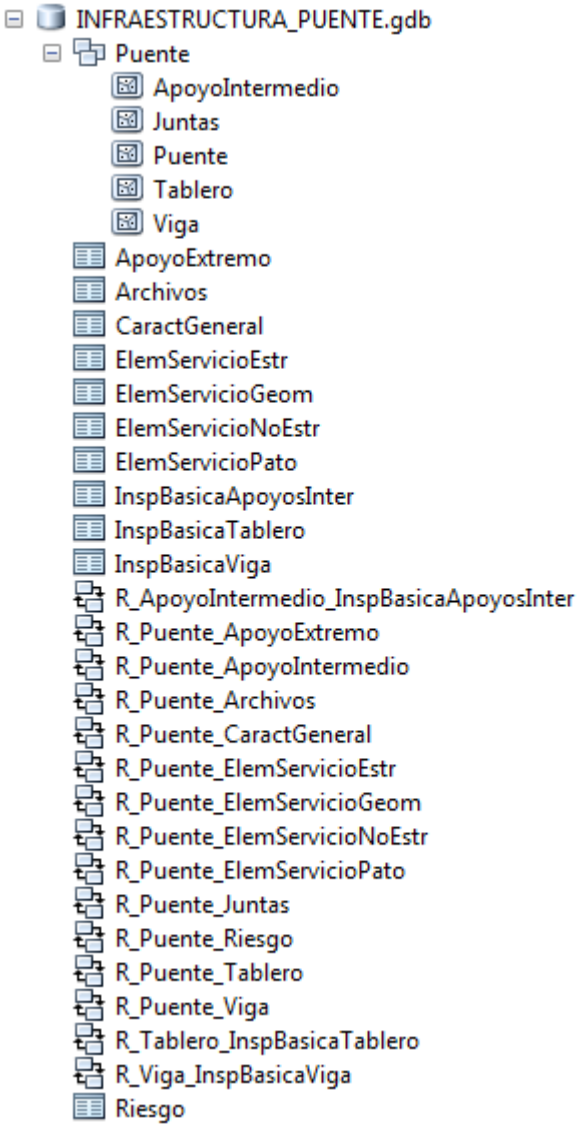


Figura 4-3. Estructura de la GeoDataBase INFRAESTRUCTURA_PUENTE.gdb

4.3.3.1 Diseño lógico

El diseño lógico de la base de datos consiste en la definición de los atributos o campos que componen cada una de las tablas que conforma el modelo de base de datos. A continuación se listan las cinco (5) capas de datos vectoriales junto con una breve descripción de su contenido general y los atributos que las componen:

- ***Puente:*** Inventario actualizado de los puentes de Bogotá representados como polígonos con 25 atributos de información general, ubicación y calificaciones finales de patología. Esta es la capa principal de datos vectoriales, por consiguiente, contiene el identificador único para cada puente (*PK_ID_Puente*) y al que se relacionan las demás capas de datos vectoriales y las 12 tablas relacionadas, de manera directa o indirecta. A continuación se listan los campos de la capa junto con una breve descripción de su definición (Ver Tabla 4-3). Para la Tabla 4-3 a Tabla 4-8 se identifica el tipo de atributo, el nombre o alias del campo y la descripción del mismo.

Tabla 4-3. Atributos de la capa vectorial Puente

Tipo	Nombre	Descripción
Identificación	PK_ID_Puente	Llave primaria y código único de cada puente
General	CIV	Código de Identificación Vial
	Uso	Hace relación a la funcionalidad para la cual fue construido
	Obstáculo	Determina el tipo de obstáculo que salva la estructura
	Malla Vial	Subsistema vial en el cual se encuentra el puente
	Red Vital	Clasificación otorgada a los puentes de acuerdo a la definición de la Red de Emergencia de Bogotá.
	Red de Transmilenio	Se define de acuerdo si hace parte del sistema Transmilenio, sea un acceso peatonal o vía por la que transitan los articulados
	Troncal de Transmilenio	Puentes localizados sobre las Troncales Transmilenio, donde los puentes vehiculares hacen parte de la troncal (Los buses Transmilenio circulan por estos puentes) y en el caso de los puentes peatonales estos permiten el paso peatonal sobre la troncal y en algunos casos dan acceso a las estaciones de Transmilenio.
	Nivel de Puente	Determina las diferencias de altura en los segmentos comprometidos con relación a la rasante del terreno
	Año de Construcción	Año de construcción del puente.
Ubicación	Ubicación	Descripción del lugar en donde se localiza el puente, incluye la nomenclatura vial.
	Código de Vía	Código numérico asignado a la vía sobre la cual se localiza el puente
	Localidad	División del territorio Distrital, teniendo en cuenta las características sociales de sus habitantes y de acuerdo al reparto de

Tabla 4-3. Atributos de la capa vectorial Puente

Tipo	Nombre	Descripción
		competencias y funciones administrativas asignadas por el Concejo Distrital
	Unidad de planeamiento (UPZ)	Unidades territoriales de análisis, planeamiento y gestión que tienen como propósito definir y precisar el planeamiento del suelo urbano, de expansión y rural.
	Tipo de suelo	Determina el tipo de suelo en donde se localiza el puente destinado a usos urbanos, rurales y de expansión por el Plan de Ordenamiento Territorial. Obedece a la clasificación del suelo definida en el artículo 145 “Clases de suelo” del Decreto 190 de 22 de junio de 2004.
	Límite del Distrito	Determina si el puente se encuentra ubicado en el límite del Distrito
	Vía que cruza	Indica la vía que es cruzada por el puente
	Cuerpo de agua que cruza	Indica el cuerpo de agua que es cruzado por el puente
	Zona Geotécnica	Indica la zona geotécnica sobre la que se encuentra el puente
	Zona Microzonificación Sísmica	Indica la zona de microzonificación sísmica en la que localiza el puente
Patológico	Estado de la superestructura	Calificación general del estado de la superestructura, asociada al máximo nivel de condición patológica que contenga uno de sus elementos. Incluye Vigas, Tablero y Características Generales.
	Estado de la subestructura	Calificación general del estado de la subestructura, asociada al máximo nivel de condición patológica que contenga uno de sus elementos. Incluye Apoyos Intermedios, Características Generales
	Estado de las conexiones	Calificación general del estado de las conexiones y elementos especiales, asociada al máximo nivel de condición patológica que contenga uno de sus elementos. Incluye Juntas y Características Generales
	Clasificación TES	Clasificación del estado de los elementos de servicio del puente de acuerdo a la evaluación de patologías por la metodología TES.
	Calificación de estado de servicio	Calificación general de estado de servicio del puente

- ***ApoyoIntermedio:*** Capa de datos vectoriales que representa, para cada puente existente en el inventario, los elementos estructurales principales que componen los apoyos intermedios como polígonos. Cada apoyo intermedio se caracteriza a través de 29 atributos que contienen la información geométrica, estructural, patológica. La Tabla 4-4 presenta los campos de la capa junto con una breve descripción de su definición.

Tabla 4-4. Atributos de la capa vectorial ApoyoIntermedio

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	Tipo	Tipo de elemento identificado
	Consecutivo	Consecutivo del numero asignado a cada apoyo intermedio. Inicia en 02 dado que en la cartografía los ejes del puente (apoyos extremos e intermedios) son nombrados desde el apoyo extremo inicial iniciando en 01.
	PK_ID_ApoyoIntermedio	Código único de identificación para cada uno de los apoyos intermedios de cada puente. Concatenado del PKID del Puente + Tipo + Consecutivo.
Geométrico	Número de elementos por eje	Número de elementos por eje para el apoyo intermedio
	Altura	Altura de la sección transversal de los elementos del apoyo intermedio
	Ancho	Ancho de la sección transversal de los elementos del apoyo intermedio
	Espesor	Espesor de la sección transversal de los elementos del apoyo intermedio (Pantalla)
	Diámetro	Diámetro de la sección transversal de los elementos del apoyo intermedio (Péndulo)
	Longitud	Longitud del elemento típico que compone el apoyo intermedio
	Ancho viga cabezal	Ancho de la sección de la viga cabezal
	Alto viga cabezal	Alto de la sección de la viga cabezal
	Ancho viga transversal	Ancho de la sección de la viga transversal entre pilas
	Alto viga transversal	Alto de la sección de la viga transversal entre pilas
Estructural	Material	Material de los elementos del apoyo intermedio
	Tipología del apoyo	Tipología del apoyo intermedio
	Sección transversal del apoyo	Tipología de la sección transversal de los elementos del apoyo intermedio
	Tipo de sección	Tipo de sección de los elementos del apoyo intermedio
	Capitel	Define si los elementos del apoyo intermedio cuentan con capitel
	Viga cabezal	Define si el apoyo intermedio cuenta con viga cabezal o no
	Material viga cabezal	Indica el material de los elementos del apoyo intermedio
	Viga transversal en columnas	Define si los elementos de la luz se encuentran arriostrados fuera de los apoyos por un elemento transversal
	Parrilla	Define si los elementos de la luz presentan parrilla. Únicamente cuando la viga es tipo Transmilenio
	Llaves de cortante	Define si los elementos de la luz presentan llaves de cortante para disipar energía o restringir el movimiento en un evento sísmico
	Tope sísmico	Define si el apoyo intermedio cuenta con topes sísmicos o no
Patológico	Número de elementos en condición Buena	Número de elementos en el apoyo intermedio en condición Buena

Tabla 4-4. Atributos de la capa vectorial ApoyoIntermedio

Tipo	Nombre	Descripción
	Número de elementos en condición Regular	Número de elementos en el apoyo intermedio en condición Regular
	Número de elementos en condición Mala	Número de elementos en el apoyo intermedio en condición Mala
	Número de elementos en condición Peligrosa	Número de elementos en el apoyo intermedio en condición Peligrosa

- ***Viga:*** Para cada puente del catálogo, esta capa representa la viga o conjunto de vigas que componen cada luz del puente, representadas como polígonos. Cada viga o conjunto de vigas se define por medio de 26 atributos de tipo geométrico, estructural y patológico. En la Tabla 4-5 se listan los campos de la capa junto con una breve descripción de su definición.

Tabla 4-5. Atributos de la capa vectorial Viga

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	Tipo	Tipo de elemento identificado
	Consecutivo	Consecutivo del número asignado a cada luz del puente
	PK_ID_Viga	Código único de identificación de cada grupo de vigas por luz en cada puente. Concatenado del PKID del Puente + Tipo + Consecutivo.
Geométrico	Número de elementos den la luz	Número de vigas en la luz evaluada
	Altura	Altura típica de las vigas que componen la luz
	Ancho	Ancho típico de las vigas que componen la luz
	Espesor	Depende del material y la tipología de la sección transversal de los elementos.
	Longitud	Longitud de las vigas en la luz evaluada
	Espaciamiento de vigas	Espaciamiento promedio de las vigas en la luz. Debe existir más de una viga en la luz.
	Número de riostras por luz	Número de riostras por luz
	Ancho de silla al inicio	Ancho de silla predominante en los elementos al inicio de la luz.
	Ancho de silla al final	Ancho de silla predominante en los elementos al final de la luz.
Estructural	Material	Material de los elementos
	Sección transversal de la viga	Tipología de la sección transversal de los elementos por luz:
	Tipo de sección transversal	Define el tipo de sección transversal de viga
	Preesforzado	Define si los elementos de la luz se encuentran preesforzados; ya sea pre o postensado
	Riostras	Define si los elementos de la luz se encuentran arriostrados fuera de los apoyos por un elemento transversal
	Diafragma inicio	Define si las vigas presentan un diafragma al inicio de los elementos
	Diafragma final	Define si las vigas presentan un diafragma al final de los elementos
	Tipo de apoyo al inicio	Define el tipo de apoyo de la superestructura y la sub estructura, al inicio de los elementos

Tabla 4-5. Atributos de la capa vectorial Viga

Tipo	Nombre	Descripción
	Tipo de apoyo al final	Define el tipo de apoyo de la superestructura y la sub estructura al final de los elementos
Patológico	Número de elementos en condición Buena	Número de elementos en la luz en condición Buena
	Número de elementos en condición Regular	Número de elementos en la luz en condición Regular
	Número de elementos en condición Mala	Número de elementos en la luz en condición Mala
	Número de elementos en condición Peligrosa	Número de elementos en la luz en condición Peligrosa

- ***Tablero:*** Capa que representa como polígonos el o los tableros que componen el puente. Presenta 13 atributos de caracterización geométrica y estructural. A continuación se describen los campos de la capa (Ver Tabla 4-6).

Tabla 4-6. Atributos de la capa vectorial Tablero

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	Tipo	Tipo de elemento identificado
	Consecutivo	Consecutivo del número asignado a cada tablero que tenga el puente
	PK_ID_Tablero	Código único de identificación para cada tablero en cada puente. Concatenado del PKID del Puente + Tipo + Consecutivo
Geométricos	Longitud	Longitud total del tablero
	Ancho	Ancho total del tablero incluyendo elementos de servicios
	Angulo de esviaje	Se presenta cuando la forma del tablero en planta no es un rectángulo
	Ancho de berma	Ancho de las bermas en caso de existir en el puente
	Cambio de ancho	Determina si el puente presenta o no el cambio de ancho del tablero
Estructurales	Material	Material de los elementos del tablero
	Sistema de Piso	Tipología de tablero
	Material de la carpeta de rodadura	Material carpeta de rodadura (PV) o carpeta transitable (PP)
	Preesforazamiento	Define si el tablero se encuentra preesforzado; bien sea por pre o postensado

- ***Juntas***: La capa de datos vectorial que almacena la información geométrica, estructural y patológica de la junta o juntas del puente, representadas como líneas. Cada uno de las entidades de la capa se caracteriza a través de 12 atributos. La Tabla 4-7 contiene los campos de la capa junto con una breve descripción de su definición.

Tabla 4-7. Atributos de la capa vectorial Juntas

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	Tipo	Tipo de elemento identificado
	Consecutivo	Consecutivo del numero asignado a cada junta que tenga el puente
	PK_ID_Juntas	Código de identificación único para cada junta en cada puente. Concatenado del PKID del Puente + Tipo + Consecutivo.
Geométricos	Longitud	Longitud de la junta
	Ancho	Ancho de la junta
Estructurales	Tipo de Junta	Elementos que permiten los movimientos relativos entre dos partes del puente
Patológicos	Alineación	Determina la condición de alineación de la junta
	Filtración	Determina la condición de filtración de la junta
	Elementos protectivos de acero	Determina la condición de deterioro de los elementos y protectores en acero
	Carpeta de rodadura adyacentes	Determina la condición de deterioro del tablero o carpeta de rodadura adyacente
	Sellamiento	Determina la condición del sellamiento de la junta

A continuación se describen las diez (10) tablas relacionadas que complementan las capas vectoriales.

- ***CaractGeneral:*** La tabla secundaria almacena las características generales geométricas, estructurales y patológicas de los puentes del inventario. Cada entidad está compuesta por 30 atributos, los cuales se listan a continuación junto con una breve descripción.

Tabla 4-8. Atributos de la tabla relacionada CaractGeneral

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_CaractGeneral	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 01.
Geométricos	Ancho de la estructura	Ancho total del puente
	Longitud de la estructura	Longitud total del puente. Incluye rampas, accesos y escaleras
	Área de la estructura	Área total en planta de la estructura. Incluye rampas, accesos y escaleras.
	Número de luces	Número de luces del puente
	Número de apoyos intermedios	Número de apoyos intermedios de todo el puente
	Número de juntas	Número de juntas en todo el puente
	Gálibo máximo	Gálibo vertical máximo del puente
	Gálibo mínimo	Galibo vertical mínimo del puente
	Ancho de calzada	Ancho de la calzada
	Número de carriles	Número de carriles del puente. En puentes peatonales debe ser 1
	Número de carriles bajo el puente	Número de carriles bajo el puente
	Número de cables	Número de cables en la estructura. Únicamente para puentes atirantados o de arco superior

Tabla 4-8. Atributos de la tabla relacionada CaractGeneral

Tipo	Nombre	Descripción
	Número de tensor / pendolón / péndola	Número de tensores, pendolones o péndolas en la estructura. Únicamente para puentes atirantados o de arco superior
	Número de anclajes de cable / tensor / pendolón / péndola	Número de anclajes de cables, tensores, pendolones o péndolas. Únicamente para puentes atirantados o de arco superior
	Número de desviadores	Número de desviadores. Únicamente para puentes atirantados o de arco superior
	Número de macizos	Número de macizos en la estructura. Únicamente para puentes atirantados o de arco superior
	Número de ménsulas	Número de ménsulas de la estructura
Estructurales	Continuo	Determina si la súper estructura es continua entre los apoyos más extremos
	Elementos de reforzamiento	Determina si existen elementos de reforzamiento en el puente
	Cables	Determina si existen cables en la estructura. Únicamente en puentes con apoyos intermedios atirantados o en arco superior
	Tensor / pendolón / péndola	Determina si existen tensores, pendolones o péndolas en la estructura. Únicamente en puentes con apoyos intermedios atirantados o en arco superior
	Anclajes de cable / tensor / pendolón / péndola	Determina si existen anclajes de tensores, pendolones o péndolas en la estructura. Únicamente en puentes con apoyos intermedios atirantados o en arco superior
	Desviador	Determina si existen desviadores de cables en la estructura
	Macizo	Determina si existen macizos donde se anclen cables
	Ménsula	Determina si existen ménsulas en la estructura
	Material ménsula	Determina el material de las ménsulas
Patológicos	Calificación cables	Calificación de los cables según la patología específica a su tipología
	Calificación tensor(es) / pendolón(es) / péndola(s)	Calificación de tensores, pendolones o péndolas según la patología específica a su tipología

- ***ApoyoExtremo:*** En esta tabla se encuentran las características correspondientes a los apoyos extremos de cada puente. Cada puente está caracterizado con 12 atributos geométricos, estructurales y patologías de los apoyos extremos.

Tabla 4-9. Atributos de la tabla relacionada ApoyoExtremo

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_ApoyoExtremo	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 02.
Geométricos	Número de aletas del estribo inicial	Número de aletas del estribo inicial
	Número de aletas del estribo final	Número de aletas del estribo final
Estructurales	Material del apoyo extremo inicial	Material del apoyo extremo inicial
	Material del apoyo extremo final	Material del apoyo extremo final

Tabla 4-9. Atributos de la tabla relacionada ApoyoExtremo

Tipo	Nombre	Descripción
	Tipo de sección de apoyo extremo inicial	Tipo de sección de apoyo extremo inicial
	Tipo de sección de apoyo extremo final	Tipo de sección de apoyo extremo final
	Aleta o aletas en el estribo inicial	Determina si el estribo inicial presenta aletas
	Aleta o aletas en el estribo final	Determina si el estribo final presenta aletas
Patológicos	Calificación del apoyo extremo inicial	Calificación del apoyo extremo inicial según la patología especifica a su tipología
	Calificación del apoyo extremo final	Calificación del apoyo extremo final según la patología específica a su tipología

- ***ElemServicioNoEstr:*** Define la existencia de los 15 atributos que describen los tipos de elementos de servicio posibles establecidos para puentes vehiculares y peatonales.

Tabla 4-10. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioNoEstr

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_ElemServicioNoEstr	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 03.
No Estructurales	Rampa(s) de acceso	Determina si el puente cuenta con al menos una rampa de acceso
	Escalera(s) de acceso	Determina si el puente cuenta con al menos una escalera de acceso
	Bordillo derecho	Determina si el puente cuenta con bordillo en su borde derecho
	Bordillo izquierdo	Determina si el puente cuenta con el bordillo en su borde izquierdo
	Baranda derecha	Determina si el puente cuenta baranda en su borde derecho
	Baranda izquierda	Determina si el puente cuenta baranda en su borde izquierdo
	Anden derecho	Determina si el puente cuenta con anden en su borde derecho
	Anden izquierdo	Determina si el puente cuenta con anden en su borde izquierdo
	Cerramiento	Determina si el puente cuenta con cerramiento en el apoyo extremo inicial
	Separador	Determina si el puente cuenta con separadores
	Sistema de drenaje	Determina si el puente cuenta con sistema de drenaje
	Pérgola	Determina si el puente cuenta pérgolas
	Ascensor	Determina si el puente cuenta con ascensor de acceso peatonal

- ***ElemServicioGeom:*** Tabla que almacena las características geométricas (29 posibles atributos) de los tipos de elementos de servicio establecidos en la tabla relacionada ***ElemServicioNoEstr*** en caso de existir.

Tabla 4-11. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioGeom

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_ElemServicioGeom	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 04.
Geométricos	Número de rampas de acceso	Número total de rampas del puente
	Longitud de rampas de acceso	Longitud total de la(s) rampa(s) de acceso
	Ancho de rampa de acceso	Ancho típico de la(s) rampa(s) de acceso
	Número de escaleras de acceso	Número total de escaleras del puente
	Longitud de escaleras de acceso	Longitud total de la(s) escalera(s) del puente
	Ancho de escaleras de acceso	Ancho típico de la(s) escalera(s) del puente
	Ancho bordillo derecha	Ancho del elemento en el costado derecho del puente
	Ancho bordillo izquierda	Ancho del elemento en el costado izquierdo del puente
	Alto bordillo derecha	Alto del elemento en el costado derecho del puente
	Alto bordillo izquierda	Alto del elemento en el costado izquierdo del puente
	Longitud bordillo derecha	Longitud del elemento en el costado derecho del puente
	Longitud bordillo izquierda	Longitud del elemento en el costado izquierdo del puente
	Ancho baranda derecha	Ancho del elemento en el costado derecho del puente
	Ancho baranda izquierda	Ancho del elemento en el costado izquierdo del puente
	Alto baranda derecha	Alto del elemento en el costado derecho del puente
	Alto baranda izquierda	Alto del elemento en el costado izquierdo del puente
	Longitud baranda derecha	Longitud del elemento en el costado derecho del puente
	Longitud baranda izquierda	Longitud del elemento en el costado izquierdo del puente
	Ancho anden derecha	Ancho del elemento en el costado derecho del puente
	Ancho anden izquierda	Ancho del elemento en el costado izquierdo del puente
	Alto anden derecha	Alto del elemento en el costado derecho del puente
	Alto anden izquierda	Alto del elemento en el costado izquierdo del puente
	Longitud anden derecha	Longitud del elemento en el costado derecho del puente

Tabla 4-11. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioGeom

Tipo	Nombre	Descripción
	Longitud anden izquierda	Longitud del elemento en el costado izquierdo del puente
	Ancho separador	Ancho del elemento separador del puente
	Alto separador	Alto del elemento separador del puente
	Longitud separador	Longitud del elemento separador del puente

- ***ElemServicioEstr:*** Define el material (8 posibles atributos) de los elementos de servicio establecidos en la tabla relacionada ***ElemServicioNoEstr*** en caso de existir.

Tabla 4-12. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioEstr

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_ElemServicioEstr	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 05.
Estructurales	Material de la rampa de acceso	Material de la rampa de acceso
	Material de la carpeta de la rampa	Material de la carpeta de la rampa
	Material de la escalera de acceso	Material de la escalera de acceso
	Material baranda	Material de la(s) baranda(s)
	Material anden	Material del o los andenes
	Material separador	Material del o los separadores

- ***ElemServicioPato:*** Almacena la calificación final de patología para los elementos de servicio establecidos en la tabla relacionada ***ElemServicioNoEstr*** en caso de existir.

Tabla 4-13. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioPato

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_ElemServicioPato	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 06.
Patológicos	Calificación de la(s) rampa(s) de acceso	Calificación de la(s) rampa(s) de acceso según la patología específica a su material
	Calificación carpeta de rodadura	Calificación carpeta de rodadura según la patología específica a su material
	Calificación de la(s) escalera(s) de acceso	Calificación de la(s) escalera(s) de acceso según la patología específica a su material
	Calificación del andén y/o bordillo	Calificación del andén y/o bordillo según la patología específica a su(s) material(es)
	Calificación de la baranda	Calificación de la baranda según la patología específica a su material

Tabla 4-13. Atributos de la tabla relacionada ElemServicioPato

Tipo	Nombre	Descripción
	Calificación del guardarruedas	Calificación del guardarruedas según la patología específica a su material
	Calificación del cerramiento	Calificación del cerramiento según la patología específica a su material

- ***InspBasicaAI:*** En esta tabla se encuentran las calificaciones patológicas de cada uno de los elementos para cada apoyo intermedio que se encuentre recopilado en la capa ***ApoyoIntermedio***.

Tabla 4-14. Atributos de la tabla relacionada InspBasicaAI

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_ApoyoIntermedio	Llave foránea y código único de cada apoyo intermedio
Identificación	Tipo	Tipo de elemento identificado
	Consecutivo	Consecutivo del numero asignado a cada apoyo intermedio. Inicia en 02 dado que en la cartografía los ejes del puente (apoyos extremos e intermedios) son nombrados desde el apoyo extremo inicial iniciando en 01.
	Subelemento	ID del subelemento a evaluar en cada apoyo intermedio.
	PK_ID_InspBasicaAI	Código de identificación único de cada elemento en cada apoyo intermedio para cada puente. Concatenado del FK_ID_ApoyoIntermedio + Subelemento
Patológicos	Descascaramiento/Refuerzo expuesto	Condición de descascaramiento o refuerzo expuesto del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Eflorescencia/Oxidación	Condición de oxidación o eflorescencia del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Abrasión	Condición de abrasión del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Asentamiento	Condición de asentamiento del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Socavación	Condición de socavación del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Fisuración	Condición de fisuración del elemento.CR - Concreto Reforzado
	Daño por impacto/colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Desprendimiento del mortero	Condición de desprendimiento del mortero del elemento. MA - Mampostería
	Descascaramiento/Abrasión	Condición de descascaramiento o abrasión del elemento. MA - Mampostería
	Fractura o fisuración	Condición de fractura o fisuración del elemento. MA - Mampostería
	Desplazamiento de los bloques	Condición de desplazamiento de bloques del elemento. MA - Mampostería
	Asentamiento	Condición de asentamiento del elemento. MA - Mampostería
	Socavación	Condición de socavación del elemento. MA - Mampostería

Tabla 4-14. Atributos de la tabla relacionada InspBasicaAI

Tipo	Nombre	Descripción
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. MA - Mampostería
	Corrosión	Condición de corrosión del elemento. AC - Acero.
	Fisuración/Fractura	Condición de fisuración o fractura del elemento. AC - Acero
	Conexiones	Condición de conexiones del elemento. AC - Acero
	Distorsión	Condición de distorsión del elemento. AC - Acero.
	Desalineamiento / Perdida de eje	Condición de desalineamiento del elemento. AC - Acero
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. AC - Acero
	Socavación	Condición de socavación del elemento. AC - Acero
	Asentamiento	Condición de asentamiento del elemento. AC - Acero
	Descascaramiento/Refuerzo expuesto	Condición de descascaramiento o refuerzo expuesto del elemento. VC - Viga Cabezal y CR - Concreto Reforzado
	Eflorescencia/Oxidación	Condición de oxidación o eflorescencia del elemento. VC - Viga Cabezal y CR - Concreto Reforzado
	Abrasión	Condición de abrasión del elemento. VC - Viga Cabezal y CR - Concreto Reforzado
	Asentamiento	Condición de asentamiento del elemento VC - Viga Cabezal y CR - Concreto Reforzado
	Socavación	Condición de socavación del elemento. VC - Viga Cabezal y CR - Concreto Reforzado
	Fisuración	Condición de fisuración del elemento. VC - Viga Cabezal y CR - Concreto Reforzado
	Daño por impacto/colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. VC - Viga Cabezal y CR - Concreto Reforzado
	Corrosión	Condición de corrosión del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero
	Fisuración/Fractura	Condición de fisuración o fractura del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero
	Conexiones	Condición de conexiones del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero
	Distorsión	Condición de distorsión del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero
	Desalineamiento/Perdida de eje	Condición de desalineamiento del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero
	Socavación	Condición de socavación del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero
	Asentamiento	Condición de asentamiento del elemento. VC - Viga Cabezal y AC- Acero

- ***InsBasicaV:*** Tabla relacional donde se encuentran las calificaciones patológicas de cada elemento que compone la capa vectorial ***Viga*** para todos los puentes del inventario.

Tabla 4-15. Atributos de la tabla relacionada InsBasicaV

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Viga	Llave foránea y código único de cada grupo de vigas
Identificación	Tipo	Tipo de elemento identificado
	Consecutivo	Consecutivo del número asignado a cada luz del puente
	Subelemento	ID del subelemento a evaluar en cada luz o grupo de vigas
	PK_ID_InspBasicaV	Código de identificación único de cada elemento en cada luz para cada puente. Concatenado del FK_ID_Viga + Subelemento
Patológicos	Descascaramiento/Refuerzo expuesto	Condición de descascaramiento o refuerzo expuesto del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Eflorescencia/Oxidación	Condición de oxidación o eflorescencia del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Abrasión	Condición de abrasión del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Desalineamiento/Perdida de eje	Condición de desalineamiento o perdida de eje del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Fisuración	Condición de fisuración del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento.CR - Concreto Reforzado
	Fisuración por cortante	Condición de fisuración por cortante del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Corrosión	Condición de corrosión del elemento. AC - Acero.
	Corrosión recubrimiento protectivo	Condición de corrosión del recubrimiento protectivo del elemento. AC - Acero
	Fisuración/Fractura	Condición de fisuración y/o fractura del elemento. AC - Acero
	Conexiones	Condición de daño de las conexiones del elemento. AC - Acero.
	Distorsión	Condición de distorsión del elemento. AC - Acero
	Desalineamiento/Perdida de eje	Condición de desalineamiento o perdida de eje del elemento. AC - Acero
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. AC - Acero
	Descascaramiento/Refuerzo expuesto	Condición de descascaramiento o Refuerzo expuesto del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Eflorescencia/Oxidación	Condición de Eflorescencia u Oxidación elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Desalineamiento/Perdida de eje	Condición de desalineamiento del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Fisuración	Condición de Fisuración del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Fisuración por cortante	Condición de fisuración por cortante del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Calificación apoyo inicial	Calificación del apoyo inicial de la viga según la patología específica a su tipología
	Calificación apoyo final	Calificación del apoyo inicial de la viga según la patología específica a su tipología

- ***InsBasicaT:*** Tabla relacional donde se encuentran las calificaciones patológicas de cada elemento que compone la capa vectorial ***Tablero*** para todos los puentes del inventario. Estas incluyen la carpeta de rodadura o superficie peatonal que se encuentran dentro del tablero de cada puente.

Tabla 4-16. Atributos de la tabla relacionada InspBasicaT

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Tablero	Llave foránea y código único de cada apoyo intermedio
Identificación	Tipo	Tipo de elemento identificado
	Consecutivo	Consecutivo del número asignado a cada luz del puente
	Subelemento	ID del subelemento a evaluar en cada luz o grupo de vigas
	PK_ID_InspBasicaV	Código de identificación único de cada elemento en cada luz para cada puente. Concatenado del FK_ID_Viga + Subelemento
Patológico	Descascaramiento/Refuerzo expuesto	Condición de descascaramiento o refuerzo expuesto del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Eflorescencia/Oxidación	Condición de oxidación o eflorescencia del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Abrasión	Condición de abrasión del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Desalineamiento/Perdida de eje	Condición de desalineamiento del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Fisuración	Condición de fisuración del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Daño por impacto/colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Fisuración por cortante	Condición de fisuración por cortante del elemento. CR - Concreto Reforzado
	Corrosión	Condición de corrosión del elemento. AC- Acero
	Corrosión recubrimiento protectivo	Condición de corrosión del recubrimiento protectivo del elemento. AC- Acero
	Fisuración/Fractura	Condición de fisuración o fractura del tablero. AC- Acero
	Conexiones o desalineamiento	Condición de conexiones o desalineamiento del tablero. AC- Acero
	Distorsión	Condición de distorsión del elemento. AC- Acero
	Desalineamiento/Perdida de eje	Condición de desalineamiento del elemento. AC- Acero
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión. AC- Acero
	Descascaramiento/Refuerzo expuesto	Condición de descascaramiento o Refuerzo expuesto del tablero. CP - Concreto Preesforzado
	Eflorescencia/Oxidación	Condición de Eflorescencia u Oxidación. CP - Concreto Preesforzado
	Torones	Condición de Torones de refuerzo. CP - Concreto Preesforzado
	Desalineamiento/Perdida de eje	Condición de desalineamiento del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Fisuración	Condición de Fisuración del elemento. CP - Concreto Preesforzado

Tabla 4-16. Atributos de la tabla relacionada InspBasicaT

Tipo	Nombre	Descripción
	Daño por impacto o colisión	Condición de daño por impacto o colisión del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Fisuración por cortante	Condición de fisuración por cortante del elemento. CP - Concreto Preesforzado
	Huecos	Condición de huecos en la capa de rodadura asfáltica. Ro - Carpeta de rodadura y AS - Asfalto
	Abrasión/Ahuellamiento	Condición de abrasión o ahuellamiento en la carpeta de rodadura asfáltica. Ro - Carpeta de rodadura y AS - Asfalto
	Fisuración	Condición de fisuración de la carpeta de rodadura asfáltica. Ro - Carpeta de rodadura y AS - Asfalto
	Parches/Reparaciones	Condición de parches o reparaciones en la carpeta de rodadura asfáltica. . Ro - Carpeta de rodadura y AS - Asfalto
	Descascaramiento/Abrasión	Condición de descascaramiento o abrasión de la carpeta de rodadura en concreto. Ro - Carpeta de rodadura y CR - Concreto reforzado
	Parches/Reparaciones	Condición de parches o reparaciones en la carpeta de rodadura en concreto. Ro - Carpeta de rodadura y CR - Concreto reforzado
	Fisuración	Condición de fisuración de la carpeta de rodadura en concreto. Ro - Carpeta de rodadura y CR - Concreto reforzado
	Extensión de fisuración	Condición de extensión de fisuración de la carpeta de rodeadura en concreto. Ro - Carpeta de rodadura y CR - Concreto reforzado
	Deterioro concreto	Condición de deterioro del concreto. SP - Sistema de Piso y CR - Concreto reforzado
	Descascaramiento o Abrasión	Condición de descascaramiento o abrasión. SP - Sistema de Piso y CR - Concreto reforzado
	Corrosión	Condición de corrosión del tablero. SP - Sistema de Piso y ME - Metálicos
	Fisuración/Fractura	Condición de fisuración o fractura del tablero. SP - Sistema de Piso y ME - Metálicos
	Conexiones y anclajes	Condición de conexiones y anclajes del tablero. SP - Sistema de Piso y ME - Metálicos
	Distorsión	Condición de distorsión del elemento. SP - Sistema de Piso y ME - Metálicos
	Perdida de elementos	Condición de pérdida de elementos. SP - Sistema de Piso y ME - Metálicos
	Descascaramiento o Abrasión	Condición de descascaramiento o abrasión. SP - Sistema de Piso y MA - Mampostería
	Fisuración/Fractura	Condición de fisuración o fractura del tablero. SP - Sistema de Piso y MA - Mampostería
	Desplazamiento de los bloques	Condición de desplazamiento de los bloques. SP - Sistema de Piso y MA - Mampostería
	Tablones	Condición de deterioro de los tablones de madera. SP - Sistema de Piso y MD - Madera
	Deterioro de madera	Condición de deterioro de la madera. SP - Sistema de Piso y MD - Madera

- ***Riesgo:*** Almacena las características necesarias para realizar la evaluación probabilista del riesgo sísmico como: la tipología del sistema estructural principal, parámetros que afectan el comportamiento sísmico del sistema estructural principal, la taxonomía asignada, el valor físico expuesto, la pérdida anual esperada (PAE), la PAE relativa y el nivel de riesgo.

Tabla 4-17. Atributos de la tabla relacionada Riesgo

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_Riesgo	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 07.
Métricas	Latitud centroide	Latitud del centroide del polígono Puente
	Longitud centroide	Longitud del centroide del polígono Puente
	Sistema estructural principal	Tipologías estructurales definidas a partir de la subestructura, superestructura, conexiones y uso principal.
	Nivel de diseño sísmico	Nivel de diseño y consideraciones sísmicas.
	Tipo de suelo	Tipo de suelo según la ubicación del puente, caracterizado a través del periodo principal de vibración
	Número de luces	Número de luces medidas desde el estribo, terraplén o apoyo extremo. No incluye accesos.
	Número de elementos verticales	Número típico de elementos verticales por eje, ejemplo: columnas
	Tipo de cimentación	Tipo y material de la cimentación actual de la estructura, superficial o profunda
	Esviaje	Indica si el puente presenta esviaje.
	Estado estructural	Estado actual de la estructura en términos del comportamiento estructural esperado.
	Curvatura horizontal	Indica si el puente presenta curvatura horizontal.
	Curvatura vertical	Indica si el puente presenta curvatura vertical.
	Reforzamiento sísmico	Indica si el puente ha tenido algún tipo de reforzamiento o intervención estructural sísmica.
	Número de elementos horizontales	Número típico de elementos horizontales por luz, ejemplo: viga cajón
	Taxonomía	Tipologías taxonómicas establecidas a partir de la combinación de los 12 parámetros de vulnerabilidad sísmica
	Sistema estructural sísmico	Sistema estructural asociado al comportamiento sísmico para la asignación de la curva de vulnerabilidad.
	Valor físico expuesto	Valor físico expuesto de la estructura.
	Pérdida física	Pérdida anual esperada
	Pérdida física relativa	Pérdida anual esperada relativa al valor físico expuesto, al millar (‰)
	Nivel de riesgo	Calificación del nivel de riesgo.

- ***Archivos:*** La tabla relacional donde se recopila el estado, la fecha, contrato de ejecución y archivos asociados a los procesos de inspección básica, inspección detallada, georreferenciación y levantamiento topográfico de los puentes del inventario.

Tabla 4-18. Atributos de la tabla relacionada Archivos

Tipo	Nombre	Descripción
Relación	FK_ID_Puente	Llave foránea y código único de cada puente
Identificación	PK_ID_Archivos	Llave principal de la tabla relacionada compuesta por el código de identificación único de cada puente y el identificador único de tablas 08.
Inspección Básica	Diagnóstico de inspección básica	Especifica si cuenta con una evaluación de inspección Básica
	Fecha del diagnostico	Fecha en la que se realizó la inspección
	Número del contrato de ejecución	Contrato bajo el cual se ejecuto
	Archivo de diagnostico	Archivo donde se encuentra el resultado final del proceso
Inspección Detallada	Diagnóstico de inspección detallada	Especifica si cuenta con una evaluación de inspección Detallada
	Fecha del diagnostico	Fecha en la que se realizó la inspección
	Número del contrato de ejecución	Contrato bajo el cual se ejecuto
	Archivo de diagnostico	Archivo donde se encuentra el resultado final del proceso
Georreferenciación	Georreferenciación	Especifica si cuenta con georreferenciación
	Número del contrato de ejecución	Contrato bajo el cual se ejecuto
	Archivo de la georreferenciación	Archivo donde se encuentra el resultado final del proceso
	Fecha de la georreferenciación del punto A	Fecha en la que se realizó la georreferenciación del Punto A
	Fecha de la georreferenciación del punto B	Fecha en la que se realizó la georreferenciación del Punto B
	Código del Punto A	Código del punto A
	Código del Punto B	Código del punto B
Levantamiento Topográfico	Levantamiento topográfico	Especifica si cuenta con un levantamiento topográfico, generando productos cartográficos
	Fecha del diagnostico	Fecha en la que se realizó el levantamiento
	Número del contrato de ejecución	Contrato bajo el cual se ejecuto
	Archivo del levantamiento	Archivo donde se encuentra el resultado final del proceso

Los dominios y demás definiciones de cada atributo de las capas de datos vectoriales y tablas relacionadas se encuentran en el catálogo de objetos que se anexa a este informe en versión digital.

4.3.4 Modelo relacional

El modelo relacional de la base de datos fue desarrollado en la herramienta Oracle SQL Developer Data Modeler, la cual permite modelar y representar las relaciones entre las diferentes entidades establecidas en el diseño lógico. Adicionalmente, el Data Modeler permite modelar los campos con los dominios establecidos en el catálogo de objetos, el tipo de dato que puede ser almacenado en cada atributo y si el atributo es obligatorio o no (ver Figura 4-4). Teniendo en cuenta el tipo de base de datos implementada, se generan las siguientes relaciones mediante las llaves foráneas de cada capa y tablas relacionadas:

- Cuatro (4) relaciones uno-a-múltiple entre la capa de datos vectoriales principal ***Puente*** y las otras capas que contiene información cartográfica: ***ApoyoIntermedio***, ***Viga***, ***Tablero*** y ***Junta*** a través del código único identificación del puente asociado al atributo *FK_ID_Puente*.

- Ocho (8) relaciones uno-a-uno entre la capa principal ***Puente*** y las siguientes tablas: ***CaractGeneral***, ***ApoyoExtremo***, ***ElemServicioNoEstr***, ***ElemServicioEstr***, ***ElemServicioGeom***, ***ElemServicioPato***, ***Riesgo*** y ***Archivos*** por medio del atributo *FK_ID_Puente* correspondiente al código único de identificación de cada puente en el inventario.

- Tres (3) relaciones uno-a-múltiple entre las capas de datos vectoriales ***ApoyoIntermedio, Viga*** y ***Tablero*** y las tablas relacionadas ***InspBasicaA, InspBasicaV*** e ***InspBasicaT*** mediante los atributos *FK_ID_ApoyoIntermedio*, *FK_ID_Viga* y *FK_ID_Tablero*, respectivamente.

Las relaciones mencionadas, así como las tablas y demás características modeladas en la herramienta mencionada se presenta en la Figura 4-4, mientras que la versión digital del modelo se anexa al presente informe.

(Espacio en blanco intencional)

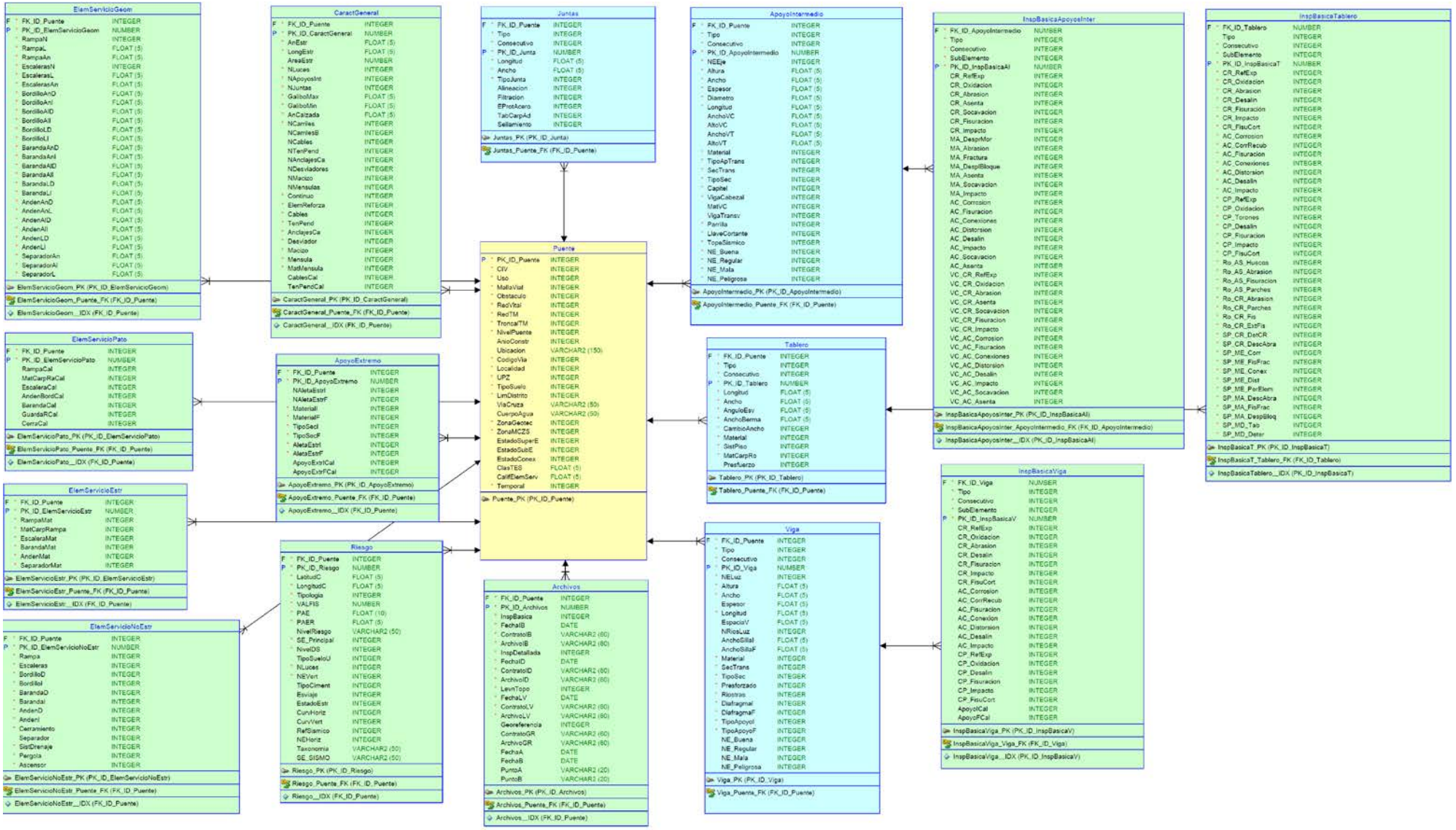


Figura 4-4. Modelo relacional desarrollado en la herramienta Oracle SQL Developer Data Modeler

4.3.5 Documentación complementaria

La documentación complementaria de la base de datos geográfica corresponde a un insumo fundamental en la conformación, documentación e implementación de la misma. Esta incluye el catálogo de objetos y los metadatos asociados a la GDB implementada, y se encuentran en el Anexo A-3.

El catálogo de objetos está basado en el Catálogo de Objetos Geográficos del Mapa de Referencia para el Distrito Capital de la Infraestructura Integrada de Datos Espaciales para el Distrito Capital. Su versión digital se anexa al presente informe.

Los metadatos están basados en el estándar conforme a los requerimientos de la Infraestructura Integrada de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA). Su versión digital se anexa al presente informe.

4.4 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se llevó a cabo la recopilación de información de planos arquitectónicos y estructurales de puentes, disponibles en los inventarios realizados en años anteriores (consultorías IDU-BM-187 del 2006 e IDU-BM-115 del 2009), planos récord de puentes en el repositorio de IDU, en el Centro de Documentación, Archivo Distrital, y archivos de empresas de consultoría y construcción de puentes. Esta actividad de recopilación tiene como finalidad la consolidación de información de planos de diseño, construcción o récord para: a) recuperación documental para almacenamiento en la base de datos, b) identificación de detalles constructivos para complementación en la definición de tipologías, y c) recopilación de cantidades de obra y presupuestos (a través de los contratos asociados a los planos recopilados) para valoración económica de construcción de puentes. La información recopilada fue clasificada, depurada y asignada a los puentes del inventario, para su posterior inclusión en la base de datos.

La totalidad de la información confiable fue almacenada en carpetas individuales para cada puente, nombradas utilizando el PKID correspondiente. Dentro de cada una de las carpetas, se consolidaron las subcarpetas de las cuales se obtuvo la información, indicando sus fuentes, con el fin de poder seleccionar la más adecuada en caso de revisión. Estas carpetas con la totalidad de la información recopilada son entregadas como anexo en versión digital a este informe (ver Anexo A-4).

Esta actividad se realizó en cuatro etapas independientes y paralelas las cuales se describen brevemente a continuación:

1. Recopilación y revisión de planos en IDU e información complementaria: se revisaron planos provenientes de la revisión y análisis de toda la información disponible en los inventarios realizados en años anteriores (consultorías IDU-BM-187 del 2006 e IDU-BM-115 del 2009). Para cada una de las carpetas se asignó el PKID correspondiente. Posteriormente, se revisó cada una de las carpetas con el PKID asignado, organizando todos los planos con un código que permitiera separarlos fácilmente.

2. Recopilación y revisión de planos en el Centro de Documentación del IDU: se revisaron aproximadamente 1250 registros o links donde podría existir información relacionada con puentes. Cada uno de estos links daba acceso a los diferentes contratos y planos, de los cuales se extrajo toda la información encontrada y se almacenó y organizó en diferentes carpetas, identificadas según el PKID del puente.

3. Recopilación y revisión de planos en otras entidades: con el fin de complementar información de planos arquitectónicos y estructurales de fuentes externas al IDU, se seleccionaron firmas de consultoría especializada en diseño, construcción e interventoría de construcción de puentes que se consideran las más relevantes en el contexto de Bogotá D.C. Las firmas seleccionadas son: Aycardi Estructural S.A., P & P Proyectos S.A.S., P y D Proyectos y Diseños S.A.S., S & A Santander y Asociados Ltda., y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB E.S.P. También se visitó el Archivo Distrital, y Archivo General de la Nación.

4. Asignación y consolidación de información disponible en planos para inventario de puentes en la base de datos: durante la realización de todas las actividades mencionadas anteriormente se recolectó el resumen de toda la información por medio de sus respectivas rutas de acceso dentro de un equipo local. Para aquellos puentes que contaran con información útil de planos arquitectónicos y estructurales, se generó una carpeta con el nombre del PKID correspondiente y se almacenaron todos sus archivos internamente.

La consideración de información útil de planos arquitectónicos y estructurales se entiende como la existencia de planos en planta, perfil y secciones trasversales tipo, que permitan definir la totalidad de la estructura del puente, sus elementos estructurales principales, material, y geometría general. En ciertos casos la información existente puede no contar siquiera con estos tres componentes, por lo cual no se considera útil de acuerdo a los objetivos de esta recopilación. En los casos de planos encontrados en formato físico impreso, generalmente se da prioridad a la clasificación de esta información principal, debido al excesivo tiempo de digitalización para almacenamiento. Por último, también es posible encontrar proyectos o contratos con documentos o planos disponibles de mayor nivel de detalle que la información útil de planos arquitectónicos y estructurales mínima (por ejemplo, despieces de elementos estructurales, detalles de conexiones, detalles de proceso constructivo, cuadros de cantidades de concreto y cartillas de aceros de refuerzo). Estos documentos o planos adicionales son especialmente valiosos para la generación de índices y características para las tipologías estructurales, posteriormente utilizados en la evaluación de vulnerabilidad y valoración económica.

Se consideró como información útil aquellos planos que presentaran dimensiones o coordenadas y cuya información fuera visible al incrementar el nivel de zoom en la imagen o fotografía (es decir, que no se perdiera la definición por pixel tal que impidiera su correcta visualización). La Figura 4-5 presenta un ejemplo de un plano que se consideró como útil y eventualmente como parte de la información confiable. La Figura 4-6 presenta un ejemplo de un plano que no fue considerado útil y se descartó.

Durante la recopilación y revisión de planos e información complementaria en el IDU, se recolectó información útil de planos arquitectónicos y estructurales de 198 puentes. Por su parte, la revisión de planos

en el Centro de Documentación del IDU permitió la recolección de información útil de 124 puentes adicionales.

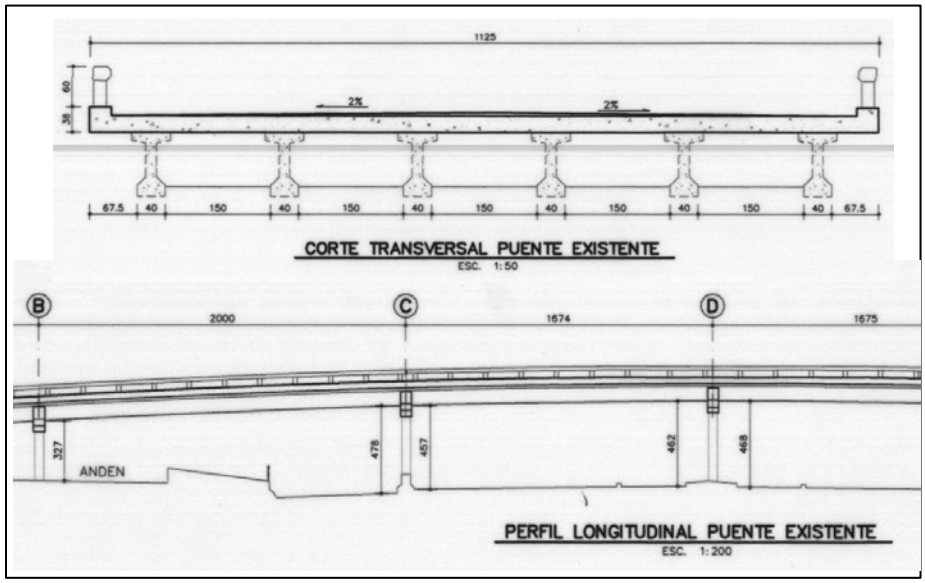


Figura 4-5. Ejemplo de información útil de planos recopilados

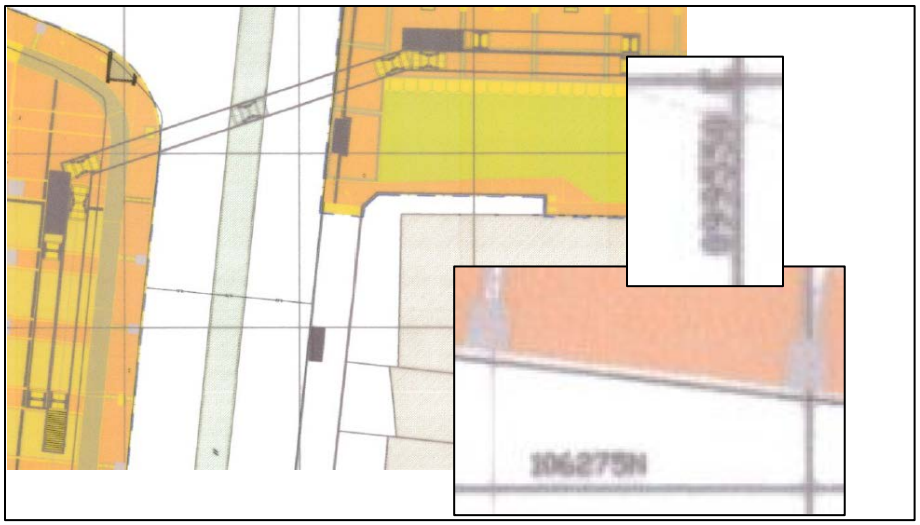


Figura 4-6. Ejemplo información no útil de planos recopilados

Durante el desarrollo de la recopilación y revisión de planos en otras entidades, se recolectó información de 73 proyectos en formato digital y 216 proyectos en formato físico; únicamente 9 puentes con información útil nueva de planos arquitectónicos y estructurales fueron recopilados, pues la mayoría de proyectos encontrados (280 puentes) ya contaban con información recopilada del inventario del IDU. Dentro de la totalidad de los 331 puentes con información útil de planos arquitectónicos y estructurales, el 59% provino de la revisión de planos récord en IDU, el 38% de la revisión en el Centro de Documentación IDU y un 3%

de otras entidades. Un total de 220 de los 331 puentes cuentan con información útil de planos arquitectónicos, estructurales y detalles, es decir, que se tienen planos de detalles adicionales a la planta, el perfil y la sección transversal. La Tabla 4-19 presenta el detalle de los puentes recopilados con información útil de planos arquitectónicos y estructurales, identificados por su código PKID, y relacionando el formato y el tipo de información.

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
22157145	DWG	✓	✓	✓	
22157259	DWG	✓	✓	✓	
22153152	PDF	✓	✓	✓	✓
22156425	DWG	✓	✓	✓	✓
22152156	PDF	✓	✓	✓	✓
22143992	PDF	✓	✓	✓	✓
22153105	PDF	✓	✓	✓	✓
22158560	DWG	✓	✓	✓	
22157925	DWG	✓	✓	✓	
22158138	PDF	✓	✓	✓	✓
24119247	PDF	✓	✓	✓	✓
22151828	PDF	✓	✓	✓	
22144448	PDF	✓	✓	✓	✓
22150935	PDF	✓	✓	✓	✓
22145304	JPG	✓	✓	✓	✓
22158608	DWG	✓	✓	✓	✓
22158093	DWG	✓	✓	✓	✓
22158355	PDF	✓	✓	✓	✓
22152066	PDF	✓	✓	✓	✓
22151521	DWG	✓	✓	✓	✓
22156256	DWG	✓	✓	✓	✓
22156098	DWG	✓	✓	✓	✓
22145350	PDF	✓	✓	✓	✓
22146371	PDF	✓	✓	✓	✓
22157733	PDF	✓	✓	✓	
22154117	DWG	✓	✓	✓	
22154050	DWG	✓	✓	✓	✓
22154017	DWG	✓	✓	✓	
22154008	DWG	✓	✓	✓	✓
24119246	PDF	✓	✓	✓	✓
22157011	PDF	✓	✓	✓	✓
22156945	PDF	✓	✓	✓	✓
22154170	PDF	✓	✓	✓	✓
22147682	DWG	✓	✓	✓	✓
22143362	PDF	✓	✓	✓	✓
22149083	PDF	✓	✓	✓	✓
22152485	DWG	✓	✓	✓	✓

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
22143026	PDF	✓	✓	✓	✓
22143158	PDF	✓	✓	✓	✓
22143791	PDF	✓	✓	✓	✓
22146834	DWG	✓	✓	✓	✓
22151094	PDF	✓	✓	✓	✓
22149704	PDF	✓	✓	✓	✓
22149995	PDF	✓	✓	✓	✓
22151230	PDF	✓	✓	✓	✓
22155943	PDF	✓	✓	✓	✓
22156363	PDF	✓	✓	✓	✓
22156385	DWG	✓	✓	✓	✓
22157528	JPG	✓	✓	✓	
22152155	PDF	✓	✓	✓	✓
22146237	PDF	✓	✓	✓	✓
22147953	DWG	✓	✓	✓	✓
22147850	DWG	✓	✓	✓	✓
22147758	DWG	✓	✓	✓	✓
22148054	DWG	✓	✓	✓	✓
22153417	DWG	✓	✓	✓	✓
22153290	PDF	✓	✓	✓	✓
22157841	DWG	✓	✓	✓	
22157924	DWG	✓	✓	✓	
22156561	DWG	✓	✓	✓	
22152105	PDF	✓	✓	✓	
22144465	DWG	✓	✓	✓	✓
22145303	DWG	✓	✓	✓	✓
22143635	PDF	✓	✓	✓	✓
22149972	DWG	✓	✓	✓	✓
22154319	DWG	✓	✓	✓	✓
22157522	JPG	✓	✓	✓	
22153219	PDF	✓	✓	✓	✓
22153277	JPG	✓	✓	✓	✓
22153944	DWG	✓	✓	✓	
22153479	JPG	✓	✓	✓	
22157008	PDF	✓	✓	✓	✓
22146932	DWG	✓	✓	✓	✓
22152396	PDF	✓	✓	✓	✓
22144262	PDF	✓	✓	✓	✓
22147746	PDF	✓	✓	✓	✓
22157804	PDF	✓	✓	✓	✓
22148754	DWG	✓	✓	✓	✓
22148849	DWG	✓	✓	✓	✓
22149126	PDF	✓	✓	✓	
22146492	PDF	✓	✓	✓	✓

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
22158435	DWG	✓	✓	✓	✓
22150095	PDF	✓	✓	✓	✓
22150186	DWG	✓	✓	✓	
22150395	DWG	✓	✓	✓	
22155910	PDF	✓	✓	✓	✓
22155944	PDF	✓	✓	✓	✓
22158071	DWG	✓	✓	✓	✓
22145375	PDF	✓	✓	✓	✓
22158178	DWG	✓	✓	✓	✓
24119313	PDF	✓	✓	✓	
24119374	DWG	✓	✓	✓	
24119271	DWG	✓	✓	✓	✓
24119276	DWG	✓	✓	✓	
24119306	DWG	✓	✓	✓	✓
24119320	DWG	✓	✓	✓	
24119319	PDF	✓	✓	✓	
24119297	PDF	✓	✓	✓	
24119335	PDF	✓	✓	✓	
24119380	JPG	✓	✓	✓	
24119270	PDF	✓	✓	✓	
24119296	PDF	✓	✓	✓	✓
22148403	PDF	✓	✓	✓	✓
22150566	DWG	✓	✓	✓	
22150770	PDF	✓	✓	✓	✓
22143797	DWG	✓	✓	✓	✓
22158168	DWG	✓	✓	✓	✓
24119489	PDF	✓	✓	✓	✓
24119490	DWG	✓	✓	✓	
24119492	PDF	✓	✓	✓	✓
24119493	PDF	✓	✓	✓	✓
24119494	DWG	✓	✓	✓	
24119495	JPG	✓	✓	✓	
24119285	JPG	✓	✓	✓	
24119317	DWG	✓	✓	✓	✓
24119318	DWG	✓	✓	✓	✓
24119282	PDF	✓	✓	✓	✓
24119273	PDF	✓	✓	✓	
24119269	PDF	✓	✓	✓	✓
24119298	PDF	✓	✓	✓	
24119305	DWG	✓	✓	✓	✓
24119287	DWG	✓	✓	✓	✓
24119308	PDF	✓	✓	✓	
24119312	PDF	✓	✓	✓	✓
22148543	DWG	✓	✓	✓	✓

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
22143122	PDF	✓	✓	✓	✓
22154318	PDF	✓	✓	✓	✓
22157538	JPG	✓	✓	✓	
24119488	DWG	✓	✓	✓	✓
22155745	PDF	✓	✓	✓	✓
24124667	DWG	✓	✓	✓	✓
24124569	DWG	✓	✓	✓	✓
22142257	DWG	✓	✓	✓	✓
22154793	JPG	✓	✓	✓	
22145981	DWG	✓	✓	✓	✓
22146078	PDF	✓	✓	✓	✓
22142138	PDF	✓	✓	✓	✓
22144976	PDF	✓	✓	✓	
22146318	PDF	✓	✓	✓	
22153688	PDF	✓	✓	✓	
22155385	PDF	✓	✓	✓	✓
22142530	DWG	✓	✓	✓	✓
22153886	DWG	✓	✓	✓	✓
22154573	PDF	✓	✓	✓	✓
22145265	PDF	✓	✓	✓	
22145568	DWG	✓	✓	✓	✓
22145777	DWG	✓	✓	✓	✓
22155825	PDF	✓	✓	✓	✓
22146082	DWG	✓	✓	✓	✓
22155691	PDF	✓	✓	✓	
22147311	PDF	✓	✓	✓	
22155004	PDF	✓	✓	✓	✓
22148979	DWG	✓	✓	✓	✓
22147646	PDF	✓	✓	✓	
22153707	PDF	✓	✓	✓	✓
22153435	PDF	✓	✓	✓	✓
22149821	DWG	✓	✓	✓	✓
22149862	JPG	✓	✓	✓	
22154893	DWG	✓	✓	✓	
22151695	PDF	✓	✓	✓	✓
22153908	PDF	✓	✓	✓	✓
22154623	PDF	✓	✓	✓	
22145126	PDF	✓	✓	✓	✓
22144962	PDF	✓	✓	✓	
22155807	DWG	✓	✓	✓	✓
22145428	PDF	✓	✓	✓	✓
22154652	PDF	✓	✓	✓	
22147170	DWG	✓	✓	✓	✓
22146158	DWG	✓	✓	✓	✓

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
22153576	PDF	✓	✓	✓	✓
22151353	JPG	✓	✓	✓	
22149746	PDF	✓	✓	✓	✓
22152560	DWG	✓	✓	✓	✓
22154936	DWG	✓	✓	✓	✓
22146351	PDF	✓	✓	✓	✓
22147340	PDF	✓	✓	✓	✓
24118909	PDF	✓	✓	✓	
22149057	DWG	✓	✓	✓	✓
24118914	DWG	✓	✓	✓	
22151812	PDF	✓	✓	✓	✓
22151935	DWG	✓	✓	✓	✓
22150809	DWG	✓	✓	✓	
22158392	PDF	✓	✓	✓	✓
22155621	DWG	✓	✓	✓	✓
22147483	PDF	✓	✓	✓	
22152797	DWG	✓	✓	✓	✓
22150005	PDF	✓	✓	✓	✓
22152445	DWG	✓	✓	✓	✓
22152446	DWG	✓	✓	✓	✓
22152666	DWG	✓	✓	✓	✓
22153066	DWG	✓	✓	✓	
22154544	DWG	✓	✓	✓	✓
22149933	PDF	✓	✓	✓	✓
22153849	PDF	✓	✓	✓	✓
22147049	PDF	✓	✓	✓	✓
22147050	PDF	✓	✓	✓	✓
22145117	DWG	✓	✓	✓	✓
22145511	PDF	✓	✓	✓	
22148435	PDF	✓	✓	✓	
22148489	DWG	✓	✓	✓	✓
22145691	DWG	✓	✓	✓	✓
22153512	DWG	✓	✓	✓	✓
22147271	PDF	✓	✓	✓	
24119255	DWG	✓	✓	✓	✓
24119257	DWG	✓	✓	✓	✓
24119258	DWG	✓	✓	✓	
24119259	PDF	✓	✓	✓	✓
24119261	DWG	✓	✓	✓	✓
24119262	DWG	✓	✓	✓	✓
22147001	DWG	✓	✓	✓	✓
22145792	DWG	✓	✓	✓	✓
22145012	DWG	✓	✓	✓	✓
22146732	DWG	✓	✓	✓	✓

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
22142509	DWG	✓	✓	✓	✓
24118910	PDF	✓	✓	✓	✓
22155288	PDF	✓	✓	✓	
22155056	PDF	✓	✓	✓	✓
22147523	PDF	✓	✓	✓	✓
22146571	DWG	✓	✓	✓	✓
22154371	DWG	✓	✓	✓	
22152995	PDF	✓	✓	✓	
22148914	PDF	✓	✓	✓	✓
24119249	PDF	✓	✓	✓	
24119251	DWG	✓	✓	✓	✓
22148913	DWG	✓	✓	✓	✓
24119254	DWG	✓	✓	✓	✓
24119387	JPG	✓	✓	✓	
24119437	DWG	✓	✓	✓	
24119443	DWG	✓	✓	✓	✓
24119444	DWG	✓	✓	✓	✓
24119450	PDF	✓	✓	✓	
24119252	DWG	✓	✓	✓	✓
24119266	PDF	✓	✓	✓	✓
24119503	DWG	✓	✓	✓	
24119438	DWG	✓	✓	✓	✓
24119505	PDF	✓	✓	✓	✓
24119506	DWG	✓	✓	✓	✓
22154432	PDF	✓	✓	✓	✓
24119256	PDF	✓	✓	✓	
24124604	PDF	✓	✓	✓	
24124621	DWG	✓	✓	✓	
24124629	PDF	✓	✓	✓	
24124704	PDF	✓	✓	✓	
24124630	JPG	✓	✓	✓	
24124631	JPG	✓	✓	✓	
24124632	PDF	✓	✓	✓	✓
24124653	DWG	✓	✓	✓	
24124654	PDF	✓	✓	✓	✓
24124655	DWG	✓	✓	✓	
24124658	PDF	✓	✓	✓	✓
24124659	DWG	✓	✓	✓	
24124773	DWG	✓	✓	✓	
24124774	DWG	✓	✓	✓	
24124775	DWG	✓	✓	✓	
24124674	DWG	✓	✓	✓	✓
24124660	DWG	✓	✓	✓	
24124661	DWG	✓	✓	✓	

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
24124662	DWG	✓	✓	✓	
24124663	DWG	✓	✓	✓	
24124664	DWG	✓	✓	✓	
24124665	PDF	✓	✓	✓	
24124666	DWG	✓	✓	✓	
24124668	DWG	✓	✓	✓	✓
24124669	DWG	✓	✓	✓	✓
24124671	PDF	✓	✓	✓	✓
24124672	PDF	✓	✓	✓	✓
24124673	DWG	✓	✓	✓	✓
24124675	PDF	✓	✓	✓	
24124677	DWG	✓	✓	✓	✓
24124683	DWG	✓	✓	✓	
24124684	DWG	✓	✓	✓	✓
24124685	DWG	✓	✓	✓	✓
24124689	PDF	✓	✓	✓	
24124690	DWG	✓	✓	✓	✓
24124700	DWG	✓	✓	✓	✓
24124701	DWG	✓	✓	✓	✓
24124702	PDF	✓	✓	✓	✓
24124711	JPG	✓	✓	✓	
24124712	JPG	✓	✓	✓	
24124720	DWG	✓	✓	✓	✓
24124722	DWG	✓	✓	✓	✓
24124735	DWG	✓	✓	✓	✓
24124723	PDF	✓	✓	✓	✓
24124730	PDF	✓	✓	✓	
24124751	DWG	✓	✓	✓	✓
24124753	DWG	✓	✓	✓	✓
24124756	PDF	✓	✓	✓	✓
24124765	DWG	✓	✓	✓	✓
24124766	DWG	✓	✓	✓	✓
24124768	PDF	✓	✓	✓	
24124769	DWG	✓	✓	✓	✓
24124776	DWG	✓	✓	✓	
24124777	DWG	✓	✓	✓	
24124779	PDF	✓	✓	✓	✓
24124780	PDF	✓	✓	✓	✓
24124784	DWG	✓	✓	✓	✓
24124785	DWG	✓	✓	✓	✓
24124802	DWG	✓	✓	✓	✓
24124804	DWG	✓	✓	✓	✓
24124806	DWG	✓	✓	✓	✓
24124813	DWG	✓	✓	✓	

Tabla 4-19. Listado de puentes con información útil de planos.

PK_ID	Formato	Planta	Perfil	Sección transversal	Detalles
24124820	PDF	✓	✓	✓	
24189808	PDF	✓	✓	✓	
24189809	PDF	✓	✓	✓	✓
24189767	PDF	✓	✓	✓	✓
22142959	PDF	✓	✓	✓	✓
22142336	DWG	✓	✓	✓	✓
22144824	DWG	✓	✓	✓	✓
22144924	DWG	✓	✓	✓	✓
22142182	DWG	✓	✓	✓	✓
22142292	PDF	✓	✓	✓	
22144731	PDF	✓	✓	✓	✓
24190011	PDF	✓	✓	✓	✓
24190012	PDF	✓	✓	✓	✓
24190013	PDF	✓	✓	✓	✓
24190001	DWG	✓	✓	✓	
22143206	PDF	✓	✓	✓	✓
24124752	DWG	✓	✓	✓	✓
22160027	DWG	✓	✓	✓	
22160022	PDF	✓	✓	✓	✓
22142700	PDF	✓	✓	✓	✓
22160032	PDF	✓	✓	✓	✓
22160021	DWG	✓	✓	✓	✓
24190061	PDF	✓	✓	✓	
24190062	PDF	✓	✓	✓	
24190063	DWG	✓	✓	✓	
22160036	DWG	✓	✓	✓	✓
22160037	DWG	✓	✓	✓	
24190074	PDF	✓	✓	✓	
24190075	DWG	✓	✓	✓	
22146880	PDF	✓	✓	✓	

La totalidad de la información recopilada fue almacenada en su formato original editable (DWG) en caso de estar disponible. En algunos casos, la recopilación únicamente fue posible para información en formato digital PDF, y ésta puede variar en calidad y presentación de acuerdo a si es un archivo PDF directamente generado de los planos en DWG, o si corresponde a imágenes escaneadas de los planos en físico. También se cuenta con imágenes (JPG) de planos físicos escaneados por otra entidad o por Uniandes. Finalmente, se aclara que toda la información encontrada en formato físico, fue escaneada con el propósito de consolidar esta recopilación en medio digital, la cual es entregada al IDU en el Anexo A-4.

La Figura 4-7 muestra las cantidades de puentes para los cuales se recopiló información útil de planos arquitectónicos y estructurales, según el tipo de puente y obstáculo que cruza. La Figura 4-8 muestra esta información agrupada por red vial, indicando si pertenece a la red vital o no. De la misma manera, la Figura

4-9 indica el número de puentes con información útil de planos arquitectónicos y estructurales según localidad.

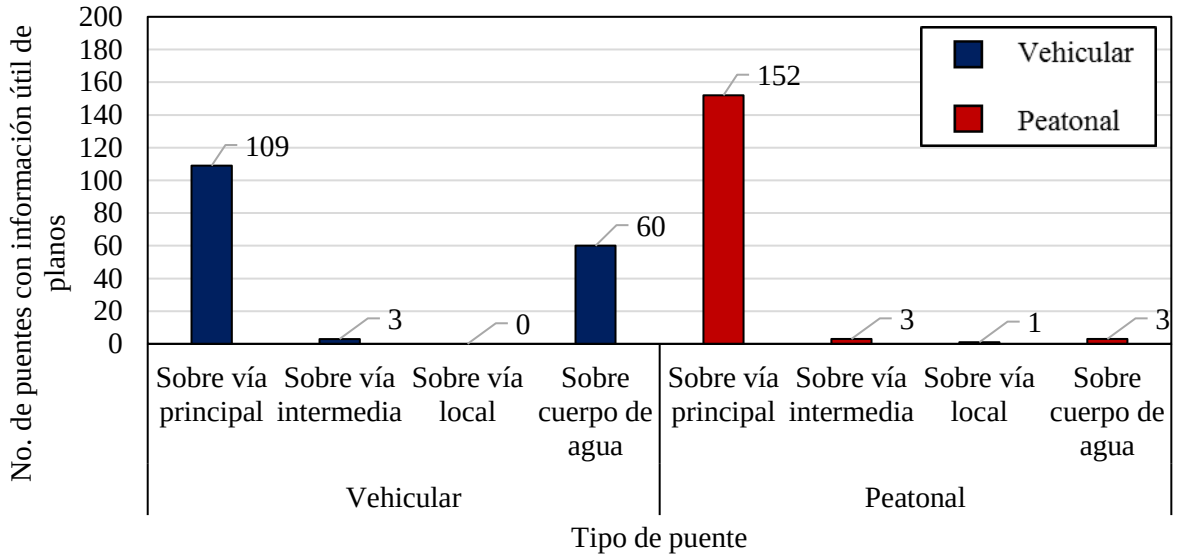


Figura 4-7. Estadística de recopilación de planos según tipo de puente y obstáculo que cruza

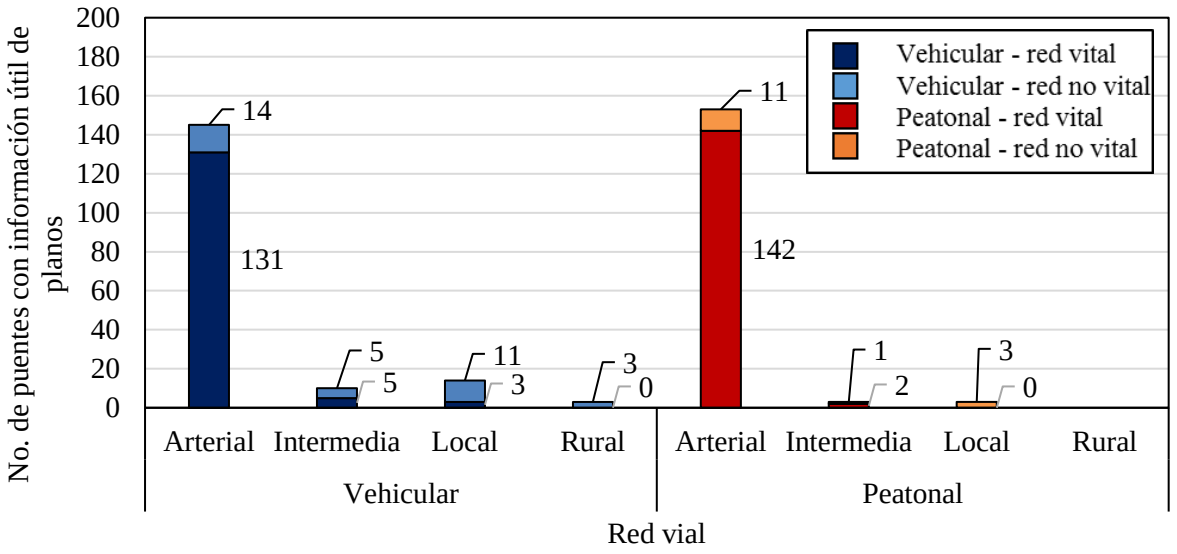


Figura 4-8. Estadística de recopilación de planos según tipo de puente y red vial

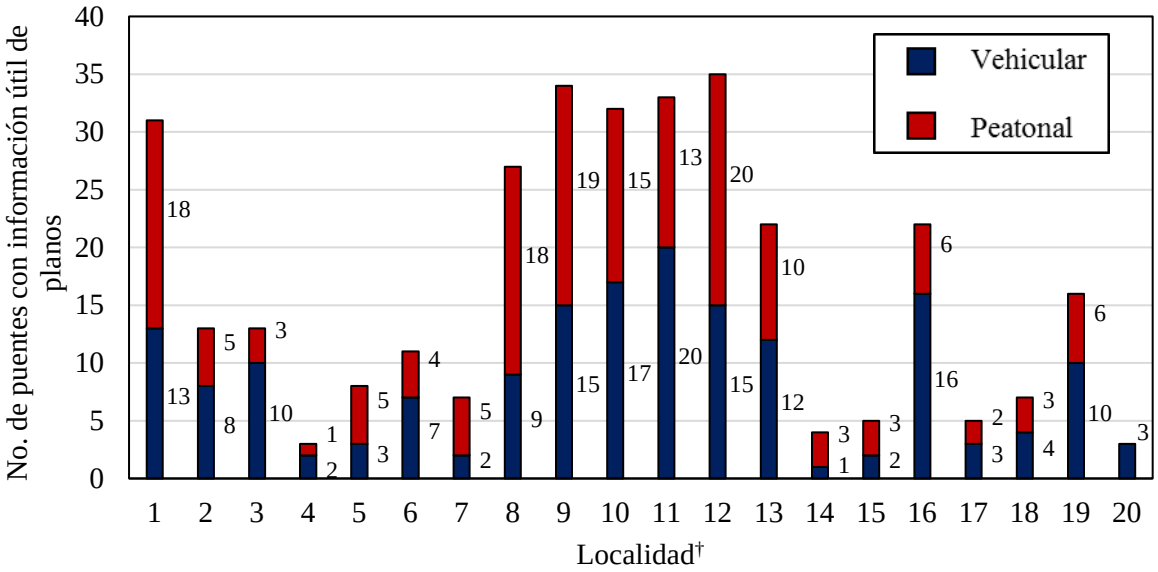


Figura 4-9. Estadística de recopilación de planos según tipo de puente y localidad

†Nota: numeración de localidades utilizadas

(1) Usaquén	(8) Kennedy	(15) Antonio Nariño
(2) Chapinero	(9) Fontibón	(16) Puente Aranda
(3) Santa Fé	(10) Engativá	(17) La Candelaria
(4) San Cristóbal	(11) Suba	(18) Rafael Uribe Uribe
(5) Usme	(12) Barrios Unidos	(19) Ciudad Bolívar
(6) Tunjuelito	(13) Teusaquillo	(20) Sumapaz
(7) Bosa	(14) Los Mártires	

4.5 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE PUENTES

4.5.1 Generalidades

El objetivo principal del levantamiento topográfico para el inventario de los puentes del Distrito es proporcionar información georreferenciada de puntos localizados en el terreno y la estructura de cada puente a partir de las características de cada puente en el inventario, y utilizando las técnicas aplicables más adecuadas para cada caso. Los productos del levantamiento topográfico consisten en un plano en planta-perfil de la estructura, además de un modelo 3D del puente (X, Y, Z) de todos los elementos levantados en campo y usando el comando 3Dpoly en las líneas continuas, debidamente georreferenciados y con las alturas correspondientes, más secciones transversales por cada luz que compone la estructura y secciones longitudinales, indicando los ejes, longitudes, alturas, gálibos horizontales y verticales, sitios de juntas de dilatación, pendientes.

Así mismo, los levantamientos topográficos se plantean de manera que la información permita cumplir con los siguientes objetivos específicos:

1. Contar con información confiable georreferenciada que permita complementar el inventario general y por otra parte conformar el inventario geométrico y estructural de los puentes en el sistema de información geográfica del Instituto.

2. Conocer con precisión la ubicación y geometría principal de los puentes de la ciudad con fines de inventario, caracterización de tipologías, dimensionamiento general, estimación de volúmenes, áreas aproximadas y clasificación geométrica general.

3. Contar con información de detalle de los puentes que permita cuantificar de manera aproximada tipos de componentes estructurales principales de los puentes, volúmenes aproximados de material, áreas superficiales aproximadas de elementos, y demás información relacionada con fines de planeamiento de obras de mantenimiento y cuantificación aproximada de ítems y actividades asociadas.

4. Contar con información básica georreferenciada y geométrica de los puentes de la ciudad para efectos de realizar evaluaciones de prefactibilidad de proyectos tales como planteamiento preliminar de obras de ampliación, reforzamiento, modificación o reemplazo.

5. Contar con información básica que permita la clasificación de los puentes en tipologías constructivas características con fines de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo ante acciones externas, a nivel del portafolio general de puentes.

La información levantada y recopilada NO pretende cumplir los siguientes propósitos:

1. Servir de base para realizar diseños de detalle específicos en los puentes de la ciudad. Para este propósito la información servirá en la etapa de prefactibilidad, pero como para cualquier proyecto de ingeniería, el consultor a cargo del diseño deberá realizar el levantamiento topográfico de detalle específicos de acuerdo con los objetivos particulares de cada proyecto (ampliaciones, reforzamientos, adecuaciones, obras de arte o protección complementarias, demoliciones, etc.).

2. Llevar a cabo trabajos específicos de intervención directa a los puentes de la ciudad en los cuales se requieran controles periódicos del avance de las obras, geo-referenciaciones continuas para control de avances, y trabajos que requieran controles periódicos en el tiempo.

3. Contar con información de detalle de elementos estructurales tales como conexiones, sistemas de apoyo, juntas, estribos, condiciones particulares de restricción, accesos, zonas de aproximación o empalme a vías específicas, cimentaciones, estructuras enterradas o sumergidas y otros detalles específicos de los puentes.

4. Contar con información sobre elementos y componentes no estructurales tales como andenes, separadores, barandas, protecciones, pavimentos, alcantarillas, drenajes, tuberías, servicios y conexiones especiales, usos de áreas protegidas o cualquier otro componente diferente a los elementos estructurales principales del puente.

La información topográfica para conformar dicha geometría de los elementos principales del puente se levantará con una variedad de técnicas convencionales y modernas, según aplique, que permiten la representación gráfica de los puentes (general y local), con una precisión espacial (horizontal y vertical) definida para el proyecto.

Como resultados específicos de las actividades de levantamiento topográfico se obtienen los siguientes productos cartográficos:

1. Planos planta-perfil: consiste en la generación de planos digitales en formato CAD con información de planimetría y el perfil dado por la altimetría para cada uno de los puentes. Estos planos contienen la representación de todos los objetos del área de estudio en coordenadas X, Y, Z, con las alturas derivadas de la nivelación trigonométrica a partir de la altura ortométrica de los puntos materializados.
2. Secciones transversales: representación transversal de los elementos estructurales del puente en diferentes puntos de su geometría, los elementos estructurales se encuentran debidamente acotados.

3. Malla de alambre 3D: consiste en la representación gráfica de los elementos estructurales mediante el uso del comando 3Dpoly en la unión de cada uno de los elementos derivados del levantamiento topográfico georreferenciado y con las alturas correspondientes.

El levantamiento topográfico se divide en tres procesos, a saber:

a) Georreferenciación y materialización de vértices en todas las zonas con puentes.

b) Levantamiento topográfico de puentes para actualizar el inventario.

c) Construcción de la información y planos de la totalidad de puentes a partir de la revisión y estandarización de la información entregada por el proceso dos.

El desarrollo de la materialización de vértices y posicionamiento, los levantamientos topográficos de puentes, y la generación de los productos cartográficos se realizó siguiendo la metodología desarrollada en la primera etapa del proyecto, la cual ha sido actualizada de acuerdo a los requerimientos durante los procesos de georreferenciación y levantamiento topográfico.

La precisión general está determinada por la precisión propuesta para la georreferenciación de los puntos materializados, de los cuales se realizará el amarre de los levantamientos topográficos. Mientras la local es la precisión esperada de la ejecución del levantamiento de detalles de cada uno de los componentes estructurales del puente, con las diferentes metodologías y equipos empleados. La precisión propuesta para la georreferenciación (general) es ≤ 0.05 m en el componente horizontal y ≤ 0.40 m en el componente vertical. La precisión propuesta para el levantamiento topográfico (local) es ≤ 0.02 m en el componente horizontal y ≤ 0.12 m en el componente vertical.

4.5.2 Georreferenciación

Para la ejecución de los levantamientos topográficos georreferenciados se deben tener puntos de referencia a partir de los cuales se determinarán las coordenadas de los elementos. Estos puntos deben estar en un marco de referencia y sistema de coordenadas establecido, para determinar las coordenadas de estos puntos se desarrollan actividades de posicionamiento GNSS con diferentes técnicas y equipos. Este capítulo describe los procedimientos desarrollados para materializar y georreferenciar puntos topográficos en cada uno de los puentes objeto de estudio, haciendo mención a los siguientes documentos complementarios que hacen parte del proyecto:

- Metodología de levantamiento topográfico de puentes
- Informe técnico de georreferenciación de puntos topográficos

4.5.2.1 Metodología general

La georreferenciación de puntos topográficos en cada uno de los puentes se ejecutó con metodologías que garantizan las precisiones de ± 0.05 m en el componente horizontal y ± 0.40 m en el componente vertical, precisiones establecidas en el documento metodológico de levantamiento topográficos. Los puntos topográficos se incrustaron de acuerdo con los requerimientos técnicos de visibilidad, estabilidad y distancia al perímetro del puente, referenciados al sistema de referencia Magna Sirgas definidas en el ITRF94 (International Terrestrial Reference Frame 1994), época 1995.4 como datum horizontal oficial, en coordenadas Planas Cartesianas Locales, origen Ciudad Bogotá (falso Este 92334.879, falso Norte 109320.965) en los puentes que se encuentren dentro del rango de uso del origen (radio de 20 km desde el origen y diferencias de nivel menores a 250 m). Los puentes que estén por fuera de ese rango estarán en coordenadas Gauss-Krüger origen central (Latitud de origen 4°35’46.3215”, Longitud de origen 74°04’39.0285”, falso Norte 1000000, falso Este 1000000). Como datum vertical se adoptó Buenaventura, en donde las alturas en la zona urbana se determinaron mediante la generación de un modelo de geoide local debido a que el modelo oficial GEOCOL2004 no garantizaba la precisión vertical requerida de ± 0.40 m; para la zona rural se empleó la metodología del IGAC para la determinación de alturas mediante GPS (IGAC, 1997) a partir del modelo geoidal EMG08 en donde la ondulación era más exacta en comparación al modelo oficial que permite garantizar las precisiones requeridas, las alturas se encuentran asociadas al datum MAGNA-SIRGAS.

La georreferenciación se divide en dos actividades principales, la primera es el procedimiento en campo y la segunda son los cálculos y generación de productos para cada uno de los puentes.

4.5.2.2 Actividades de campo

Esta actividad tiene como objetivo incrustar y/o materializar los puntos topográficos en cada uno de los puentes, partiendo de los principios de visibilidad entre el punto principal (Punto A) y el punto de señal de Azimut (Punto B), además de la estabilidad de la zona de incrustación y las distancias máximas permitidas de los puntos al perímetro del puente (ver Figura 4-10).

Una vez incrustados los puntos topográficos el siguiente componente de la georreferenciación es la ocupación de estos puntos con equipos GNSS por los métodos RTK y RTK-NTRIP y/o posicionamientos estáticos diferenciales, en el sistema de coordenadas Planas Cartesianas Locales, origen Ciudad Bogotá (falso Este 92334.879, falso Norte 109320.965) y Gauss-Krüger origen central (Latitud de origen 4°35'46.3215", Longitud de origen 74°04'39.0285", falso Norte 1000000, falso Este 1000000) para los puntos fuera del rango del sistema cartesiano, garantizando las precisiones establecidas de ±0.05 m en el componente horizontal y ± 0.4 m en el componente vertical; la captura de información se realiza en época de medición actual o de ocupación (2018).

Figura 4-10. Materialización de vértices mediante incrustación de pernos topográficos

El método RTK consiste en las correcciones diferenciales que realiza una estación de referencia o base a los puntos ocupados por los rover GNSS. La comunicación entre estos equipos se da por los sistemas de radio UHF o VHF. En este método se ocupa un punto con coordenadas conocidas (placa del IGAC) para iniciar la base y desde allí determinar las coordenadas de los puntos topográficos.

El método RTK-NTRIP se desarrolla con la recepción de información de las estaciones permanentes de la Red Galinet, que utilizan la señal celular GSM como medio de comunicación a los equipos GNSS para realizar las correcciones diferenciales a los rover y de esa manera determinar las coordenadas de los puntos (Figura 4-11). El control de calidad de estas medidas se realiza ocupando placas del IGAC cercanas como puntos de control, para garantizar que las coordenadas medidas se encuentren en un rango de tolerancia adecuado.

En los puntos en los cuales los métodos RTK no garantizaron las precisiones, se realizaron posicionamientos por el método estático diferencial, que consiste en la recepción continua de información GNSS de una base o punto de referencia y los rover que ocupan los puntos topográficos, que mediante triangulaciones en software de procesamiento GNSS se determinan las coordenadas de los puntos topográficos.

Los métodos RTK y estático diferencial se trabajan en el sistema de referencia Magna sirgas en la época de ocupación GNSS.

Estos archivos crudos y de coordenadas se almacenan y son entregados en oficina con fin de realizar los cálculos, transformación y cambios de época de las coordenadas.

Figura 4-11. Posicionamiento utilizando el método RTK-NTRIP

4.5.2.3 Procesamiento de información levantada

La actividad principal desarrollada en la georreferenciación es el cálculo y trasformación de coordenadas. Este proceso es diferente para los puntos que se toman con RTK-NTRIP y los que son tomados por método Estático Diferencial, debido a que el RTK genera las coordenadas en tiempo real, y por lo tanto el procedimiento consiste en realizar el cambio de época 2018 a 1995.4 y la determinación de la altura local mediante el modelo de geoide o la metodología IGAC previamente descrito. Estos cálculos se realizan con el uso del software MagnaPro desarrollado por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) en donde se determinan las velocidades de desplazamiento anuales para posterior mente realizar la transformación de coordenadas a época de referencia 1995.4. Los datos crudos que resultan del posicionamiento estático diferencial se procesan en los softwares TopconTools y Leica Infinity Survey Software, que por triangulaciones entre la Base GNSS y las constelaciones satelitales determinan las coordenadas de los puntos ocupados. Una vez se garantizan las precisiones de este procedimiento, se realizan las trasformaciones y cálculos de altura de la misma manera que el RTK-NTRIP.

- **Cambio de época:**
  Las coordenadas en el procedimiento RTK están en época de rastreo, por tanto, se debe desarrollar el procedimiento de cálculo de velocidades para obtener las coordenadas en época de referencia 1995.4. Las velocidades para cada punto de obtienen del software MagnaPro desarrollado por el IGAC, realizando la conversión del sistema plano cartesiano local Magna Ciudad Bogotá a coordenadas Geocéntricas y con las velocidades en los componentes X,Y,Z anuales, se determina el desplazamiento total para obtener las coordenadas en época 1995.4.

- **Cálculo de alturas:**
  Para determinar la altura GEOCOL2004 se utiliza el programa MagnaPro, subiendo las coordenadas de cada uno de los puntos se calcula la ondulación geoidal. Esta ondulación es restada a la altura elipsoidal y de esta manera se obtiene la altura sobre el nivel medio de mar con este modelo de geoide.

Las alturas niveladas del modelo geoidal local se obtienen subiendo las coordenadas de los puntos topográficos a un software CAD o GIS del cual se extraen las ondulaciones de la superficie, y la altura nivelada será el resultado de la diferencia entre la altura elipsoidal y esta ondulación.

Los cálculos y resultados para cada uno de los puntos topográficos, y según el método de georreferenciación utilizado, se presentan en detalle en el informe técnico de georreferenciación de puntos topográficos, el cual se encuentra como anexo en versión digital al presente informe (ver Anexo A-5). Los cálculos y resultados reportados en este documento contienen lo siguiente:

- Precisión de puntos topográficos
- Verificación de la calidad de los datos
- Reporte de coordenadas cartesianas y geográficas

Adicional a esto, se entregan formatos de campo individuales para cada punto georreferenciado, indicando el puente de referencia, localización del punto, una fotografía, las coordenadas cartesianas y geográficas finales, la información del equipo utilizado, y la información del posicionamiento y el tipo de levantamiento. La Figura 4-12 muestra un ejemplo de uno de los formatos de georreferenciación generados.

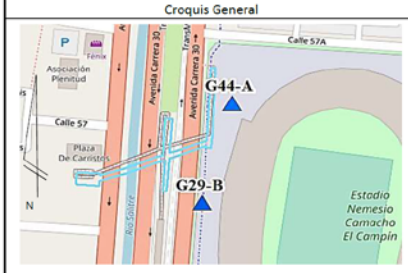
FORMATO DE CAMPO GNSS					
"MATERIALIZACIÓN DE PUNTOS TOPOGRÁFICOS CON EQUIPOS GNSS Y LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE PUENTES EN BOGOTÁ D.C."					
INFORMACIÓN DEL PROYECTO					
CONTRATO	IDU 1556-2017	**RESPONSABLE**	UNIANDES	**POSICIONÓ**	JOSE ALEXANDER SÁNCHEZ
				LICENCIA PROFESIONAL	01-11918
LOCALIZACIÓN					
CIUDAD	LOCALIDAD	DIRECCIÓN	CÓDIGO PUENTE	IDENTIFICADOR PUNTO	FECHA
BOGOTÁ	TEUSAQUILLO	Avenida Ciudad de Quito por CL 56	22142138	G44-A	sábado, 16 de junio de 2018
Croquis General		Descripción General		Fotografía Placa	
		SE UBICA SOBRE LA AVENIDA CIUDAD DE QUITO POR CL 56, APROX. A 14.9 M DEL PUENTE, APROX. A 18.9 M DEL ESTADIO NEMESIO CAMACHO EL CAMPIN			
COORDENADAS PUNTO TOPOGRÁFICO					
Coordenadas Magna Ciudad Bogotá 1995.4			**Coordenadas Geográficas**		
Norte	Este	Altura GPS	Latitud	Longitud	Alt. Elipsoidal
105589.714	99926.06	2552.45	4°38'48.31548" N	74°4'41.5304" W	2576.005
COORDENADAS PUNTO DE VERIFICACIÓN					
Coordenadas Punto IGAC (Certificado)		**NP-39 BGT**	**Coordenadas Punto IGAC RTK (Verificación)**		
Norte	Este	Alt. Elipsoidal	Norte	Este	Alt. Elipsoidal
103495.03	101000.32	2600.68	103495.11	101000.31	2600.68
INFORMACIÓN DEL EQUIPO					
N° DEL EQUIPO 1	FABRICANTE	CARLSON	MODELO	BRX6	SERIAL D164720732027
INFORMACIÓN DEL POSICIONAMIENTO				**MEDICIÓN ALTURA**	
INICIO DE LA SESIÓN	**FINAL DE LA SESIÓN**	**TIPO DE LEVANTAMIENTO**		**TIPO DE MEDICIÓN**	
10:00pm	5:00am	Estatico: ☐ Cinematico: ☐ RTK: X		Inclinada: ☐ Vertical: X	
N° DE ÉPOCAS	**PDOP**				
15	1.282	**MET. DETERMINACIÓN**	RTK - NTRIP		
Observaciones: La estación CORS - GBTA de coordeandas Gauss-Kruger origen Central 1001721.398 mE, 1007195.139 mN y altura de 2578.537 m, en época de referencia 2018.25, hace parte de la red de antenas GALINET manejada por la empresa GALILEO . Para ver la información completa abrir Anexo "Información_CORS_GBTA".				Trípode:	Bastón: 2.00m
Revisó		**Aprobó UNIANDES**			
SEBASTIÁN AVELLANEDA		**CAMILO LIZARAZO**			
Licencia profesional: 01-17036		Licencia profesional: 01-15140			

Figura 4-12. Ejemplo de formato de campo de georreferenciación

Finalmente, el Instituto puede contar con una red de 1597 puntos materializados y georreferenciados, con las respectivas alturas de acuerdo al modelo local, y una densidad alta de puntos en la zona urbana (ver Figura 4-13) para la ejecución de trabajos de espacio público, infraestructura, y demás proyectos del Distrito.

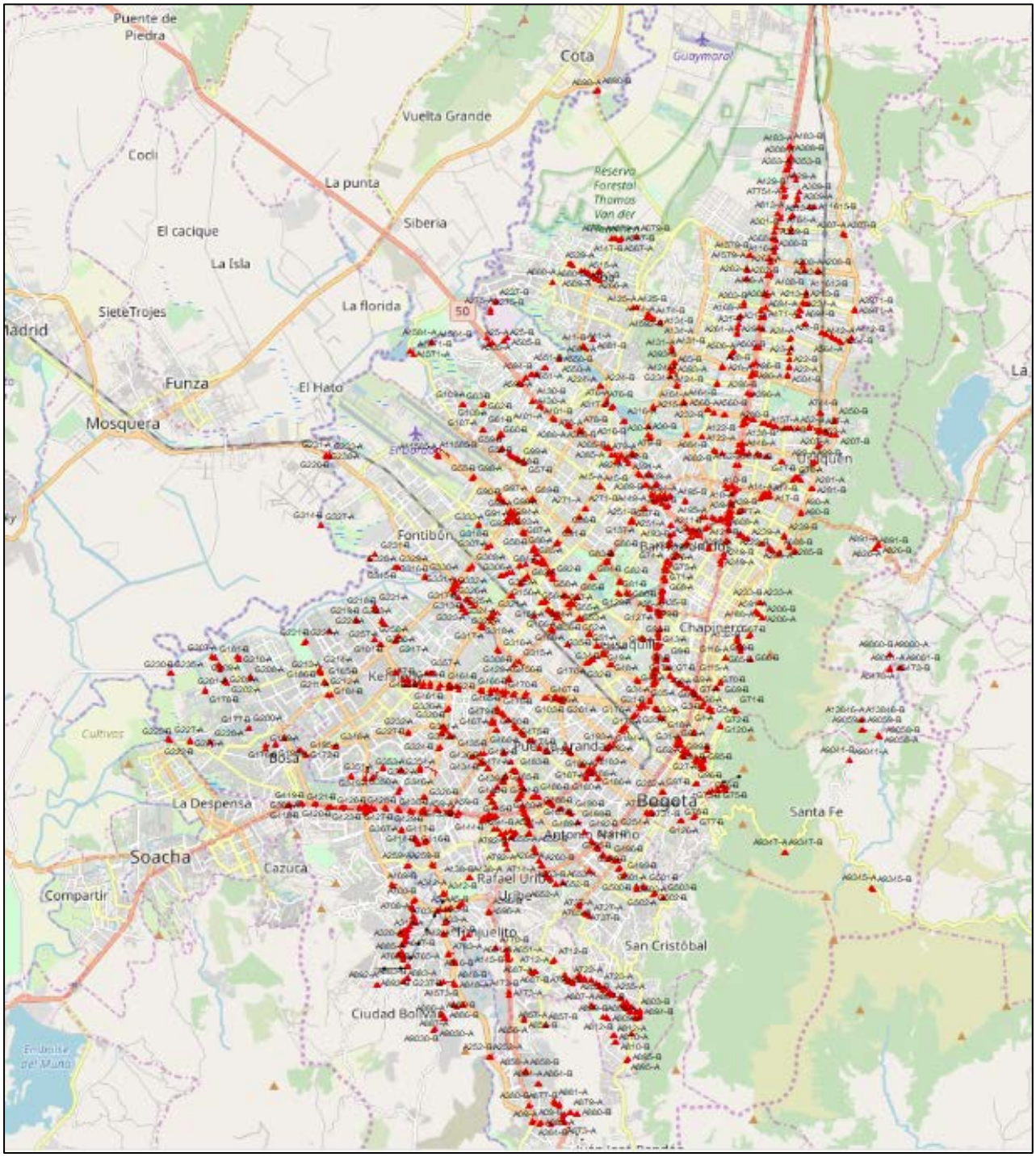


Figura 4-13. Densidad de la red de puntos materializados y georreferenciados en zona urbana de Bogotá, D.C.

Adicionalmente, se entrega al Instituto un sistema de visualización de la información de estos puntos georreferenciados y materializados, que permite obtener las propiedades de cada punto materializado, sus coordenadas planas cartesianas, origen, fecha de georreferenciación, y finalmente una copia del formato de resultados de georreferenciación para cada punto (Ver Figura 4-14 y Figura 4-15). Esta herramienta permite ubicar en campo los puntos materializados para su utilización en obras de infraestructura y espacio público a ser desarrolladas por el Distrito.

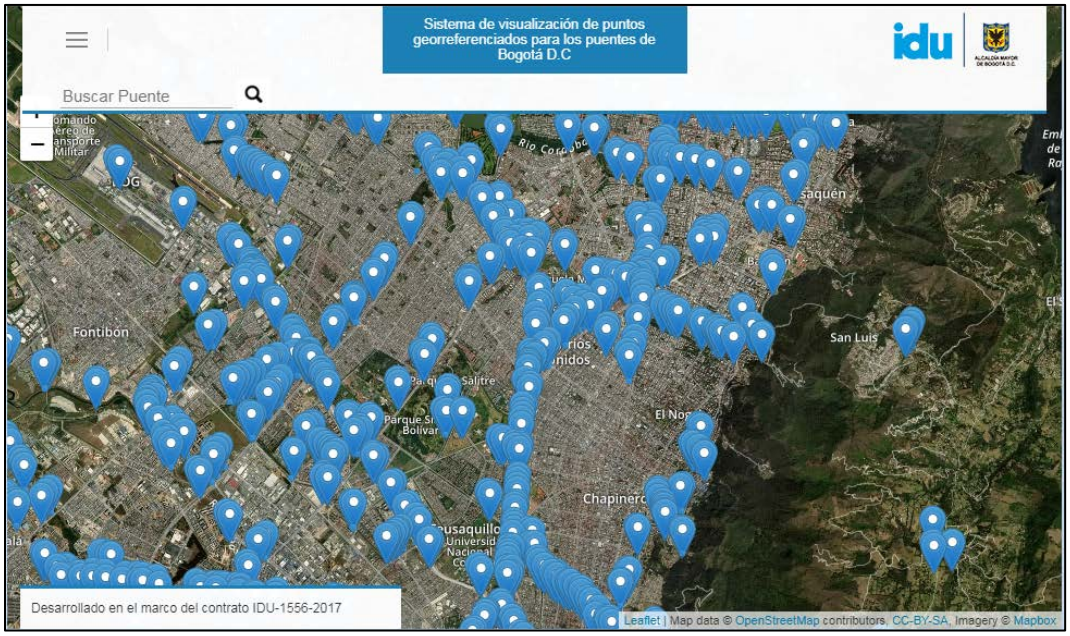


Figura 4-14. Sistema de visualización de puntos georreferenciados para los puentes de Bogotá, D.C.

Figura 4-15. Ejemplo de propiedades e información reportada para cada punto georreferenciado.

4.5.2.4 Consolidación de información

La información consolidada del proceso de georreferenciación, se entrega como anexo en versión digital a este informe, en el Anexo A-5, e incluye además del informe técnico mencionado, los siguientes anexos:

- Información técnica
  - Especificaciones técnicas del equipo empleado
  - Registro fotográfico
  - Descripción de acceso al punto y localización general (formatos de campo GNSS)
  - Informe de puntos con precisión horizontal y vertical, hora de inicio, fin, épocas, tipo de levantamiento para determinar nivel de confianza
- Cálculos y resultados
  - Memoria de cálculo del posproceso
  - Pruebas de verificación de calidad
- Anexos
  - Copia de matrículas de profesionales
  - Certificado de estaciones pasivas IGAC
  - Certificados de calibración de equipos
  - Archivos de datos crudos GNSS
  - Archivos digitales RINEX
  - Reporte de posproceso

4.5.3 Levantamiento topográfico

El levantamiento se realiza a partir de la toma de información mediante Sistema Global de Posicionamiento (GNSS) o topografía convencional mediante estación total, para la posterior generación de planos y productos de acuerdo con las especificaciones del documento de metodología de levantamiento topográfico y el estándar de presentación de la guía “Entrega de productos en formato digital de proyectos realizados en la infraestructura de los sistemas de movilidad y espacio público” del IDU.

Para la captura de los elementos estructurales correspondientes, se empleó el sistema de coordenadas planas cartesianas MAGNA_Ciudad_Bogota y planas de Gauss Krüger origen central, para los puentes comprendidos dentro del área de Bogotá y la localidad de Sumapaz respectivamente.

Este capítulo describe los procedimientos desarrollados para el levantamiento topográfico de cada uno de los puentes objeto de estudio, y haciendo referencia a los siguientes documentos complementarios que hacen parte del proyecto:

- Metodología de levantamiento topográfico de puentes
- Informe técnico de levantamiento de información topográfica y geométrica para la infraestructura de puentes de Bogotá D.C.

4.5.3.1 Metodología general

Para la ejecución de los levantamientos topográficos se garantizó el cumplimiento de la metodología establecida para cada categoría y agrupación de puente, de acuerdo con los requerimientos necesarios para la representación adecuada de cada estructura en el tiempo propuesto y cumpliendo con las precisiones establecidas.

El IDU establece en la Guía de Elaboración de Estudios Topográficos que la precisión debe ser de 1:20.000 en los componentes horizontales y en el componente vertical el error máximo permitido debe ser de 0.012 metros por kilómetro, también establece que en el anexo técnico de cada proyecto contempla las disposiciones particulares aplicables en lo referente a tipo de proceso y empleo de tecnologías, por lo cual, de acuerdo con el alcance se establecen las siguientes precisiones:

- En los levantamientos topográficos en los cuales sea necesario el apoyo en una poligonal de control, se garantizó una precisión de 1:25.000, esta poligonal fue amarrada a los puntos materializados.

- La precisión del levantamiento de detalles o precisión local del levantamiento fue de ±0.02 m en el componente horizontal y ±0.12 m en el componente vertical para equipos GNSS y estación total.

- La precisión de los Ortomosaicos o nubes de puntos derivados de los vuelos RPAS no superó los 0.10 m en el componente horizontal y 0.20 m en el componente vertical, en el RMS derivado del ajuste de los puntos de foto control.

- La precisión de la nube de puntos derivada del levantamiento con Scanner láser estuvo determinada por la precisión del levantamiento de los puntos de amarre, que fue ≤ 0.02 m en el componente horizontal y ≤ 0.05 m en el componente vertical.

El levantamiento topográfico se ejecutó de acuerdo a los componentes geométricos y estructurales del puente (perímetro en planta, geometría del tablero, ejes longitudinales y transversales principales, secciones longitudinales y transversales representativas, ubicación y sección de columnas y pilas, gálibos horizontales y verticales, ubicación de las juntas de dilatación, cotas en puntos representativos). Como resultado del levantamiento, se representó de manera gráfica y precisa la información de la estructura y los elementos que componen los puentes, tales como: apoyos intermedios, tablero, juntas de dilatación y vigas, entre otros, en el sistema de coordenadas planas cartesianas MAGNA_Ciudad_Bogota y planas de Gauss Krüger origen centra de acuerdo a la ubicación del puente y época de referencia establecido, así como precisiones de ± 0.02m en el componente horizontal y ± 0.12 en el componente vertical.

Para efectos del levantamiento de la información topográfica se definen los siguientes grupos de puentes, indicados en la metodología de levantamiento topográfico:

1. Grupo de puentes 1 – Puentes para levantamiento total de información: corresponde a la mayor fracción de tipos de puentes del inventario. Son puentes vehiculares o peatonales que no tienen planos estructurales asociados, no cuentan con información confiable de planos estructurales, o que por sus características requieren un proceso de levantamiento integral de información georreferenciada. A su vez, se realizó una subdivisión en este grupo de puentes para categorizarlos de acuerdo a su acceso y tipo o clasificación de puente:

    a) Categoría de puentes 1.1 – Puentes sin acceso inferior o limitado: son puentes peatonales y vehiculares sobre cuerpos de agua que dificultan las medidas de la sección inferior.

    b) Categoría de puentes 1.2 – Puentes cortos con acceso inferior: son puentes peatonales y vehiculares de corta longitud que permiten el levantamiento total de sus elementos y que suponen el levantamiento de manera rápida por métodos convencionales

    c) Categoría de puentes 1.3 – Puentes largos con acceso inferior: son puentes peatonales y vehiculares de gran longitud en los cuales se debe levantar el total de sus elementos estructurales y requieren el uso de una metodología que garantice la precisión del levantamiento y a su vez reduzcan el tiempo de ejecución.

    d) Categoría de puentes 1.4 – Puentes peatonales prototipo para Bogotá D.C: son los puentes peatonales que hacen parte del sistema Transmilenio y que se caracterizan por su homogeneidad en su diseño que permiten estandarizar la metodología del levantamiento topográfico de sus elementos. Son puentes en cerchas metálicas de luces variables con secciones transversales y detallamiento estructural estándar.

    e) Categoría de puentes 1.5 – Puentes simples en intersecciones complejas: son puentes peatonales y vehiculares que se encuentran en intersecciones complejas pero que su geometría no requiere de levantamientos detallados o metodologías de trabajo diferenciadas.

    f) Categoría de puentes 1.6 – Puentes especiales: son puentes con elementos estructurales particulares y geometría compleja, los cuales requieren de un levantamiento detallado con métodos de levantamiento convencional apoyado en el uso de técnicas modernas. Incluyen los puentes curvos, con derivaciones, con sistemas estructurales especiales, mixtos y otros que no clasifiquen en los grupos anteriores.

2. Grupo de puentes 2 – Puentes tipo box culvert sin planos: corresponde a estructuras hidráulicas tipo cajón cerrado. Se trata de un grupo especial debido a: (1) difícil acceso por la parte interior; (2) su baja vulnerabilidad antes cargas gravitacionales y sísmicas; (3) no incluye los componentes típicos de un puente. Por tratarse de estructuras muy particulares, la información requerida para este grupo, es diferente a la de los demás puentes para los propósitos de este proyecto. Por lo tanto, la recopilación de información requiere una estrategia diferente.

En la Tabla 4-20 a Tabla 4-26 se presenta el resultado de la asignación de los puentes a estos grupos y categorías de levantamiento. Cabe aclarar que, una vez realizadas las verificaciones en campo de los puentes con información útil de planos recopilada en esta etapa (numeral 4.4), se encontraron amplias inconsistencias entre los planos y la realidad construida. Estas diferencias pueden estar asociadas a cambios en la construcción con respecto a los planos de diseño (no toda la información recopilada corresponde a planos récord), modificaciones o adiciones posteriores a la construcción, entre otros. Por esta razón, y asegurando la mayor eficiencia de los trabajos en campo enmarcados en los objetivos del presente estudio, la información útil de planos recopilada en esta etapa no fue utilizada en el levantamiento topográfico de puentes.

Tabla 4-20. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.1 para el levantamiento topográfico

Grupo 1 - Categoría 1.1				**No. puentes:**	**432**
22147611	24124628	24119420	24124639	24124813	24189737
22158138	24124695	24119421	24124640	24124814	24189778
22158104	24124620	24119422	24124641	24124815	24189786
22154242	24124565	24119423	24124643	24124816	24189804
22158093	24124566	24119424	24124648	24124817	24189768
22158355	24124567	24119425	24124650	24124818	24189732
22152066	24124568	24119426	24124651	24124819	24189810
22158274	24124570	24119427	24124679	24124820	24189811
22151656	24124571	24119508	24124680	24124821	24189816
22151094	24124572	24119447	24124686	24124822	22160000
22151679	24124573	24119470	24124687	24124823	22160001
22149995	24124574	24119397	24124688	24189783	24190004
22144650	24124575	24119471	24124689	24189756	24190005
22149972	24119386	24119411	24124690	24189757	22160002
22157306	24119389	24119454	24124698	24189759	24190006
22158006	24119391	24119483	24124699	24189779	24190007
22158033	24119392	24119456	24124702	24189735	22160003
22146932	24119395	24119403	24124710	24189736	24190008
22147606	24119396	24119460	24124712	24189806	24190009
22147746	24119399	24119466	24124715	24189805	24190010
22158018	24119400	24119485	24124716	24189801	24190015
22158337	24119401	24119390	24124717	24189802	22160004
22158071	24119402	24119442	24124718	24189803	22160006
22158178	24119406	24119394	24124720	24189798	24190017
22158252	24119407	24119482	24124724	24189799	22160008
22158273	24119409	24119507	24124725	24189800	22160009
24119358	24119410	24124696	24124726	24189789	22160010
24119355	24119412	24124636	24124727	24189790	22160011
24119354	24119413	24124576	24124734	24189791	24190018
24119356	24119414	24124577	24124729	24189792	24190019
24119353	24119429	24124578	24124731	24189793	22160013
24119327	24119430	24124579	24124732	24189794	22160014
24119300	24119431	24124580	24124733	24189795	24190020
24119369	24119432	24124581	24124736	24189796	24189733

Tabla 4-20. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.1 para el levantamiento topográfico

Grupo 1 - Categoría 1.1				No. puentes:	432
24119332	24119433	24124583	24124737	24189797	22160017
24119275	24119434	24124584	24124738	24189788	24190026
24119378	24119435	24124585	24124739	24189787	24190027
24119359	24119440	24124586	24124740	24189808	24190028
24119350	24119446	24124587	24124741	24189785	24190029
24119349	24119448	24124588	24124742	24189809	24190030
24119290	24119451	24124589	24124743	24189784	24190031
24119367	24119452	24124590	24124744	24189774	24190032
24119301	24119453	24124593	24124745	24189775	22160018
24119270	24119455	24124595	24124746	24189773	24190033
24119362	24119457	24124597	24124747	24189772	24190034
24119296	24119458	24124600	24124750	24189770	24190035
24119293	24119461	24124691	24124748	24189769	22160019
24119328	24119462	24124605	24124749	24189771	24190036
24119340	24119463	24124607	24124758	24189777	24190037
24119497	24119464	24124610	24124761	24189776	24190041
24119498	24119465	24124612	24124783	24189761	24190042
24119499	24119467	24124613	24124786	24189762	24190043
22158168	24119468	24124692	24124790	24189767	24190044
24119491	24119469	24124693	24124787	24189763	24190045
24119492	24119472	24124615	24124789	24189764	24190038
24119493	24119473	24124616	24124791	24189766	24190039
24119494	24119474	24124707	24124793	24189765	24190040
24119495	24119475	24124705	24124794	24189760	22160021
24119496	24119476	24124621	24124797	24189748	24190067
24119375	24119477	24124706	24124798	24189780	22160044
24119344	24119478	24124626	24124799	24189747	22160034
24119277	24119479	24124629	24124800	24189752	22160035
24119341	24119480	24124704	24189755	24189751	22160033
24119291	24119481	24124630	24189753	24189750	24190059
24119345	24119486	24124631	24189754	24189743	24119388
24119317	24119487	24124632	24189781	24189744	24190073
24119318	24119398	24124633	24189782	24189746	24190054
24119269	24119415	24124634	24124801	24189745	22160049
24119268	24119416	24124713	24124807	24189740	24190079
24119376	24119417	24124635	24124808	24189739	22160052
24119287	24119418	24124637	24124809	24189741	22160051
24124694	24119419	24124638	24124812	24189738	22160050

Tabla 4-21. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.2 para el levantamiento topográfico

Grupo 1 - Categoría 1.2				No. puentes:	87
24119247	22154793	22151112	24119438	24124683	22142292
22157283	22154800	22152666	22154432	24124723	24190011
22145350	22142530	22154544	24124618	24124757	24190012
22155943	22146644	22155482	24124697	24124762	24190048
22157274	22154744	22145117	24124654	24124764	22160036
22157273	22155592	24119259	24124655	24124772	22160037
22157516	22145568	24119263	24124659	24124770	22160038
22157528	22155129	22154814	24124773	24124777	22160039
22157302	22155140	22142509	24124774	24124780	22160040
22150095	22155179	22154213	24124775	24124784	22160041
22155910	22155419	22153958	24124660	24124785	22160042
22145375	22155807	22155779	24124670	24124805	24190074
24119267	22155870	24119264	24124675	24119445	
24119372	22155242	24119265	24124676	22144904	
22155386	22154936	24119502	24124678	22144924	

Tabla 4-22. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.3 para el levantamiento topográfico

Grupo 1 - Categoría 1.3				No. puentes:	109
22157145	22154008	22153219	22145981	22146595	24119256
22157259	22143026	22153277	22146078	22145691	24124653
22153152	22143791	22153944	22142138	24119255	24124658
22156425	22146834	22152396	22146318	22145792	24124721
22152156	22149704	22157804	22145777	22152227	24124661
22143992	22151230	22149126	22146082	22145012	24124662
22157467	22156363	22149629	22155004	22146732	24124769
22153105	22156385	22146492	22149862	22155849	24124771
22152074	22152155	22158435	22155587	22147523	22142959
22151828	22146237	22150186	22144962	22146652	22142336
22144448	22153417	22150395	22151353	22152995	22142182
22158608	22153290	22155944	22155203	24119251	24190013
22151521	22157841	24119501	22155232	24119254	24190014
22156256	22157924	22143797	22155338	24119436	22156601
22156098	22156561	22156765	22158392	24119437	
22146371	22144465	22154318	22150132	24119439	
22154117	22143635	24119488	22152977	24119443	
22154050	22154319	22142257	22149933	24119266	
22154017	22157494	22151983	22150396	24119506	

Tabla 4-23. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.4 para el levantamiento topográfico

Grupo 1 - Categoría 1.4				**No. puentes:**	**114**
24124667	22154652	22147128	24118910	24124582	24124766
24124569	22147170	22147483	22153774	24124674	24124767
22153688	22146158	22152797	22149369	24124663	24124768
22155385	22153576	22150005	22146571	24124664	24124779
22151865	22147433	22152445	22142690	24124665	24124782
22153886	22151192	22152446	22154371	24124666	24124802
22154573	22149746	22153066	22148914	24124668	24124804
22145265	22151460	22154743	24119249	24124669	24124806
22155691	22152560	22153849	24119250	24124671	24124826
22147311	22149436	22147049	24119253	24124673	22144824
22148979	22147340	22147050	22148913	24124677	22142247
22147646	24118909	22145511	24119387	24124684	22144731
22153707	22149057	22148435	24119441	24124685	22160005
22153435	24118914	22148489	24119444	24124700	22160007
22151695	22151812	22153512	24119449	24124722	24124752
22153908	22151935	22147271	24119450	24124735	22160027
22154623	22150809	24119257	22145011	24124751	22160022
22145126	22149788	24119258	24119503	24124756	22142700
22145428	22151379	22147001	24119505	24124765	22146880

Tabla 4-24. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.5 para el levantamiento topográfico

Grupo 1 - Categoría 1.5				**No. puentes:**	**43**
22154208	22143254	22158485	22146351	24124672	24190049
24119246	22156381	22148403	22147412	24124825	24190060
22154170	22157334	22150566	22155288	22160012	24190075
22143158	22142939	22150770	24119404	24190000	
22147953	22142768	24119490	24119428	24190002	
22147850	22148754	22148543	24119252	24190001	
22147758	22148849	22144976	24124656	22143206	
22148054	24119323	22155825	24124657	24190050	

Tabla 4-25. PKID de puentes asignados al Grupo 1 - Categoría 1.6 para el levantamiento topográfico

Grupo 1 - Categoría 1.6				**No. puentes:**	**39**
22144593	22143131	22145303	24119312	22155056	24124763
22157734	22157011	22157008	24119248	24124682	24190003
22150935	22156945	22144262	22149821	24124681	24190052
22151026	22147682	24118912	22154893	24124701	22160032
22145304	22143362	22157964	22155621	24124753	
22157733	22149083	24119313	24119261	24124759	
22143095	22152485	24119489	24119262	24124760	

Tabla 4-26. PKID de puentes asignados al Grupo 2 para el levantamiento topográfico

Grupo 2				**No. puentes:**	**182**
22158199	22151916	24119366	24119383	24124603	24124788
22158560	22152051	24119297	24119384	24124604	24124792
22158594	22149997	24119280	24119279	24124606	24124795
22150493	22158121	24119335	24119278	24124608	24124796
22157925	22158123	24119357	24119321	24124609	24124803
22150472	22158215	24119284	24119285	24124611	24124810
22158357	22158231	24119292	24119282	24124614	24124811
22156629	22158290	24119274	24119273	24124617	24124824
24119315	24119364	24119334	24119363	24124622	24189734
24119316	24119374	24119351	24119365	24124623	24189758
24119314	24119336	24119302	24119309	24124624	24189749
24119294	24119286	24119303	24119298	24124625	24189742
24119289	24119326	24119371	24119299	24124627	24189812
24119288	24119324	24119330	24119305	24124642	24189813
24119311	24119322	24119310	24119360	24124644	24189814
24119342	24119370	24119379	24119308	24124645	24189815
24119373	24119283	24119380	22143122	24124646	24189817
22158047	24119368	24119329	22157538	24124647	24190016
22158058	24119271	24119304	22158148	24124649	24190046
22151914	24119325	24119339	22155745	24124652	22160029
22151897	24119347	24119307	24124619	24124703	24190061
22153964	24119346	24119333	24119385	24124708	24190062
22158305	24119276	24119377	24119405	24124711	24190063
22152105	24119331	24119361	24124591	24124719	24190064
22149962	24119348	24119272	24124592	24124728	24190065
22157522	24119306	24119500	24124594	24124730	24190066
22158016	24119295	24119343	24124596	24124754	22160043
22153479	24119381	24119352	24124598	24124755	
22153658	24119320	24119281	24124599	24124776	
22149954	24119319	24119337	24124601	24124778	
22151102	24119382	24119338	24124602	24124781	

4.5.3.2 Actividades de campo

Los levantamientos topográficos en campo se inician tras el chequeo de los puntos georreferenciados para cada puente mediante la determinación de coordenadas a partir de uno de los dos puntos, verificando el cumplimiento del error máximo permisible de ±0.05m en planimetría y ±0.40m en altimetría.

Posteriormente se levanta los elementos estructurales y complementarios del puente mediante radiaciones simples a partir de los puntos topográficos para su respectiva elaboración de productos. Dado el caso en que la totalidad del puente no pueda ser levantado mediante radiaciones simples a causa de la extensión del mismo se procede a la materialización de puntos auxiliares o deltas los cuales se determinan mediante el uso de poligonales que cumplan la precisión requerida de 1:25000 y a partir de los deltas se continua el procedimiento de radiación.

Figura 4-16. Levantamiento topográfico en campo utilizando estación total, puente peatonal Av. de las Américas por KR 78G (PKID 22142336)

Los levantamientos son realizados de acuerdo a las técnicas aplicables según los equipos disponibles, y teniendo en cuenta las limitaciones de información a levantar establecidas en la metodología para cada uno de los grupos y categorías de puentes definidos.

Como parte del trabajo de campo, se registra la información levantada, y coordenadas de todos los puntos tomados en campo, en el formato de campo de levantamiento (cartera de campo), junto con un esquema general a mano alzada del puente y sus componentes. La Figura 4-17 muestra un ejemplo del formato de campo de levantamiento.

"LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS DE PUENTES EN BOGOTÁ DC"

FORMATO DE CAMPO LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS

PROYECTO	CONTRATO IDU 1556-2017		TIPO DE LEVANTAMIENTO	ESTACIÓN TOTAL ÉPOCA 1995.4		ESQUEMA
TOPÓGRAFO	VICTOR SOLIS		CÓDIGO PUENTE	22152445	FECHA 10/09/2018	
PUNTO	REFERENCIA	NORTE	ESTE	COTA	ALTURA PRISMA	DESCRIPCIÓN
G234-A		113268.597	100492.112	2556.966	1.65	1000
	G228-B	113225.222	100461.081	2556.259	1.65	2000
	G228-BR	113225.221	100461.081	2556.249	1.65	2001
	D1	113265.601	100519.127	2557.217	1.65	3000
		113257.561	100494.363	2556.846	1.65	SC
		113257.566	100494.362	2557.373	1.65	SC
		113258.025	100494.077	2557.361	1.65	SC
		113257.999	100494.077	2556.843	1.65	SC
		113258.292	100494.568	2556.874	1.65	SC
		113258.284	100494.547	2557.345	1.65	SC
		113256.395	100495.753	2556.851	1.65	SC
		113255.933	100496.004	2556.852	1.65	SC
		113256.123	100495.567	2557.559	1.65	CL
		113258.050	100494.443	2557.543	1.65	CL
		113258.023	100494.454	2561.059	1.65	CL
		113256.103	100495.586	2561.060	1.65	CL
		113257.446	100493.321	2561.318	1.65	VG
		113257.381	100493.479	2561.337	1.65	VG
		113255.209	100494.629	2561.303	1.65	VG
		113255.260	100494.787	2561.302	1.65	VG
		113256.048	100495.536	2561.184	1.65	VG
		113256.134	100495.674	2561.175	1.65	VG
		113256.456	100496.683	2561.065	1.65	VG
		113256.478	100496.847	2561.061	1.65	VG
		113258.729	100495.521	2561.065	1.65	VG
		113258.658	100495.378	2561.077	1.65	VG
		113260.731	100500.445	2557.020	1.65	SC
		113261.261	100500.146	2557.022	1.65	SC
		113261.272	100500.232	2557.352	1.65	SC
		113261.863	100501.236	2557.293	1.65	SC
		113261.956	100501.291	2557.049	1.65	SC
		113259.828	100500.996	2557.042	1.65	SC
		113259.232	100501.367	2557.040	1.65	SC
		113259.938	100501.467	2557.538	1.65	CL
		113261.566	100500.988	2557.565	1.65	CL
		113261.370	100500.634	2557.578	1.65	CL
		113260.076	100501.937	2557.532	1.65	CL

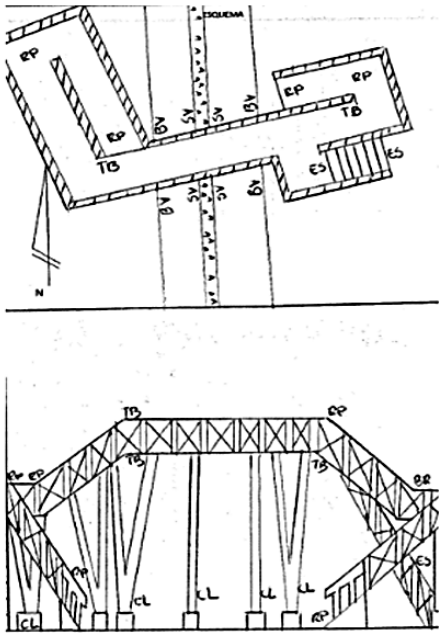


Figura 4-17. Ejemplo de formato de campo de levantamiento topográfico, puente peatonal Avenida Alfredo D Bateman por CL 128A (PKID 22152445)

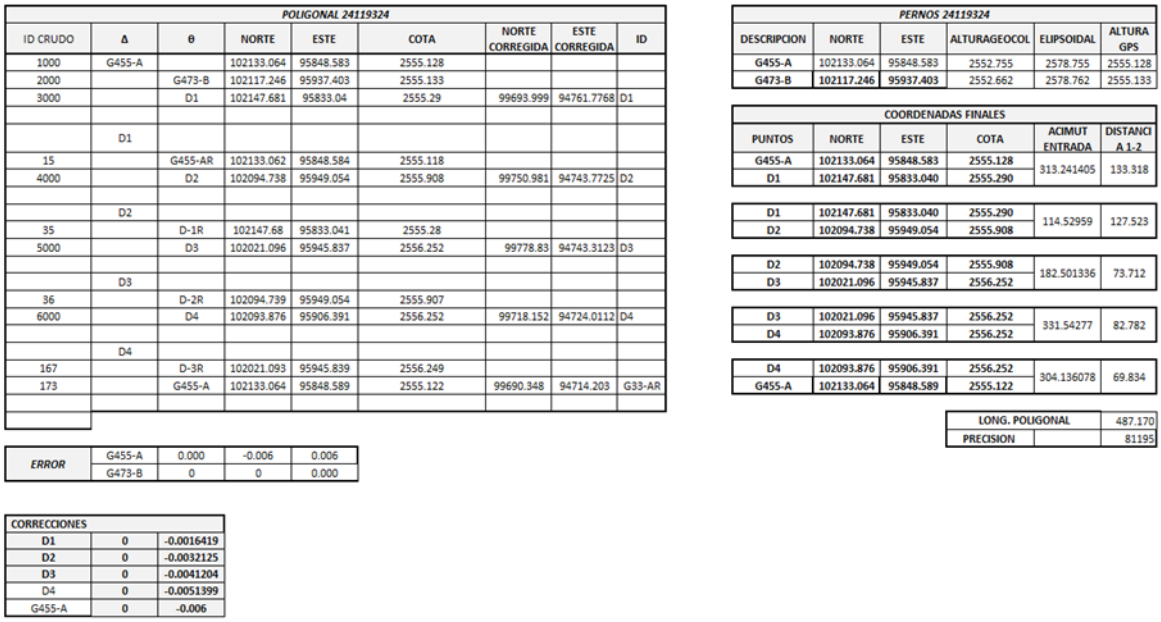
4.5.3.3 Procesamiento de información levantada

Una vez la información capturada en campo se encuentra en su totalidad se realiza un chequeo de la información junto con su respectiva categorización.

El cálculo empleado para el ajuste de las poligonales es el de variación de coordenadas, donde la precisión mínima es de 1:25000. Dicho ajuste se realiza de acuerdo a la compensación de distancias mediante la implementación de pesos en las observaciones realizadas en campo. Una vez ajustado y compensado el error, se procede al levantamiento de los elementos estructurales mediante radiación simple desde los puntos GPS o auxiliares de la poligonal, en donde los detalles tendrán una precisión de ±0.02 m en planimetría y ±0.12 m en altimetría.

Los cálculos y resultados para cada uno de los levantamientos topográficos, y según el método utilizado, se presentan en detalle en el Anexo A-5 en versión digital, y el informe técnico de levantamiento topográfico de puentes presenta un resumen de estos resultados. Los cálculos y resultados reportados en el anexo digital contienen lo siguiente:

- Cálculo de poligonales (ejemplo, ver Figura 4-18)
- Verificación de la calidad de los datos



POLIGONAL 24119324

ID CRUDO	Δ	θ	NORTE	ESTE	COTA	NORTE CORREGIDA	ESTE CORREGIDA	ID
1000	G455-A		102133.064	95848.583	2555.128			
2000		G473-B	102117.246	95937.403	2555.133			
3000		D1	102147.681	95833.04	2555.29	99693.999	94761.7768	D1
	D1							
15		G455-AR	102133.062	95848.584	2555.118			
4000		D2	102094.738	95949.054	2555.908	99750.981	94743.7725	D2
	D2							
35		D-1R	102147.68	95833.041	2555.28			
5000		D3	102021.096	95945.837	2556.252	99778.83	94743.3123	D3
	D3							
36		D-2R	102094.739	95949.054	2555.907			
6000		D4	102093.876	95906.391	2556.252	99718.152	94724.0112	D4
	D4							
167		D-3R	102021.093	95945.839	2556.249			
173		G455-A	102133.064	95848.589	2555.122	99690.348	94714.203	G33-AR

ERROR	G455-A	0.000	-0.006	0.006
	G473-B	0	0	0.000

CORRECCIONES		
D1	0	-0.0016419
D2	0	-0.0032125
D3	0	-0.0041204
D4	0	-0.0051399
G455-A	0	-0.006

PERNOS 24119324

DESCRIPCION	NORTE	ESTE	ALTURAGEOCOL	ELIPSOIDAL	ALTURA GPS
G455-A	102133.064	95848.583	2552.755	2578.755	2555.128
G473-B	102117.246	95937.403	2552.662	2578.762	2555.133

COORDENADAS FINALES

PUNTOS	NORTE	ESTE	COTA	ACIMUT ENTRADA	DISTANCIA 1-2
G455-A	102133.064	95848.583	2555.128	313.241405	133.318
D1	102147.681	95833.040	2555.290		
D1	102147.681	95833.040	2555.290	114.52959	127.523
D2	102094.738	95949.054	2555.908		
D2	102094.738	95949.054	2555.908	182.501336	73.712
D3	102021.096	95945.837	2556.252		
D3	102021.096	95945.837	2556.252	331.54277	82.782
D4	102093.876	95906.391	2556.252		
D4	102093.876	95906.391	2556.252	304.136078	69.834
G455-A	102133.064	95848.589	2555.122		

LONG. POLIGONAL		487.170
PRECISION		81195

Figura 4-18. Ejemplo de cálculo de poligonal, puente vehicular Avenida Montes por Avenida Batallón Caldas (PKID 24119324)

Este tercer proceso de generación de información y planos inicia con la recepción, revisión y validación de la información, y posteriormente la generación de información, planos y anexos para los puentes que se están realizado en el proceso dos. El archivo digital CAD preliminar es ajustado y procesado con el fin de estandarizar la información con la simbología, layers y templates establecidos para la entrega de información por el IDU, generando planos de localización general (Figura 4-19), planta-perfil (Figura 4-20 y Figura 4-21), y secciones transversales tipo (Figura 4-22). La dirección longitudinal del puente corresponde a la dirección longitudinal de la calzada o vía sobre el puente. Lo anterior se extiende inclusive a los puentes tipo box culvert, donde la dirección longitudinal es definida por la orientación del trazado vial, y no por la dirección del canal o cuerpo de agua bajo el box culvert. Por lo tanto, la definición de dirección longitudinal es consistente y uniforme para todos los grupos de levantamiento.

Como aclaración particular para los productos topográficos generados para los puentes tipo box culvert, de acuerdo a la orientación del eje longitudinal del puente, los muros o tabiques del box culvert se deben clasificar como apoyos intermedios. Los estribos o aletas del box culvert no se encuentran dentro de las capas geográficas que son cargadas a la base de datos, e inclusive no hacen parte de los elementos del puente según la definición de este tipo de estructuras, y por lo tanto su representación en los planos es considerada adicional e informativa.

La elaboración de planos topográficos se realiza en el sistema de coordenadas mencionado anteriormente de acuerdo a la ubicación en que se encuentre determinado puente, teniendo en cuanta las correspondencias topológicas de elementos estructurales y consistencia de nomenclatura de capas y anotaciones previamente establecido. La topología entre elementos y su correcta clasificación bajo las capas definidas, tanto de los planos como el modelo 3D, puede ser verificada en la conformación de los objetos geográficos utilizados

posteriormente para la consolidación de la base de datos (puente, tablero, vigas, apoyos intermedios, y juntas).

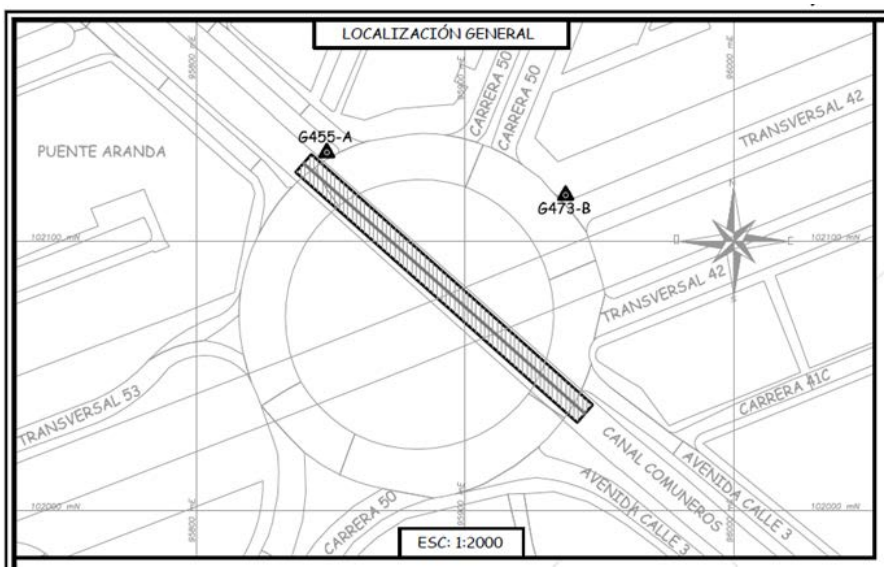


Figura 4-19. Ejemplo de localización general, puente vehicular Avenida Montes por Avenida Batallón Caldas (PKID 24119324)

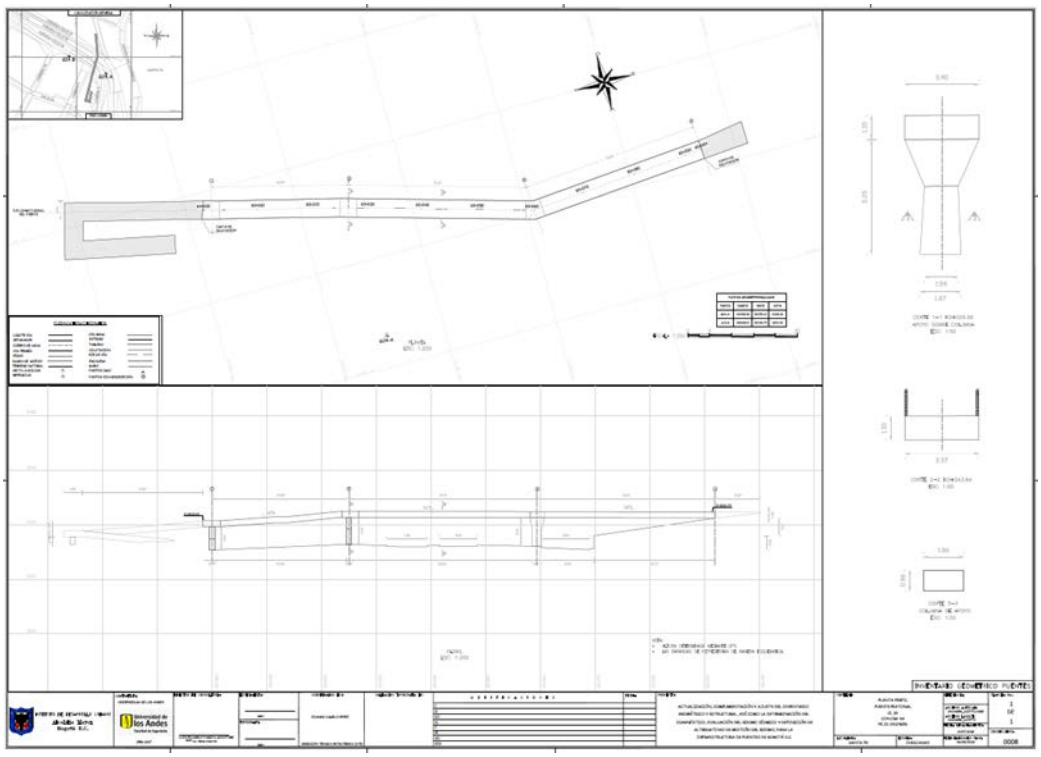


Figura 4-20 Ejemplo de plano planta-perfil, puente peatonal Cll 26 Cra 4a (PKID 24124656)

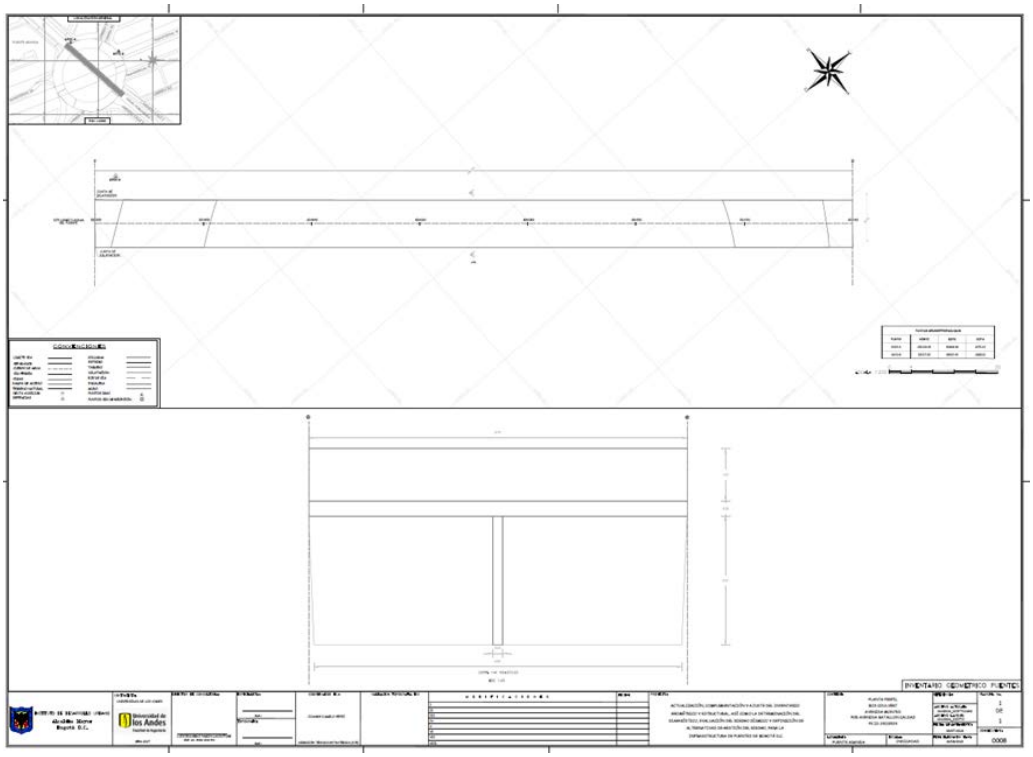


Figura 4-21. Ejemplo de plano planta-perfil, puente vehicular Avenida Montes por Avenida Batallón Caldas (PKID 24119324)

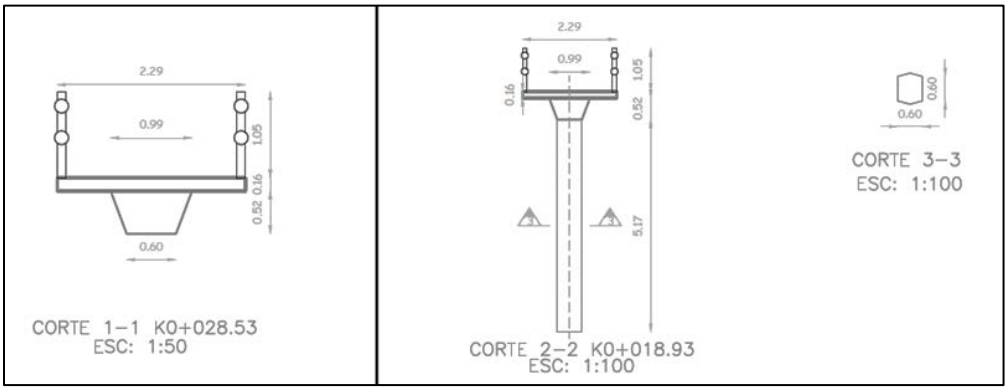


Figura 4-22. Ejemplo de secciones transversales tipo, puente peatonal AC 24 por KR 68C (PKID 24119263)

De igual manera, a partir de este archivo se realizará el modelado 3D en la malla de puntos con el comando 3Dpoly de cada puente (ver Figura 4-23), garantizando armonía y uniformidad en la información final, conformando así la totalidad de los productos del levantamiento topográfico. Para la generación de malla de alambre se empleará el comando 3Dpoly representando los elementos estructurales más representativos del puente como lo son el tablero, apoyos intermedios y vigas. Dado el aspecto anterior también se tiene en cuenta el sistema de coordenadas respectivo según la ubicación del puente.

Todos los elementos que conforman el puente, a su vez son incorporados como objetos geográficos en la base de datos (puente, tablero, vigas, apoyos intermedios, juntas) se incluyen en el modelo 3D del puente, asegurando la consistencia entre el modelo y la base de datos geográfica. Particularmente, los elementos que no se encuentran como objetos geográficos en la base de datos sino únicamente como información atributiva (ej. separadores, andenes, barandas), son caracterizados geométricamente en la base de datos, incluidos en los planos del puente como información adicional e informativa para entregar una representación gráfica completa de los mismos, y por tal motivo no son incluidos en el modelo 3D del puente.

Figura 4-23. Ejemplo de modelo 3Dpoly, puente vehicular Avenida Boyacá por Avenida Jorge Eliécer Gaitán, costado norte (PKID 22154017)

4.5.3.4 Consolidación de información

La información consolidada corresponde a los procesos de georreferenciación y levantamiento topográfico, los cuales se entregan como anexo en versión digital a este informe, en el Anexo A-5, e incluye además del informe técnico mencionado, los siguientes anexos:

- Información técnica
  - Especificaciones técnicas del equipo empleado
  - Registro fotográfico
  - Descripción de ubicación de vértices de la poligonal
- Cálculos y resultados
  - Memoria de cálculo de la poligonal y del levantamiento del puente
- Anexos
  - Copia de matrículas de profesionales
  - Certificados de calibración de equipos
  - Carteras de campo
  - Archivos de datos crudos GNSS
  - Archivos crudos estación total
  - Archivos de la información capturada por el láser
- Planos
  - Planos planta-perfil de la estructura
  - Localización general
  - Secciones transversales del puente
  - Modelo 3D del puente
  - Nube de puntos en tres dimensiones

4.6 INFORMACIÓN GEOMÉTRICA, ESTRUCTURAL Y DEL ESTADO DE LOS PUENTES

4.6.1 Generalidades

Con el fin de contar con una base de datos geográfica completa y actualizada, que permita no sólo tomar decisiones en cuanto a la priorización del mantenimiento, sino también tener un mejor control del estado de la infraestructura de puentes de la ciudad, se llevan a cabo los levantamientos de información geométrica y estructural de los puentes del Distrito, la inspección básica y la evaluación del estado de los mismos, de acuerdo con las metodologías respectivas desarrolladas como parte de este proyecto.

Los levantamientos geométricos y estructurales entregan información sobre las dimensiones de los componentes principales de un puente, tales como la sección de los elementos de la superestructura y subestructura, el material de los elementos estructurales y elementos de servicio, y demás características dimensionales y estructurales del puente. Esta información se reporta en formatos de levantamiento geométrico y estructural, complementada con un registro fotográfico de los componentes del puente. A su vez, el registro fotográfico refleja la identificación de patologías y estados de daño en los componentes estructurales y no estructurales, y permite registrar a través de un formulario de inspección las patologías encontradas en cada uno de los elementos del puente. Con las patologías identificadas se realiza la evaluación del estado del puente, siguiendo la metodología propuesta. La información geométrica, estructural y de inspección básica es consignada en un informe de levantamiento e inspección junto con el respectivo registro fotográfico.

Como resultado de estos levantamientos e inspecciones, el IDU contará con información que le permita conocer el estado de los puentes del Distrito bajo su jurisdicción, y a su vez brindar herramientas e indicadores para la priorización y asignación de recursos públicos para el correspondiente mantenimiento, conservación, habilitación y/o reforzamiento de la infraestructura del Distrito.

4.6.2 Levantamiento geométrico y estructural

En este numeral se presenta un resumen de la metodología para el levantamiento geométrico y estructural, mientras que la metodología detallada se presenta en el Anexo A-6. El objetivo principal del levantamiento geométrico de los puentes es actualizar, complementar y ajustar el inventario de los mismos, permitiendo complementar la base de datos geográfica con información como número de luces, luz crítica, número de columnas por eje transversal y dimensiones de los principales elementos estructurales, entre otros. Así mismo, el levantamiento estructural pretende relacionar en la base de datos geográfica los atributos como material de los elementos estructurales principales y de los componentes de servicio, existencia de llaves de cortante, topes sísmicos, tipos de apoyo, etc.

4.6.2.1 Metodología general

El levantamiento geométrico y estructural se ejecuta de acuerdo con la metodología propuesta y se divide en tres actividades principales, la primera es la actividad de planeación, la segunda es la visita de campo

para el correspondiente levantamiento de información y la tercera el procesamiento de la información recolectada.

En primer lugar, como actividad de planeación previa a la visita de campo, se realiza la capacitación y socialización de la metodología de levantamiento geométrico a los inspectores, en la que se explica el procedimiento general y las actividades específicas de levantamiento geométrico en campo. Luego, se realiza la asignación de puentes, correspondientes a una misma zona, ubicación y sector vial, a levantar para cada grupo de inspectores. Se planea y programa el recorrido y fecha de visita para realizar el levantamiento geométrico y el registro fotográfico. Se hace también la entrega del equipo de medición y levantamiento compuesto por flexómetro, distanciómetro digital, cámara fotográfica, formato de levantamiento geométrico de puentes, elementos de protección personal y chalecos de identificación.

En la visita de campo se determinan las dimensiones del puente, las cuales incluyen mediciones geométricas generales del puente, de sus elementos no estructurales, de los componentes de servicio, y de los elementos de la subestructura y de la superestructura. Las mediciones se registran en un formato de campo específico. Adicionalmente se realiza un registro fotográfico detallado de los componentes del puente, con el objetivo de realizar la definición e identificación de sus elementos estructurales y además tener un registro de las patologías y daños existentes en el puente.

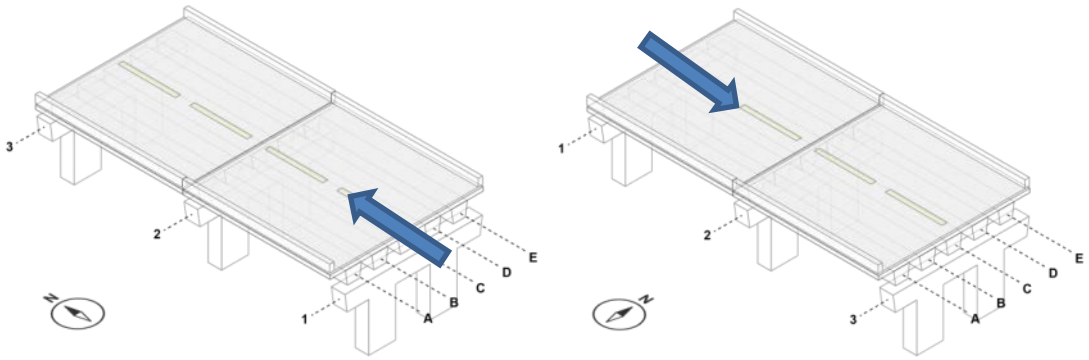
Para la actividad de procesamiento, la información registrada en el formato geométrico y el registro fotográfico es procesada para la identificación y asignación de los componentes estructurales del puente. Esta actividad se realiza en la oficina siguiendo los lineamientos de la metodología de levantamiento geométrico y estructural de puentes desarrollada en el presente proyecto.

A continuación, se describen con mayor detalle las actividades de campo y de procesamiento de la información recolectada.

4.6.2.2 Actividades de campo

Las actividades de campo incluyen no sólo el levantamiento geométrico sino también el registro fotográfico detallado de los elementos que componen el puente. Para esto se siguen la metodología de levantamiento geométrico y estructural de puentes en donde se establecen los lineamientos generales de cómo realizar estas actividades. El procedimiento a realizar en campo es el siguiente:

1. Se realiza la identificación, numeración, ubicación y orientación de los elementos, con base a la nomenclatura de ejes definida en la metodología de levantamiento geométrica y estructural anexa a este informe. Con la orientación de Sur (S) – Norte (N) o de Occidente (O) – Oriente (E) se debe recorrer el puente para el registro fotográfico. El recorrido se hace paralelo a la dirección del tráfico y según la orientación de inicio. En la Figura 4-24 se muestra esquemáticamente la dirección (flecha azul) de inicio de recorrido del puente de acuerdo con su orientación.



(a) (b)

Figura 4-24. Esquema de la dirección de recorrido del puente según su orientación; (a) Norte paralelo al eje longitudinal del puente; (b) Norte perpendicular al eje longitudinal del puente.

El recorrido inicia cruzando por el tablero (parte superior del puente), registrando la geometría y tomando fotos de los elementos de servicio del puente. En la misma dirección se recorre la parte inferior del puente, apoyos extremos, estribos, muros de cerramiento, vigas longitudinales, sistema de piso, columnas, muros, pantallas y conexiones viga-columna y todos los componentes de la superestructura y subestructura hasta llegar al extremo final del puente. Se debe tener en cuenta que, si las condiciones de acceso, seguridad y visibilidad del puente no son las adecuadas, el recorrido puede modificarse siempre y cuando en el registro fotográfico se haga evidencia de este hecho.

2. En el mismo recorrido se realiza un registro fotográfico del puente, identificando los diferentes elementos que lo componen. Es decir, los elementos no estructurales y de servicio, y los elementos estructurales de la superestructura, subestructura y conexiones. En el registro fotográfico se debe detallar el número total de juntas de dilatación, vigas que componen la parte superior del puente, el número total de pilas o muros que componen los apoyos intermedios y extremos, y cada elemento en particular. Además, se debe hacer énfasis en registrar detalladamente los elementos que se encuentran en mal estado y con daños.

A continuación, en la Tabla 4-27 se muestra un ejemplo de cómo debe ser el registro fotográfico para un puente. Se aclara que este es un ejemplo básico de cómo se debe reflejar el recorrido realizado en la visita de inspección en el registro fotográfico, no obstante, el registro detallado completo para este puente se encuentra como anexo digital a este documento en el Anexo A-6 en la carpeta “Registro Fotográfico” identificada con PKID 22149126.

Tabla 4-27 Registro fotográfico recomendado

1. Foto general del puente

2. Tablero – rampa de acceso

3. Tablero – rampa de acceso

4. Ubicación junta de dilatación eje 1 norte

5. Detalle junta de dilatación eje 1 norte

6. Andén y baranda izquierda

7. Carpeta de rodadura

8. Detalle baranda izquierda

9. Junta de dilatación eje 4 norte

10. Junta de dilatación eje 11

11. Carpeta de rodadura

12. Detalle anden

Tabla 4-27 Registro fotográfico recomendado

13. Carpeta de rodadura y separador

14. Junta de dilatación eje 13 costado norte

15. Junta de dilatación eje 13 costado Sur

16. Baranda y anden costado sur

17. Rampa costado oriental

18. Junta de dilatación eje 11 sur

19. Carpeta de rodadura costado sur

20. Baranda y anden derecho

21. Junta de dilatación eje 4 sur

22. Detalle anden derecho

23. Junta de dilatación 1 sur

24. Rampa de acceso

Tabla 4-27 Registro fotográfico recomendado

25. Muro de cerramiento eje 1

26. Vigas luz 2-3

27. Detalle Viga-losa luz 2-3

28. Viga metálica luz 2-3

29. Detalle viga metálica luz 2-3

30. Cerramiento luz 2-3

31. Pila 1 eje 3

32. Pila 2 eje 3

33. Neopreno conexión eje 3

34. Vista general debajo del puente

35. Viga acero luz 3-4

36. Vista general debajo del puente

Tabla 4-27 Registro fotográfico recomendado

37. Detalle viga cabezal eje 4

38. Vista general centro del puente

39. Daño en vigas luz 7-8

40. Vigas luz 7-8

41. Pila luz 9-10

42. Pila 1 eje 11

43. Pila 2 eje 11

44. Cerramiento eje 12

45. Fin del recorrido del puente

1. Se realizan las mediciones correspondientes a las dimensiones generales del puente. Estas mediciones geométricas se registran en el formato de levantamiento geométrico de puentes, ver Figura 4-25.

2. Se realizan las mediciones de la geometría de los elementos no estructurales, de elementos de servicio, y de los elementos de la subestructura y de la superestructura. Estas mediciones geométricas se registran en el formato de levantamiento geométrico de puentes, ver Figura 4-25. A continuación, en la Figura 4-25 se muestra un formato de campo diligenciado.

ALCALDIA MAYOR BOGOTA D.C. Instituto DESARROLLO URBANO — Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

FORMULARIO DE LEVANTAMIENTO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE PUENTES

IDENTIFICACIÓN DE LA EVALUACIÓN

Fecha de inspección (DD/MM/AAAA): 12 / 08 / 2018 Hora: ____ : ____ ☐ a.m. ☐ p.m.

Nombre Evaluador: Alberto Rincón – Mauricio Tobar

Firma: _____ I.D. Grupo: _____

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE

Barrio: ALHAMBRA Consecutivo - Puente: 14 vehicular

Localidad: SUBA PKID - Puente: 2 2 1 4 9 1 2 6

Dirección: Auto perto Nte x Av calle 116

GEOMETRÍA

General

Ancho Puente (m): 17.5 Longitud puente (m): 143 Berma: ☐ Si ☒ No Ancho berma (m): X

Gálibo Mayor (m): 5.0 Entre Ejes: 5 - 6 Gálibo Menor (m): 4.7 Entre Ejes: 10 - 11 → 2.1

Luz Mayor (m): 15.5 Entre Ejes: 4 - 5 Luz Menor (m): 14 Entre Ejes: 10 - 11

Esviaje: ☐ Si ☒ No Ángulo: ☐ <10° ☐ 10°<x<30° ☐ >30° Cruza Canal: ☐ Si ☒ No Ancho (m): X

Escaleras de acceso: ☒ No ☐ Si Cuantas?: _____

Longitud (m): _____

Ancho (m): _____

Rampas de acceso: ☐ No ☒ Si Cuantas?: 2

Longitud (m): 25 , 15 , ⊥ , ⊥ , ⊥

Ancho (m): 17.5 , 17.5 , ⊥ , ⊥ , ⊥

Elementos no estructurales

Bordillos: ☒ No tiene

Izq. Ancho (m): ____ Alto (m): ____ Longitud (m): ____

Der Ancho (m): ____ Alto (m): ____ Longitud (m): ____

Juntas de dilatación: ☐ No tiene

Ancho de Junta (m): 0.04 Longitud Junta (m): 17.5

Número de juntas: 5

Andenes: ☐ No tiene

Izq. Ancho (m): 0.85 Alto (m): 0.2 Longitud (m): 143

Der. Ancho (m): 0.85 Alto (m): 0.19 Longitud (m): 143

Separador ☐ No tiene Alto (m): 0.2

tipo transm. Longitud (m): _____ Ancho (m): 0.2

Barandas: ☐ No tiene

Izq. Ancho (m): 0.18 Alto (m): 0.97 Longitud (m): 143

Der. Ancho (m): 0.18 Alto (m): 0.96 Longitud (m): 143

Carpeta de rodadura (Vehiculares) ☐ No aplica

Ancho (m): 13.0 Longitud (m): 143

Superficie peatonal (Peatonales) ☐ No aplica

Ancho (m): 0.85 1.07 Longitud (m): 143

Superestructura

Vigas: ☐ No tiene Cuantas?: 16 Espesor Alma (m): —

Altura (m): 0.8 Ancho (m): 0.1 Espaciamiento (m): 1.0

Longitud mas larga (m): 15.5 Entre Ejes: 4 - 5

Longitud mas corta (m): 14 Entre Ejes: 10 - 11

Tablero/Losa:

Longitud (m): 143 Ancho (m): 17.5

Altura (m): 0.25

Subestructura

Columna/Muro: ☐ No tiene Cuantas?: 22

Espesor (m): 1.0 Ancho (m): 1.0 Diametro (m): X

Altura mas larga (m): 5.0 Eje: 6

Altura mas corta (m): 3.7 Eje: 11

Apoyos: No visible

Inicial. Altura (m): ____ Ancho (m): ____ Espesor (m): ____

Final. Altura (m): ____ Ancho (m): ____ Espesor (m): ____

Daño en vigas de la Luz 10 y 11

Figura 4-25. Ejemplo de formato de campo geométrico

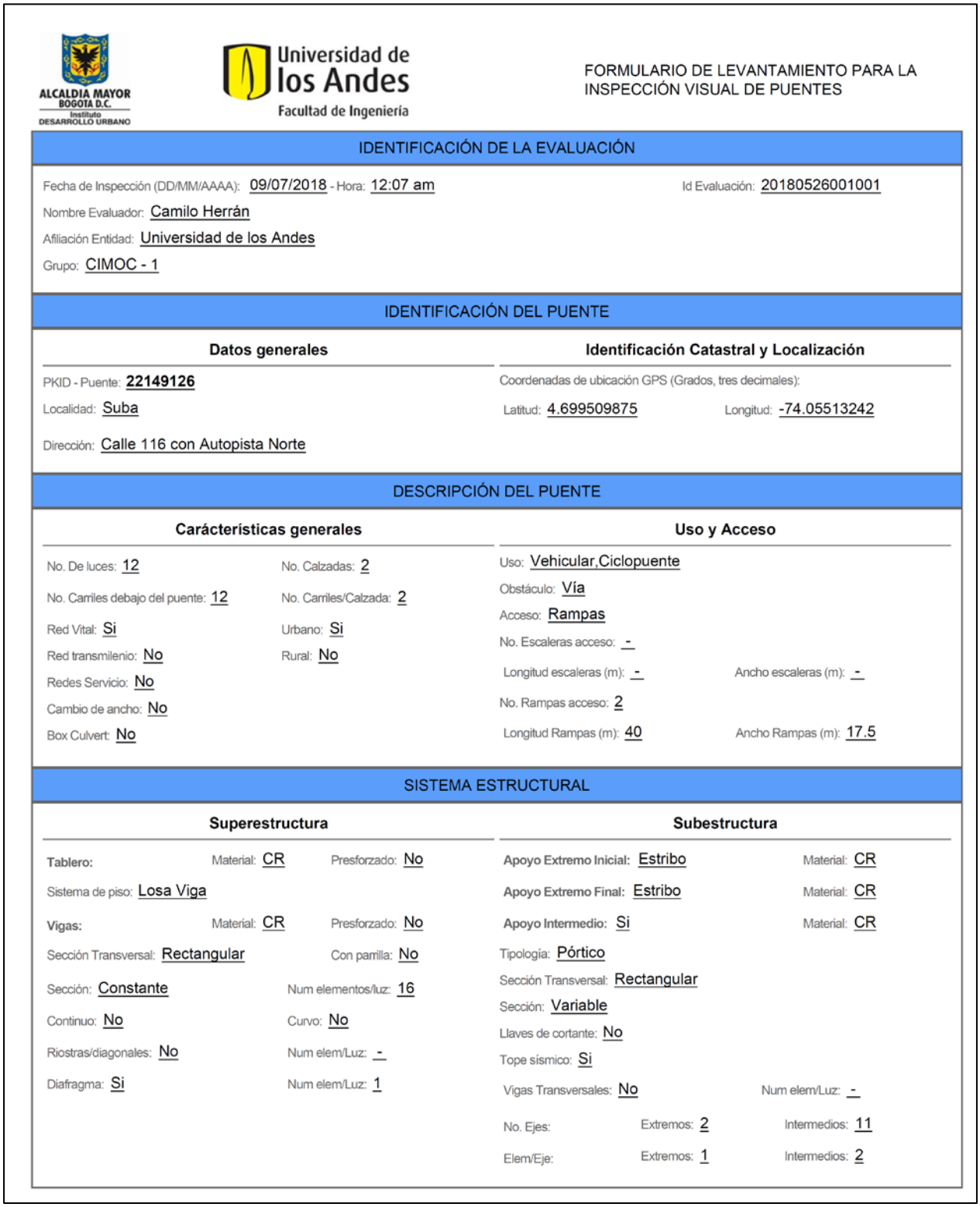
4.6.2.3 Procesamiento de información levantada

Una vez se concluye la actividad de campo, se recibe en la oficina la información correspondiente al formato geométrico y el registro de cada puente levantado. Con esta información se realiza la asignación de las características estructurales del puente y se digitaliza la información geométrica tomada en campo.

Con lo registrado en el formato de campo y el registro fotográfico recopilado, se identifica y asigna en el formato digital de cada puente lo siguiente:

1. Descripción del puente
    - Características generales del puente
    - Uso y accesos
2. Descripción sistema estructural del puente
    - Sistema estructural de superestructura, donde se define el material y el tipo de tablero, sistema de piso y de vigas.
    - Sistema estructural de subestructura, donde se define el tipo de apoyo extremo, el tipo de apoyo intermedio, su material y tipología respectivamente.
3. Conexiones, apoyos y elementos adicionales.
4. Elementos de servicio
    - Se define el material y tipo de barandas, separadores, carpeta de rodadura, superficie peatonal, características de junta metálica y demás elementos no estructurales que componen el puente.
5. Geometría
    - Digitalización de la información geométrica levantada en campo de acuerdo con lo descrito en el numeral 4.6.2.2.
    - Información geométrica general, de superestructura, subestructura y de elementos nos estructurales y de servicio.
6. Observaciones generales
    - Espacio para incluir observaciones respecto a lo encontrado en campo. Por ejemplo, se debe reportar si el puente presentó problemas de seguridad y no fue posible realizar alguna medición o tomar fotos. También se debe reportar si el puente debido a su ubicación o geometría presenta problemas de visibilidad y acceso.

Finalmente se genera el formato único digitalizado correspondiente al levantamiento geométrico y estructural del puente correspondiente. A continuación, en la Figura 4-26 a la Figura 4-28 se hace referencia al formato digitalizado del levantamiento geométrico y estructural de puentes para el puente vehicular con PKID 22149126. El formato digitalizado solo representa los atributos específicos del puente evaluado. Lo anterior significa que el formato digitalizado contiene una depuración de únicamente los campos que le aplican al puente levantado, pues según la tipología o condición particular de cada caso, el puente no necesariamente cuenta con todos los componentes posibles que describe el formato de campo. En la metodología de levantamiento geométrico y estructural anexa a este informe se encuentra de manera detallada la definición de cada uno de los campos y atributos relacionados con el formato.



ALCALDIA MAYOR BOGOTA D.C. Instituto DESARROLLO URBANO

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería

FORMULARIO DE LEVANTAMIENTO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE PUENTES

IDENTIFICACIÓN DE LA EVALUACIÓN

Fecha de Inspección (DD/MM/AAAA): 09/07/2018 - Hora: 12:07 am
Id Evaluación: 20180526001001
Nombre Evaluador: Camilo Herrán
Afiliación Entidad: Universidad de los Andes
Grupo: CIMOC - 1

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE

Datos generales

PKID - Puente: 22149126
Localidad: Suba
Dirección: Calle 116 con Autopista Norte

Identificación Catastral y Localización

Coordenadas de ubicación GPS (Grados, tres decimales):
Latitud: 4.699509875
Longitud: -74.05513242

DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

Carácterísticas generales

No. De luces: 12
No. Calzadas: 2
No. Carriles debajo del puente: 12
No. Carriles/Calzada: 2
Red Vital: Si
Urbano: Si
Red transmilenio: No
Rural: No
Redes Servicio: No
Cambio de ancho: No
Box Culvert: No

Uso y Acceso

Uso: Vehicular,Ciclopuente
Obstáculo: Vía
Acceso: Rampas
No. Escaleras acceso: -
Longitud escaleras (m): -
Ancho escaleras (m): -
No. Rampas acceso: 2
Longitud Rampas (m): 40
Ancho Rampas (m): 17.5

SISTEMA ESTRUCTURAL

Superestructura

Tablero: Material: CR Presforzado: No
Sistema de piso: Losa Viga
Vigas: Material: CR Presforzado: No
Sección Transversal: Rectangular Con parrilla: No
Sección: Constante Num elementos/luz: 16
Continuo: No Curvo: No
Riostras/diagonales: No Num elem/Luz: -
Diafragma: Si Num elem/Luz: 1

Subestructura

Apoyo Extremo Inicial: Estribo Material: CR
Apoyo Extremo Final: Estribo Material: CR
Apoyo Intermedio: Si Material: CR
Tipología: Pórtico
Sección Transversal: Rectangular
Sección: Variable
Llaves de cortante: No
Tope sísmico: Si
Vigas Transversales: No Num elem/Luz: -
No. Ejes: Extremos: 2 Intermedios: 11
Elem/Eje: Extremos: 1 Intermedios: 2

Figura 4-26. Formato digitalizado: Levantamiento geométrico y estructural de puentes (pág. 1)

CONEXIONES, APOYOS, Y ELEMENTOS ADICIONALES

Apoyos entre subestructura y superestructura

Apoyos entre subestructura y superestructura:
Neopreno

Elementos adicionales

Cables: No Núm.: - Macizo: No
Tensor: No Núm.: - Aislador: No
Mensula: No Núm.: - Material:
Aletas estribos: No Ubicación:

ELEMENTOS DE SERVICIO

Separador: Tipo TM
Barandas: Acero
Carpeta de rodadura: Asfalto
Superficie peatonal: Concreto
Juntas de dilatación: Rellenas moldeadas
Drenajes: No
Ascensor: No
Andén y/o bordillo: Si
Muros de cerramiento: Si

GEOMETRÍA

General

Ancho Puente (m): 17.5
Longitud puente (m): 143
Ancho canal que cruza (m): -
Gálibo Mayor (m): 5
Entre Ejes: 5 - 6
Gálibo Menor (m): 4.5
Entre Ejes: 10 - 11
Luz Mayor (m): 15.5
Entre Ejes: 4 - 5
Luz Menor (m): 14
Entre Ejes: 10 - 11
Esviaje: No
Ángulo esviaje (°):
Ancho berma (m): -

Superestructura

Vigas: Si
Espaciamiento (m): 1
Altura (m): 0.8
Ancho (m): 0.1
Espesor Alma (m): -
Longitud mas larga (m): 15.5
Entre Ejes: 4 - 5
Longitud mas corta (m): 14
Entre Ejes: 10 - 11
Tablero/Losa: Si
Altura (m): 0.25
Ancho (m): 17.5
Longitud (m): 143

Subestructura

Apoyos Intermedios: Si
Espesor (m): 1
Ancho (m): 1
Diametro (m): -
Altura más larga (m): 5
Eje: 6
Altura más corta (m): 3.7
Eje: 11
Apoyos Extremos:
Inicial: Altura (m): - Ancho (m): -
Final: Altura (m): - Ancho (m): -

Elementos no estructurales

Bordillos: No aplica
Izq.: Ancho (m): - Alto (m): - Longitud (m): -
Der.: Ancho (m): - Alto (m): - Longitud (m): -
Andenes: Si
Izq.: Ancho (m): 0.85 Alto (m): 0.2 Longitud (m): 143
Der.: Ancho (m): 0.85 Alto (m): 0.19 Longitud (m): 143
Barandas: Si
Izq.: Ancho (m): 0.18 Alto (m): 0.97 Longitud (m): 143
Der.: Ancho (m): 0.18 Alto (m): 0.97 Longitud (m): 143

Juntas de dilatación: Si
Número de juntas: 5 Ancho (m): 0.04 Longitud (m): 17.5
Separador: Si
Ancho (m): 0.2 Alto (m): 0.2 Longitud (m): 0
Carpeta de rodadura (Vehiculares): Si
Ancho (m): 13 Longitud (m): 143
Superficie Peatonal (Peatonales): Si
Ancho (m): 0.85 Longitud (m): 143

Figura 4-27. Formato digitalizado: Levantamiento geométrico y estructural de puentes (pág. 2)

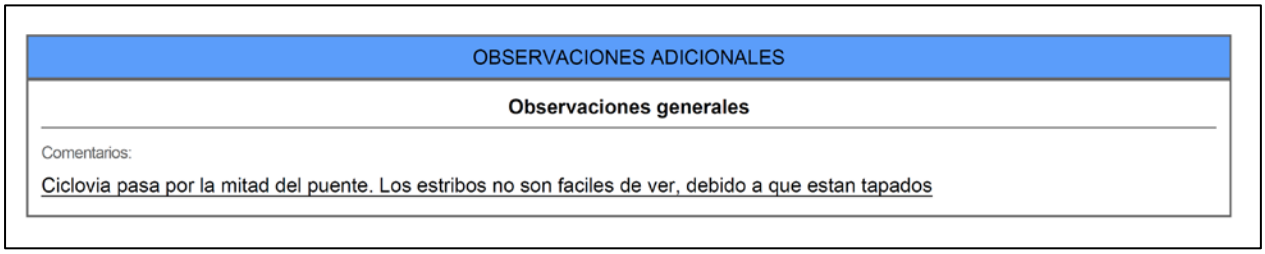


Figura 4-28. Formato digitalizado: Levantamiento geométrico y estructural de puentes (pág. 3)

4.6.3 Inspección básica de puentes

En este numeral se presenta un resumen de la metodología para la inspección básica de puentes, la metodología detallada se describe en el Anexo A-6. Se definió un procedimiento estándar de inspección básica y diagnóstico inicial para la evaluación del estado de la infraestructura de puentes vehiculares y peatonales de Bogotá. Además, se definieron los criterios de evaluación y calificación de los componentes estructurales y no estructurales estableciendo un lenguaje común y estándar para ser utilizado por la Entidad como parte de las actividades de seguimiento y conservación de la infraestructura de puentes de la ciudad. La metodología es una herramienta que le permitirá al IDU conocer y monitorear el estado de los puentes bajo su responsabilidad y a su vez le ayudará a la priorización de recursos públicos para el correspondiente mantenimiento, conservación, habilitación y/o reforzamiento de su infraestructura.

A continuación, se describen las actividades a realizar durante la inspección básica, teniendo en cuenta la planeación, programación y equipamiento requerido, la descripción de los formatos y reportes a diligenciar junto con el procedimiento para la evaluación de patologías para cada uno de los componentes del puente. Los componentes del puente han sido agrupados dentro de lo definido como subestructura, superestructura, conexiones y elementos especiales, y elementos no estructurales o de servicio. Esto con el fin de otorgar una clasificación de la condición del puente basado en los daños observados en cada uno de sus elementos.

4.6.3.1 Metodología general

A partir de la metodología de inspección básica de puentes desarrollada, se realizan las labores de inspección de patologías del puente. El procedimiento busca determinar visualmente las patologías y daños presentes en los elementos estructurales y de servicio que hacen parte del puente. Para cada tipo de elemento se evaluó de forma cualitativa su estado actual para diferentes patologías, según la clasificación y condición del nivel de daño (1: Buena; 2: Regular; 3: Mala; 4: Severa).

Es importante aclarar que la inspección básica es completamente visual y no requiere la medición de ningún parámetro de daño en campo. Es por esto que el resultado de la inspección básica, para el caso de los elementos estructurales, sólo podrá determinar la condición de cada componente en estados 1. Buena, 2. Regular o recomendar la realización de una inspección detallada y/o reparación inmediata. La recomendación de inspección detallada o reparación inmediata se dará como consecuencia de la inspección visual del elemento que resulte en un nivel malo o severo.

4.6.3.2 Actividades de campo

Las actividades de campo de la inspección básica se realizan simultáneamente con las actividades de levantamiento geométrico. Por medio del registro fotográfico se caracterizaron los daños del puente, siguiendo el mismo procedimiento y recorrido descrito en el numeral 4.6.2.2.

Como se mencionó anteriormente, se estableció un recorrido del puente en campo de acuerdo con la identificación, numeración y ubicación de los elementos según la nomenclatura definida en la metodología de levantamiento geométrico y estructural. A continuación, se describe este recorrido.

El recorrido del puente inicia por el tablero (parte superior del puente), registrando detalladamente con fotos cada uno de los elementos que lo componen, tales como: barandas, parapetos, carpeta de rodadura, superficie peatonal andenes, bordillos y juntas de dilatación. Para cada elemento se toma una foto general y foto en primer plano detallando cada elemento, hasta llegar al extremo final del puente. Por ejemplo, para el caso de las barandas, generalmente ubicadas en los laterales del puente, se debe tomar una foto general donde se identifique la totalidad del elemento, se identifique la dirección de recorrido en campo, y se tomen fotos en primer plano detallando el estado del elemento. Esto se debe hacer para cada uno de los elementos que componen el puente.

Terminado el recorrido por el tablero y en la dirección definida según la orientación, se debe recorrer la parte de inferior del puente, registrando fotográficamente de manera general y en primer plano todos los elementos que lo componen, así como lo muestra la Tabla 4-27. De esta manera se registran, según el recorrido y su existencia en el puente, los siguientes elementos: apoyos extremos, estribos, muros de cerramiento, vigas longitudinales, sistema de piso, columnas, muros, pantallas y conexiones viga-columna, entre otros, hasta llegar al extremo final del puente.

En el registro fotográfico debe estar detallado el número total de vigas que componen la parte superior del puente, el número total de pilas y/o muros que componen los apoyos intermedios y externos, y cada elemento en particular (ver Tabla 4-27, recuadro 36 y 41).

De acuerdo con lo descrito anteriormente para cada puente se hace entrega de una carpeta, lista para procesar, identificada con el PK_Puente (PK_ID) que contiene el registro fotográfico numerado de acuerdo con la secuencia del recorrido y el consecutivo de los elementos.

4.6.3.3 Procesamiento de información levantada

Con el registro fotográfico y el formato geométrico y estructural digitalizado se identifican los elementos que conforman el puente, teniendo en cuenta los siguientes cuatro componentes; (1) elementos de servicio, (2) elementos de superestructura, (3) elementos de subestructura y (4) conexiones y elementos especiales, cuyos elementos se describen a continuación.

- **Elementos de servicio (No estructurales):** Hace referencia a la carpeta de rodadura, barandas metálicas, barreras de concreto, juntas de dilatación, y demás elementos cuya funcionalidad principal es garantizar un servicio adecuado a los vehículos y peatones.

- **Elementos Superestructura:** Incluye todos los elementos encargados de transmitir las cargas verticales a la subestructura, tales como las vigas y el tablero.
- **Elementos Subestructura:** Incluye todos los elementos encargados de soportar las cargas verticales, tales como las pilas y los estribos.
- **Apoyos, Conexiones, y Elementos Especiales:** Estos elementos hacen referencia a los apoyos y conexiones que hay entre los elementos de la subestructura y la superestructura, como los neoprenos, conexiones entre elementos de acero y demás. Adicionalmente se contemplan elementos especiales como cables de tensionamiento comunes en puentes atirantados y en arco.

Cada elemento del puente tiene relacionada una matriz de calificación cualitativa a partir de las patologías presentes y el nivel de daño. A continuación, a modo de ejemplo se presenta la matriz de clasificación de un elemento de concreto reforzado perteneciente a la subestructura del puente

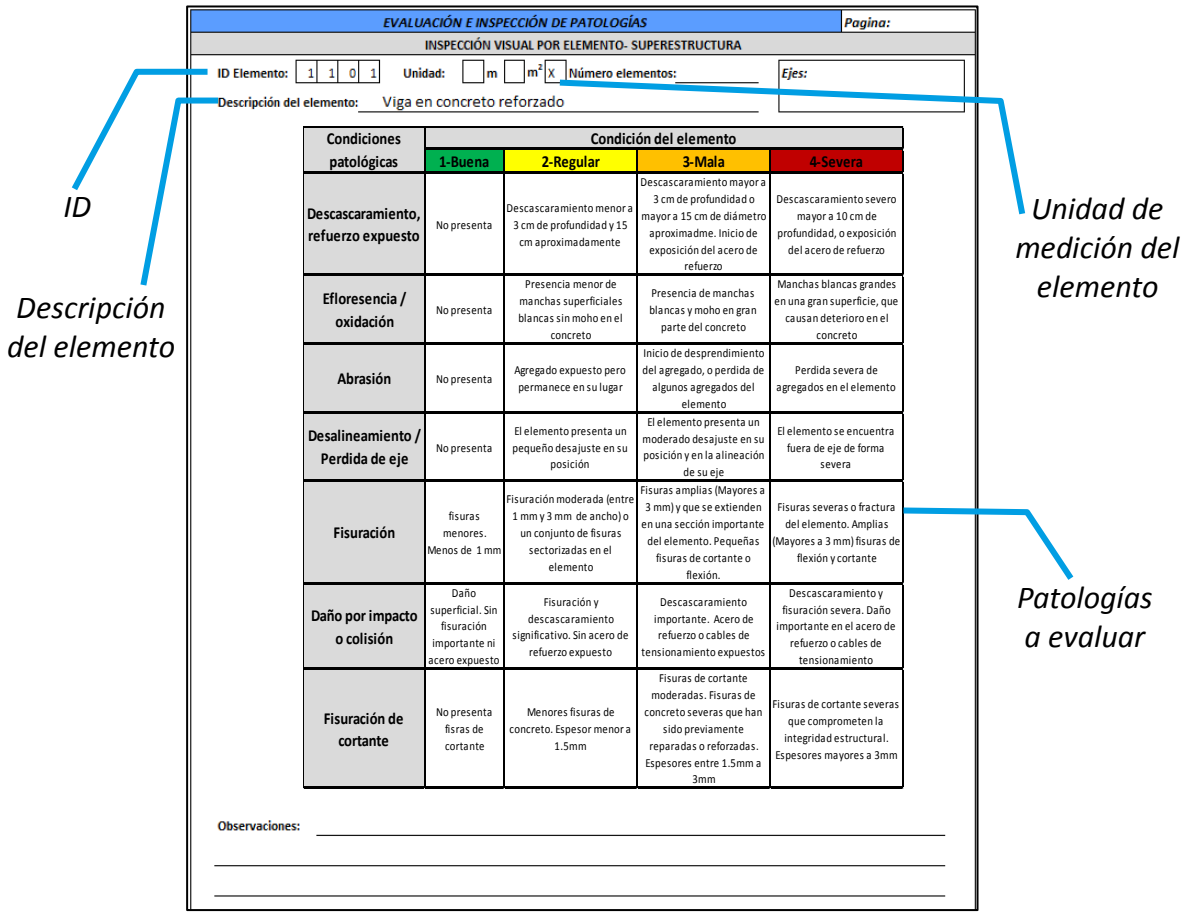
Tabla 4-28 Patologías a evaluar en elementos de concreto reforzado en la subestructura

Condiciones patológicas	Condición del elemento			
	1-Buena	2-Regular	3-Mala	4-Severa
Descascaramiento, refuerzo expuesto	No presenta	Descascaramiento menor a 3 cm de profundidad o menor a 15 cm de diámetro aproximadamente	Descascaramiento mayor a 3 cm de profundidad o mayor a 15 cm de diámetro aproximadme. Inicio de exposición del acero de refuerzo	Descascaramiento severo mayor a 10 cm de profundidad, o exposición del acero de refuerzo con posible oxidación
Eflorescencia / óxido	No presenta	Presencia menor de manchas superficiales (menores a 15%) blancas sin moho en el concreto	Presencia de manchas blancas y moho en gran parte del concreto (menores a 40%)	Manchas blancas grandes en una gran superficie (mayores a 40%), o se evidencia deterioro en el concreto
Abrasión	No presenta	Agregado expuesto pero permanece en su lugar	Inicio de desprendimiento del agregado, o pérdida de algunos agregados del elemento	Pérdida severa de agregados en el elemento
Asentamiento	Asentamiento o rotación leves	Asentamiento o rotaciones moderadas. No compromete la estabilidad estructural	Asentamiento significativo que podría impactar la integridad estructural del puente	Asentamiento severo que compromete la estabilidad de la estructura
Socavación	No presenta	Existe pero no afecta la integridad del puente	Excede los límites tolerables pero puede comprometer la estabilidad de la estructura	Compromete la estructura
Fisuración	Fisuras menores a 1 mm	Fisuración moderada (entre 1 mm y 3 mm de ancho) o un conjunto de fisuras sectorizadas en el elemento	Fisuras amplias (mayores a 3 mm) y que se extienden en una sección importante del elemento.	Fisuras severas o fractura del elemento. Amplias (Mayores a 3 mm) fisuras de flexión y cortante

Tabla 4-28 Patologías a evaluar en elementos de concreto reforzado en la subestructura

Condiciones patológicas	Condición del elemento			
	1-Buena	2-Regular	3-Mala	4-Severa
Daño por impacto o colisión	Daño superficial. Sin fisuración importante ni acero expuesto	Fisuración y descascaramiento significativo. Sin acero de refuerzo expuesto	Descascaramiento importante. Acero de refuerzo o cables de tensionamiento expuestos	Descascaramiento y fisuración severa. Daño importante en el acero de refuerzo o cables de tensionamiento

Con la matriz de patologías de cada elemento y el registro fotográfico tomado en campo, se realiza el diligenciamiento del formato de evaluación e inspección de patologías, registrando según el elemento evaluado la condición el estado de daño. A continuación, en la Figura 4-29 se hace referencia a este formato.



EVALUACIÓN E INSPECCIÓN DE PATOLOGÍAS — Pagina:

INSPECCIÓN VISUAL POR ELEMENTO- SUPERESTRUCTURA

ID Elemento: 1101 Unidad: [ ] m [ ] m² [X] Número elementos: Ejes:

Descripción del elemento: Viga en concreto reforzado

Condiciones patológicas	Condición del elemento			
	1-Buena	2-Regular	3-Mala	4-Severa
Descascaramiento, refuerzo expuesto	No presenta	Descascaramiento menor a 3 cm de profundidad y 15 cm aproximadamente	Descascaramiento mayor a 3 cm de profundidad o mayor a 15 cm de diámetro aproximadme. Inicio de exposición del acero de refuerzo	Descascaramiento severo mayor a 10 cm de profundidad, o exposición del acero de refuerzo
Eflorescencia / oxidación	No presenta	Presencia menor de manchas superficiales blancas sin moho en el concreto	Presencia de manchas blancas y moho en gran parte del concreto	Manchas blancas grandes en una gran superficie, que causan deterioro en el concreto
Abrasión	No presenta	Agregado expuesto pero permanece en su lugar	Inicio de desprendimiento del agregado, o perdida de algunos agregados del elemento	Perdida severa de agregados en el elemento
Desalineamiento / Perdida de eje	No presenta	El elemento presenta un pequeño desajuste en su posición	El elemento presenta un moderado desajuste en su posición y en la alineación de su eje	El elemento se encuentra fuera de eje de forma severa
Fisuración	fisuras menores. Menos de 1 mm	Fisuración moderada (entre 1 mm y 3 mm de ancho) o un conjunto de fisuras sectorizadas en el elemento	Fisuras amplias (Mayores a 3 mm) y que se extienden en una sección importante del elemento. Pequeñas fisuras de cortante o flexión.	Fisuras severas o fractura del elemento. Amplias (Mayores a 3 mm) fisuras de flexión y cortante
Daño por impacto o colisión	Daño superficial. Sin fisuración importante ni acero expuesto	Fisuración y descascaramiento significativo. Sin acero de refuerzo expuesto	Descascaramiento importante. Acero de refuerzo o cables de tensionamiento expuestos	Descascaramiento y fisuración severa. Daño importante en el acero de refuerzo o cables de tensionamiento
Fisuración de cortante	No presenta fisras de cortante	Menores fisuras de concreto. Espesor menor a 1.5mm	Fisuras de cortante moderadas. Fisuras de concreto severas que han sido previamente reparadas o reforzadas. Espesores entre 1.5mm a 3mm	Fisuras de cortante severas que comprometen la integridad estructural. Espesores mayores a 3mm

Observaciones: _____

Figura 4-29 Formato de evaluación e inspección de patologías

Los campos de ubicación y unidad de medición del elemento están sujetos al tipo de elemento que se está evaluando, como lo dice la metodología de inspección básica anexa a este documento. Los únicos elementos a los que se les asigna ubicación referenciada con ejes y número de elementos son las juntas de dilatación, las vigas longitudinales de superestructura, y las columnas/muros de ejes intermedios de subestructura. Los demás elementos de servicio y estructurales se evalúan como un porcentaje afectado en función del área que ocupa o de la longitud total que recorre.

A continuación, en la Tabla 4-29 y la Tabla 4-30 se muestran los formatos generales de evaluación de puentes para el componente estructural y el componente de servicio respectivamente. En ambos formatos se registra la información básica del puente (PKID, dirección, coordenadas y tipo de puente) y la calificación global obtenida de la evaluación.

Tabla 4-29. Formato de calificación de estado de daño para elementos estructurales

PKID Dirección Coordenadas Descripción		*No Requiere acción*	0.00

Calificación Superestructura				
ID	Eje	Elemento	Patología	Calificación
1101		Viga en concreto		
1102		Viga cajon en concreto		
1103		Viga diafragma		
1104		Placa maciza en concreto		
1105		Vigueta en concreto		
1106		Riostra en concreto		
1208		Viga en concreto presforzado		
1209		Viga cajon en concreto presforzado		
1210		Placa en concreto presforzado		
1211		Vigueta en concreto presforzado		
1312		Viga en acero estructural		
1313		Viga cajón en acero estructural		
1314		Vigueta en acero estructural		
1315		Riostra en acero estructural		
1317		Cercha en acero estructural		
1118		Losa en concreto		
1320		Tablero con cerchas o celosía		
1321		Steel Deck		
1322		Arriostramiento lateral		
1323		Viga puente prototipo Bogotá		
1824		Viga en madera		
1825		Riostra en madera		
1826		Cercha en madera		
1827		Tablero con cerchas o celosía de madera		

Tabla 4-29. Formato de calificación de estado de daño para elementos estructurales

Calificación Subestructura				
ID	Eje	Elemento	Patología	Calificación
2101		Pila en concreto		
2102		Muro en concreto		
2103		Estribo en concreto		
2104		Zapata en concreto		
2105		Pilote en concreto		
2106		Dados en concreto		
2107		Pedestal en concreto		
2108		Viga Cabezal en concreto		
2409		Pila en mampostería		
2410		Estribo en mampostería		
2311		Columna en acero estructural		
2312		Estribo en acero estructural		
2313		Pïlote en acero estructural		
2314		Viga cabezal en acero estructural		
2015		Talud		
2316		Culverts en acero estructural		
2117		Culverts en concreto		
2418		Culverts en mampostería		
2319		Torre metálica		
2320		Arco en acero estructural		
2121		Arco en concreto		
2422		Arco en mampostería		
2823		Estribo en madera		
2824		Arco en madera		
2825		Viga transversal en madera		
2826		Columna en madera		
2827		Torre en celosía de madera		

Calificación Conexiones y Elementos Especiales				
ID	Eje	Elemento	Patología	Calificación
3301		Cables secundarios de acero estructural		
3302		Tensores secundarios de acero estructural		
3503		Almohadilla de neopreno		
3304		Apoyo articulado metálico		
3105		Apoyo monolítico en concreto		
3306		Apoyo empotrado en acero estructural		
3307		Conexiones y uniones metálicas		
3308		Aletas de estribos		
3109		Ménsula en concreto		
3310		Ménsula en acero estructural		

El formato de la Tabla 4-29 muestra el listado de los elementos estructurales, su ubicación (si aplica), la patología de daño y la calificación final. Por otro lado, el formato de la Tabla 4-30 es un resumen numérico obtenido de la metodología TES, en donde se hace un listado de los elementos de servicio presentes en el puente, su material, su evaluación y al final se otorga una calificación numérica total para el puente.

Tabla 4-30. Formato de calificación metodología TES para elementos de servicio

PKID Dirección Coordenadas Descripción						0.00	
Elemento	**Material**	**Presencia**	**Evaluacion - elemento**	**Nivel de importancia**	**N.I**	**Evaluación - Puente**	
Juntas de dilatación		No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Carpeta de rodadura	*Asfalto*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
	Concreto	No	0.00				
Barandas y/o parapetos	*Acero*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
	Concreto	No	0.00				
	Mampostería	No	0.00				
	Aluminio	No	0.00				
Andenes y/o bordillos	*Concreto*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Superficie Peatonal	*Metálico*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
	Concreto	No	0.00				
	Mampostería	No	0.00				
	Madera	No	0.00				
Guardarueda	*Concreto*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Drenajes	-	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Cerramientos	*Mapostería*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Rampa de aproximación	*Rampa en concreto*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
	Rampa en asfalto	No	0.00				
Señalización	*Metálicas*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Rampas y/o escaleras	*Concreto*	No	0.00	0%	0%	0.000	0.00
	Metálicas	No	0.00				
	Mampostería	No	0.00				
Factor de escala	***20***			0%	0.00%	0.000	0.000

A continuación se describe la etapa de evaluación del estado y diagnóstico de los puentes de acuerdo con el daño identificado en campo y en las fotos de cada uno de los elementos que componen un puente.

4.7 EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS PUENTES Y DIAGNÓSTICO

A partir de la metodología desarrollada, se clasifica y califica el estado del puente en cuanto a sus componentes estructurales y componentes de servicio, de acuerdo con las patologías y daños encontrados tras la inspección en campo. Para cada uno de los elementos existentes se presenta una tabla de daño que describe y lista las patologías o daños que puede presentar este tipo de elemento. Como resultado, cada puente tendrá una calificación del estado estructural y una calificación del estado de servicio. Adicionalmente, cada puente tendrá una clasificación por el estado de sus elementos de servicio, que resume las condiciones del mismo y que proporciona herramientas e indicadores para la priorización y asignación de recursos públicos para el correspondiente mantenimiento, conservación, habilitación y/o reforzamiento de la infraestructura del Distrito.

4.7.1 Calificación del estado de los componentes estructurales

En el caso de los elementos estructurales, la calificación va a depender de la mayor condición de daño (1: Buena; 2: Regular; 3: Mala; 4: Severa) evidenciado para cada componente (Superestructura, Subestructura, Conexiones y elementos adicionales) según los elementos identificados en el puente y las patologías y condiciones de daño encontradas. Es decir, la calificación estructural corresponderá al máximo nivel de daño encontrado en sus elementos. Es importante recordar que la inspección básica es completamente visual y por lo tanto el resultado de la inspección básica, para el caso de los elementos estructurales, sólo podrá determinar la condición de cada componente en estados 1. Buena, 2. Regular o recomendar la realización de una inspección detallada y/o reparación inmediata.

4.7.2 Calificación del estado de servicio de los puentes

El procedimiento para determinar el estado de servicio de los puentes toma como base la evaluación de patologías de la inspección básica. Según las condiciones de daño registradas en los elementos indispensables para la funcionalidad del puente, se califica, por medio del uso de factores de amplificación, el estado y diagnóstico del puente (ver Anexo A-6).

Se definieron los elementos indispensables dependiendo del tipo de puente: las barandas, la carpeta de rodadura, y las juntas de dilatación para los puentes vehiculares, mientras que para los puentes peatonales solo las barandas y la superficie peatonal. Estos elementos fueron seleccionados debido a que siempre deben existir en un puente de acuerdo a su uso, y representan el buen o mal estado funcional del mismo. Si uno o varios de estos elementos se encuentran en condición mala o severa la funcionalidad y servicio del puente se ve gravemente afectada. Siguiendo la metodología descrita en el anexo correspondiente, se asigna el estado de servicio de los puentes como se ilustra en la Tabla 4-31 donde se relaciona el puntaje obtenido y el estado asignado. El procedimiento general puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Valoración de condición del elemento:
   Una vez elegidos los elementos indispensables se debe ir a la evaluación de patologías registrada previamente en la inspección básica de puentes. Para cada elemento indispensable, y para sus condiciones patológicas respectivas se realiza el siguiente cálculo:
   - Se multiplica el valor de la condición patológica (1, 2, 3 o 4) por el respectivo porcentaje de daño para cada patología.
   - Luego, se suman los valores así obtenidos para cada patología.
   - Finalmente, la valoración del elemento se toma como el máximo valor obtenido.

2. Factores de amplificación (FA):
   En este paso se multiplican los resultados obtenidos por factores de amplificación con el fin de separar en grupos los puentes de acuerdo con su estado de servicio. La idea principal de estos factores de amplificación es la de separar de manera adecuada los puentes según su estado y para ello se utilizan cuatro factores que evitan las zonas grises en las calificaciones intermedias. Con este método se garantiza que los elementos con mayor daño y peor condición sean los que aportan a la determinación del estado de servicio del puente.

3. Calificación de estado
   Finalmente, con la calificación sumada y para todos los puentes evaluados y separados en puentes vehiculares y peatonales, se asigna el estado de servicio de acuerdo con el orden de magnitud (unidades, decenas, centenas y miles) de su calificación. Esto es, los puentes con una calificación en miles tienen un estado de servicio MALO, aquellos en centenas REGULAR, lo que tengan un valor en decenas tendrán un estado ACEPTABLE, y lo que tengan valores en unidades tendrán un estado BUENO.

Finalmente, y con el fin de obtener una calificación del estado de servicio en el rango de 0 a 100, donde 0 corresponde al peor estado posible y 100 al mejor, la calificación se normaliza de la siguiente forma:

Tabla 4-31. Calificación de estado de servicio de puentes

Calificación Amplificada	Calificación de Estado	
Miles	0 - 33	Malo
Centenas	33 - 66	Regular
Decenas	66 – 99	Aceptable
Unidades	100	Bueno

4.7.3 Clasificación de elementos de servicio - Metodología TES

Para los elementos de servicio, la clasificación se realiza utilizando la metodología TES la cual hace una ponderación de los daños observados en la visita teniendo en cuenta el tiempo (T) y costo económico (E) que conllevaría realizar los mantenimientos a los elementos con daños, y al riesgo que tendrían los usuarios en términos de seguridad (S) dado las patologías encontradas. Esto arroja una clasificación numérica que indica el estado de los componentes de servicio.

La calificación de daño por elemento queda registrada en el formato de evaluación e inspección de patologías. Este formato por elemento identifica el componente al que hace parte, la unidad de medición, la referencia al eje en el que se encuentra ubicado el elemento, y el listado de patologías específicas de acuerdo con el material y al grupo de componente. En la Figura 4-30 a la Figura 4-33 se muestra el formato diligenciado para algunos elementos (viga de concreto, losa en concreto, pilas en concreto y barandas en acero) del puente con PKID 22149126. Se debe tener en cuenta que el elemento baranda de acero se evalúa de acuerdo con el porcentaje de daño encontrado en función de la longitud total de barandas, y no requiere ubicación, mientras el elemento tipo viga de concreto requiere el eje de ubicación y el número total de vigas por luz.

Una vez evaluado el estado de daño, se procesa la calificación de los elementos estructurales y de servicio de acuerdo con lo descrito anteriormente y se obtienen dos calificaciones. En la Figura 4-34 se muestra la calificación específica del componente estructural y en la Figura 4-35 se muestra la calificación de la metodología TES para los elementos de servicio del puente vehicular con PKID 22149126. La evaluación

completa de este puente puede ser consultada en el Anexo A-6, en la carpeta de levantamiento e inspección identificada con PKID 22149126.

EVALUACIÓN E INSPECCIÓN DE PATOLOGÍAS | **Pagina:**

INSPECCIÓN VISUAL POR ELEMENTO- SUPERESTRUCTURA

ID Elemento: 1 1 0 1 Unidad: [ ] m [ ] m^2 [X] Número elementos: 16 *Ejes.* 7-8

Descripción del elemento: Viga en concreto

Condiciones patológicas	Condición del elemento			
	1-Buena	2-Regular	3-Mala	4-Severa
Descascaramiento, refuerzo expuesto	B,D,G,H,J,P	A,E,F,I,L,M,N,O	C	K
Efloresencia / oxidación	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P			
Abrasión	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P			
Desalineamiento / Perdida de eje	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P			
Fisuración	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P			
Daño por impacto o colisión	B,D,G,H,J,P	A,E,F,I,L,M,N,O	C	K
Fisuración de cortante	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P			

Observaciones:

Figura 4-30. Formato de evaluación e inspección de patologías, para viga de concreto eje 7-8.

EVALUACIÓN E INSPECCIÓN DE PATOLOGÍAS | **Pagina:**

INSPECCIÓN VISUAL POR ELEMENTO- SUPERESTRUCTURA

ID Elemento: 1 1 1 8 Unidad: [ ] m [X] m^2 [ ] Número elementos: _____ *Ejes.*

Descripción del elemento: Losa en concreto

Condiciones patológicas	Condición del elemento			
	1-Buena	2-Regular	3-Mala	4-Severa
Descascaramiento, refuerzo expuesto	99	1		
Efloresencia / oxidación	100			
Corrosión	100			
Fisuración	99	1		

Observaciones: _____

Figura 4-31. Formato de evaluación e inspección de patologías, para losa en concreto

EVALUACIÓN E INSPECCIÓN DE PATOLOGÍAS | **Pagina:**

INSPECCIÓN VISUAL POR ELEMENTO- SUBESTRUCTURA

ID Elemento: 2 1 0 1 Unidad: [ ] m [ ] m^2 [X] Número elementos: 2 *Ejes.* 12

Descripción del elemento: Pila en concreto

Condiciones patológicas	Condición del elemento			
	1-Buena	2-Regular	3-Mala	4-Severa
Descascaramiento, refuerzo expuesto	1,2			
Eflorescencia / oxidación	1,2			
Abrasión	1,2			
Asentamiento	1,2			
Socavación	1,2			
Fisuración	1,2			
Daño por impacto o colisión	1,2			

Observaciones:

Figura 4-32. Formato de evaluación e inspección de patologías, para pila en concreto eje 12

EVALUACIÓN E INSPECCIÓN DE PATOLOGÍAS | **Pagina:**

INSPECCIÓN VISUAL POR ELEMENTO- SERVICIO

ID Elemento: 4 3 0 4 Unidad: X m ☐ m^2 ☐ Número elementos: _____ *Ejes.*

Descripción del elemento: Barandas en acero

Condiciones patológicas	Condición del elemento			
	1-Buena	2-Regular	3-Mala	4-Severa
Corrosión	100			
Fisuración/Fractura	100			
Conexiones y Anclajes	100			
Distorsión	100			
Alineación	100			
Daño por impacto o colisión	100			

Observaciones: _____

Figura 4-33. Formato de evaluación e inspección de patologías, para barandas en acero

PKID Dirección Coordenadas Descripción	22149126 Avenida Pepe Sierra por Avenida Paseo de los Libertadores 4.6995,-74.0551 Puente vehicular	*Inspección detallada/Reparación Inmediata*	4.00

Calificación Superestructura				Severo
ID	Eje	Elemento	Patología	Calificación
1101	1-2	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
1101	2-3	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	3
1312	2-3	Viga en acero estructural	Corrosión	1
1101	3-4	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
1312	3-4	Viga en acero estructural	Corrosión	1
1101	4-5	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
1101	5-6	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
1101	6-7	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
1101	7-8	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	4
1101	8-9	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	3
1101	9-10	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	4
1101	10-11	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
1101	11-12	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
1118		Losa en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	2
1101	12-13	Viga en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1

PKID Dirección Coordenadas Descripción	22149126 Avenida Pepe Sierra por Avenida Paseo de los Libertadores 4.6995,-74.0551 Puente vehicular	*Inspección detallada/Reparación Inmediata*	4.00

Calificación Suberestructura				Regular
ID	Eje	Elemento	Patología	Calificación
2108		Viga Cabezal en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	2
2103		Estribo en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	2	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	3	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	4	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	5	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	6	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	7	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	8	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	9	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	10	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	11	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1
2101	12	Pila en concreto	Descascaramiento, refuerzo expuesto	1

Figura 4-34. Formato de Calificación de estado de daño para elementos estructurales

PKID	22149126	97.72
Dirección	Avenida Pepe Sierra por Avenida Paseo de los Libertadores	
Coordenadas	4.6995,-74.0551	
Descripción	*Puente vehicular*	

Elemento	Material	Presencia	Evaluacion - elemento	Nivel de importancia	N.I	Evaluación - Puente	
Juntas de dilatación		Si	0.00	25%	25.0%	0.000	0.00
Carpeta de rodadura	*Asfalto*	Si	0.00	20%	20.0%	0.000	0.00
	Concreto	No	0.00				
Barandas y/o parapetos	*Acero*	Si	0.00	10%	10.0%	0.000	0.00
	Concreto	No	0.00				
	Mampostería	No	0.00				
	Aluminio	No	0.00				
Andenes y/o bordillos	*Concreto*	Si	0.68	5%	5.0%	0.034	0.68
Superficie Peatonal	*Metálico*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
	Concreto	No	0.00				
	Mampostería	No	0.00				
	Madera	No	0.00				
Guardarueda	*Concreto*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Drenajes	-	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Cerramientos	*Mapostería*	Si	0.00	5%	5.0%	0.000	0.00
Rampa de aproximación	*Rampa en concreto*	No	0.00	10%	10.0%	0.080	1.60
	Rampa en asfalto	Si	0.80				
Señalización	*Metálicas*	No	0.00	0%	0.0%	0.000	0.00
Rampas y/o escaleras	*Concreto*	No	0.00	0%	0%	0.000	0.00
	Metálicas	No	0.00				
	Mampostería	No	0.00				
Factor de escala	***20***			75%	75.00%	0.114	2.280

Figura 4-35. Formato de Calificación metodología TES para elementos de servicio

4.7.4 Consolidación de información

La información consolidada del levantamiento geométrico, estructural e inspección básica y diagnóstico de puentes, se entrega como anexo en versión digital a este informe (ver Anexo A-6), e incluye además del informe técnico mencionado, los siguientes anexos para cada uno de los puentes:

- Formatos de campo
  - Formato de levantamiento geométrico en campo.
- Registro fotográfico
  - Fotografías tomadas en campos el día de la visita.
- Formatos digitalizados
  - Formato de levantamiento geométrico y estructural de puentes.
  - Formato de Evaluación e inspección de patologías para elementos de puentes.
- Evaluación
  - Formato de Calificación de estado de daño para elementos estructurales.
  - Formato de Calificación metodología TES para elementos de servicio.
  - Estado de servicio.
- Informe
  - Informe de resultados de inspección básica de puentes.
- Metodología de levantamiento geométrico y estructural de puentes.
- Metodología de inspección básica de puentes.

- Listado de los puentes con información de levantamiento geométrico, estructural e inspección básica, relacionando el PK-ID y actividad de campo elaborada.

El informe de resultados de la inspección básica es un resumen general del puente que presenta las características mínimas necesarias para la descripción del mismo, las condiciones de patologías o daños más relevantes encontrados, y los resultados generales de su evaluación. El detalle de evaluación de todos los elementos y componentes del puente pueden ser consultados en el formato limpio y los diferentes anexos al informe.

4.7.5 Priorización y clasificación de puentes según calificación

El procedimiento que se debe llevar para realizar el análisis de priorización se puede resumir en los siguientes pasos, los cuales únicamente son la propuesta definida por el Consultor. La versatilidad de las herramientas utilizadas para esta priorización permite adoptar diferentes combinaciones de criterios prioritarios, según la necesidad específica o disponibilidad de recursos para atender temas particulares.

1. Ordenar resultados en el siguiente orden:
    a. Calificación estructural: mayor a menor
    b. Calificación de servicio normalizada: menor a mayor
    c. Calificación TES: mayor a menor. Debemos recordar que en la clasificación TES valores mayores indican puentes con mayores daños.

2. Como proceder:
    a. Si la calificación estructural es 3 ó 4, el daño estructural prima sobre el estado de servicio. Este estado estructural puede ser peligroso (la inspección básica no lo determina), y por lo tanto requiere de una inspección detallada y/o reparación inmediata.
    b. Si la calificación estructural es menor a 3, se requiere realizar seguimiento periódico, aquí primaría la atención por servicio. Serían prioritarios aquellos puentes con un estado de servicio MALO y dentro de este grupo se priorizaría considerando la calificación TES de mayor a menor valor.

El resultado de la inspección es muy versátil y permite priorizar con diferentes criterios tales como tipo de vías, tipología de puente, elementos específicos que requieren reparación, etc.

4.7.6 Consideraciones especiales en el trabajo de campo

Producto de las visitas de campo realizadas se identificaron una serie de situaciones especiales que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar el levantamiento y registro fotográfico de puentes y que dificultan y limitan el alcance y calidad de las inspecciones:

- Problemas de inseguridad pública: El día de la visita el puente no pudo ser levantado debido a presencia de grupo de personas que lo impidieron, poniendo en riesgo la seguridad de los inspectores de campo y de los equipos. Para estos puentes se debe reprogramar la visita de campo con las medidas de seguridad pertinentes.

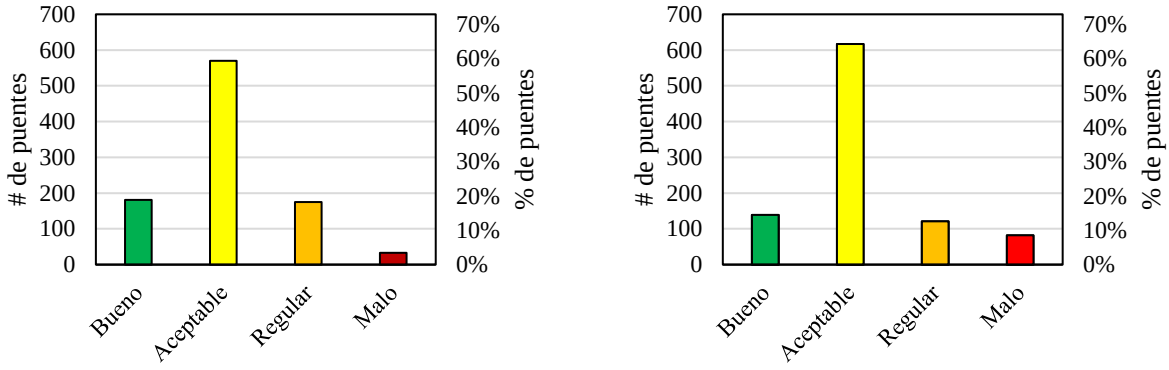
- Accesibilidad parcial: En la visita de campo se identificaron los elementos de un puente, pero no se puede ver y cuantificar la totalidad de ellos (e.g. vigas, pilas dentro de cerramientos) ni registrar fotográficamente debido a obstáculos que impiden el acceso y la visual. Para estos puentes en el proceso de evaluación se crea el elemento y se deja sin calificar incluyendo un comentario donde se especifica que en la visita hubo acceso parcial y se hace el diagnóstico sobre lo visible, ya que es una inspección básica visual.
- Accesibilidad nula: En la visita de campo no se pudo identificar la totalidad de los elementos de un puente (e.g. propiedad privada, altura de agua en canal excesiva). Para estos puentes se hace el diagnóstico sobre lo visible y se comenta que no es posible identificar y evaluar algunos elementos.

4.7.7 Resumen de resultados de la evaluación del estado de los puentes

Las metodologías de levantamiento geométrico, estructural y de inspección básica de puentes fueron aplicados a la totalidad de los puentes en el inventario. No obstante, dentro de la base de datos se encontraron estructuras que pueden no ser consideradas como estructuras ingenieriles de puentes como son los túneles, las alcantarillas y los puentes vernaculares o artesanales, los cuales se clasifican bajo el uso de Otros. Las razones para su exclusión de la base de datos se presentan en detalle en el Capítulo 6. Los resultados presentados a continuación corresponden a la valoración del estado estructural y de servicio de los 959 puentes del inventario (554 puentes vehiculares y 405 puentes peatonales), excluyendo las estructuras clasificadas como Otros.

4.1.1.1 Estado general de los puentes

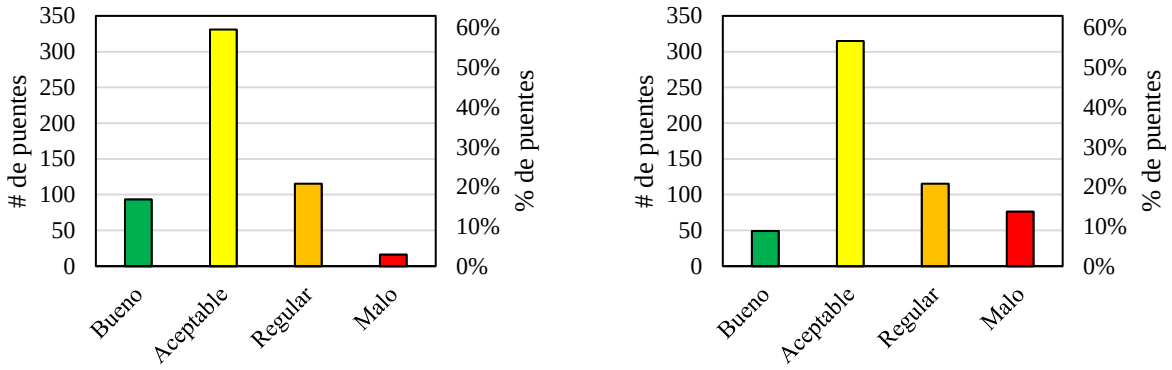
En la Figura 4-36 se muestra el estado de estructural y de servicio para la totalidad de los puentes. A partir de la figura se evidencia que, de los 959 puentes inspeccionados, el 19% se encuentra en estado estructural Bueno, el 59% en Aceptable, el 18% en Regular, y el 4% restante en Malo. En cuanto a servicio, el 14% se encuentra en estado Bueno, el 64% en Aceptable, el 21% en Regular, y 3% en Malo. Dado que gran parte de los puentes se encuentran en estado Aceptable, se puede afirmar que la mayoría de puentes solo requieren alguna intervención menor para encontrarse en óptimas condiciones.



a) Estado estructural b) Estado de servicio

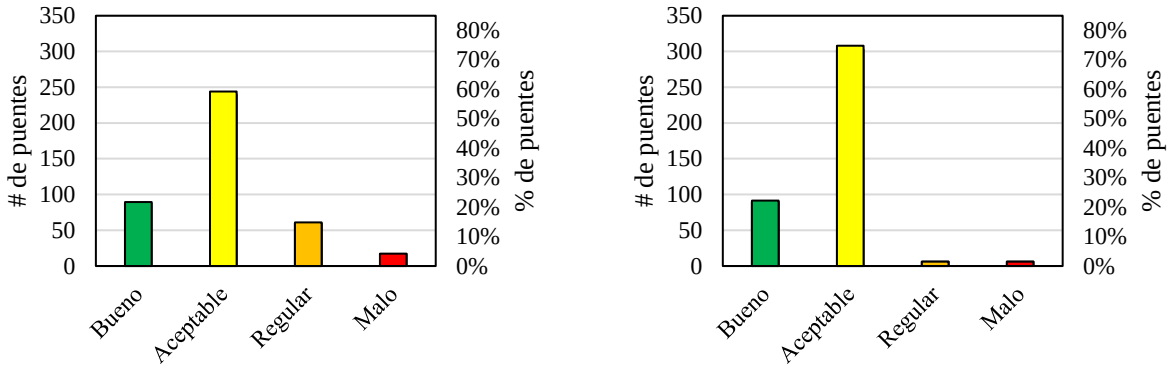
Figura 4-36. Estado estructural y de servicio de la totalidad de los puentes de Bogotá D.C.

En la Figura 4-37 se muestra la distribución porcentual de las calificaciones de estado estructural y de servicio para puentes vehiculares, mientras que en la Figura 4-38 se muestran aquellas para los puentes peatonales.



a) Estado estructural b) Estado de servicio

Figura 4-37. Estado estructural y de servicio de los puentes vehiculares de Bogotá D.C.



a) Estado estructural b) Estado de servicio

Figura 4-38. Estado estructural y de servicio de los puentes peatonales de Bogotá D.C.

De lo anterior es posible concluir que en términos generales los puentes peatonales se encuentran en mejor estado que los vehiculares. Esto se hace más evidente en el estado de servicio, ya que el 34 % de los puentes vehiculares se califican como Regular o Malo, a diferencia de los puentes peatonales donde dicho porcentaje es menor al 5%. En cuanto al estado estructural, el 24% y 19% de los puentes vehiculares y peatonales respectivamente se encuentran en los estados Regular o Malo.

Por último, de la Figura 4-39 a la Figura 4-42 se presenta la distribución espacial de la calificación del estado estructural y de servicio para los puentes vehiculares y peatonales respectivamente.

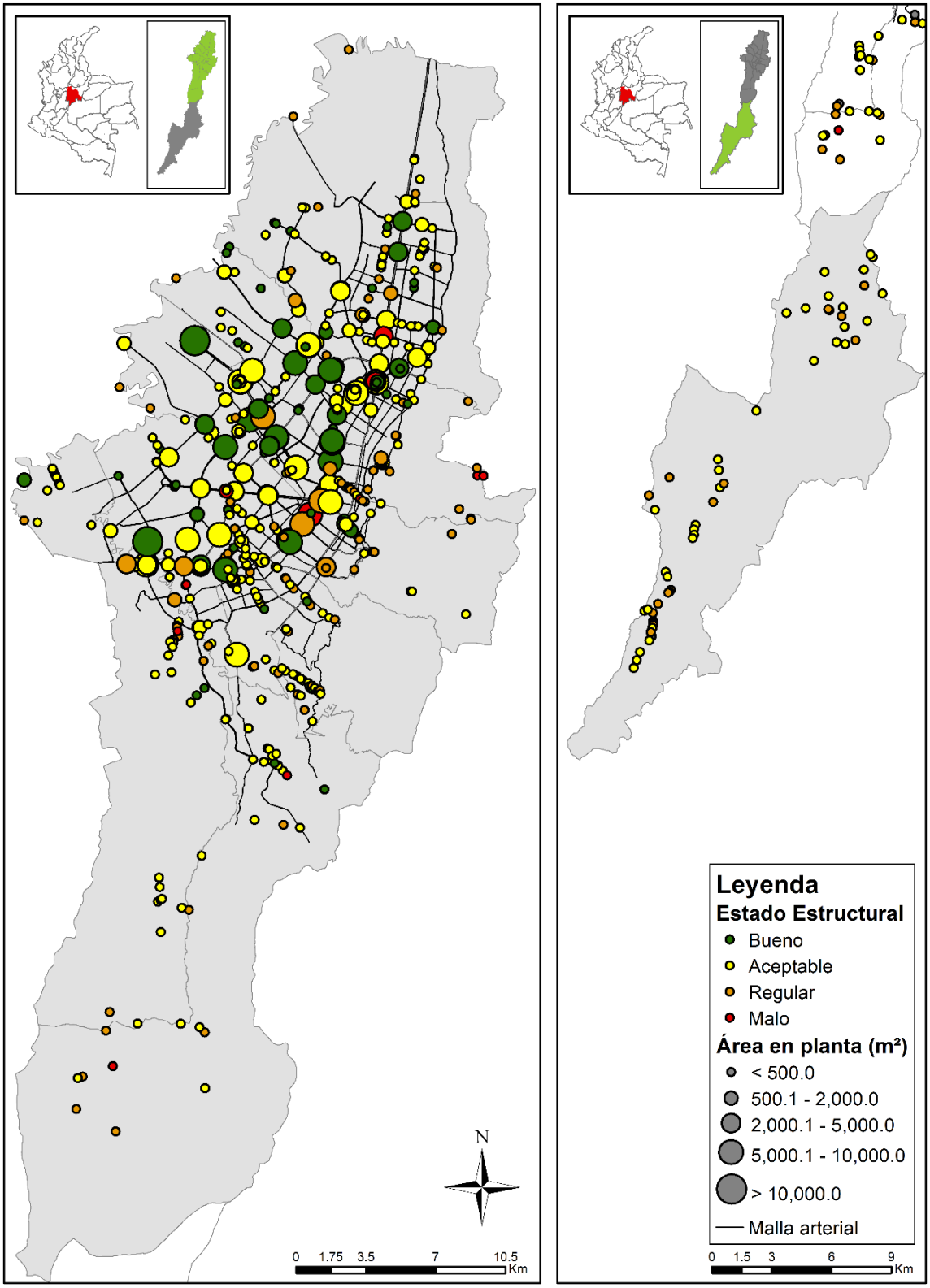


Figura 4-39. Distribución espacial del estado estructural de los puentes vehiculares de Bogotá D.C.

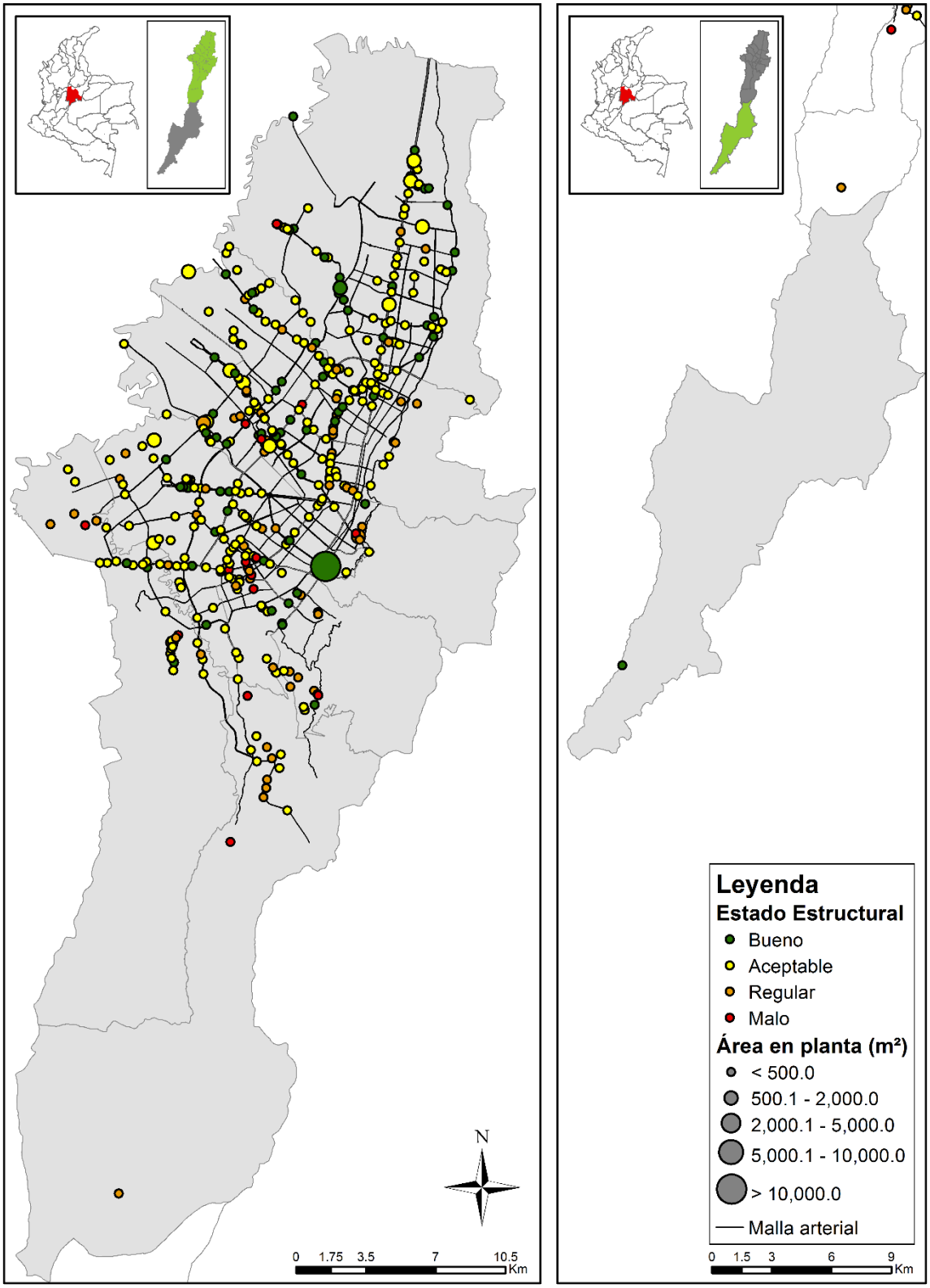


Figura 4-40. Distribución espacial del estado estructural de los puentes peatonales de Bogotá D.C.

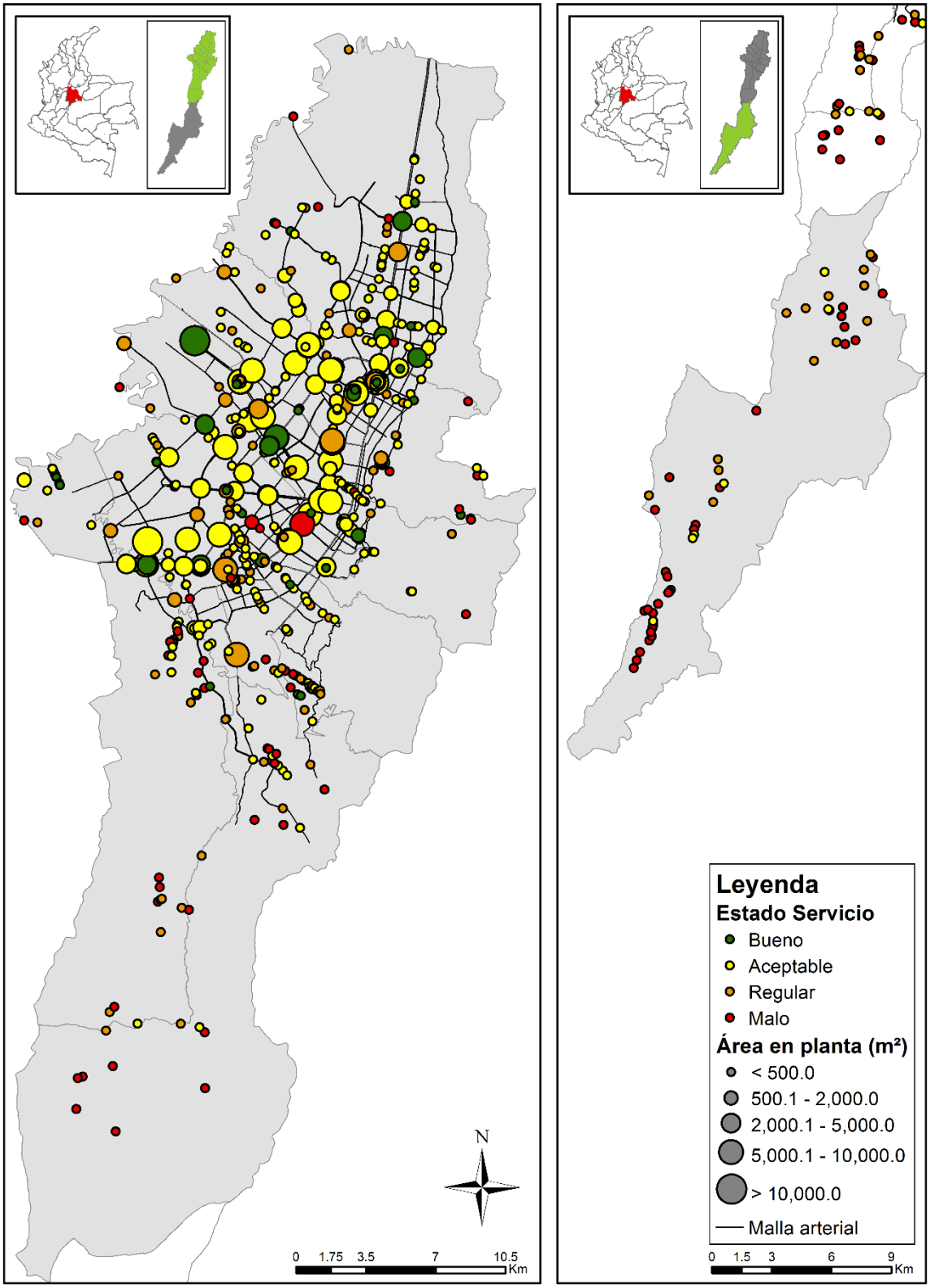


Figura 4-41. Distribución espacial del estado de servicio de los puentes vehiculares de Bogotá D.C.

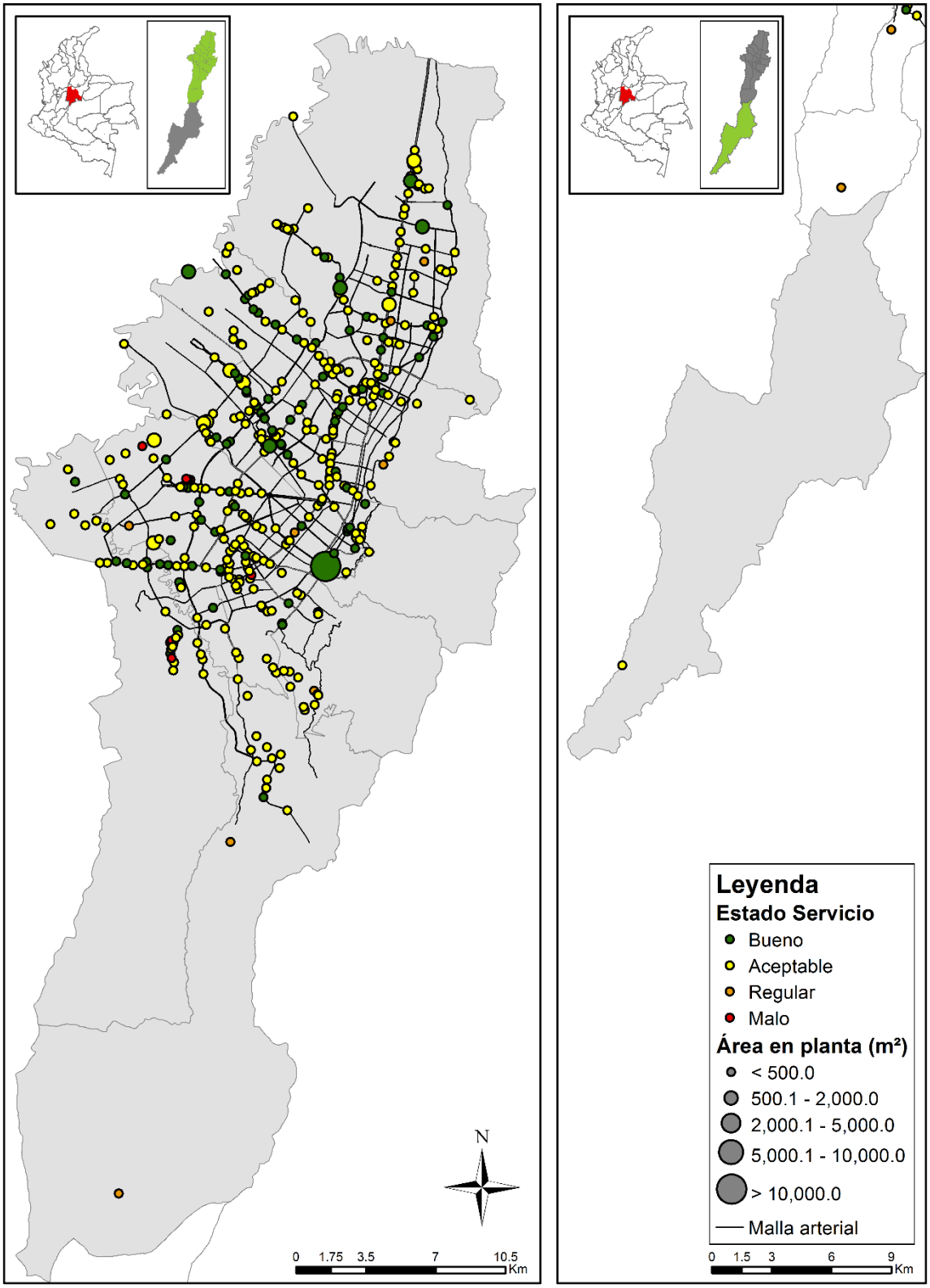


Figura 4-42. Distribución espacial del estado de servicio de los puentes peatonales de Bogotá D.C.

4.1.1.2 Estado de los puentes por tipología estructural y malla vial

Los resultados de la evaluación del estado de los puentes peatonales y vehiculares también se agruparon por tipologías estructurales (según la definición de tipologías que se presenta en el Capítulo 6), con el fin de identificar en cuales de éstas se concentra en mayor medida las afectaciones en elementos estructurales y de servicio. A continuación, en la Figura 4-43 y Figura 4-44 se presenta la distribución de tipologías peatonales y vehiculares en el inventario.

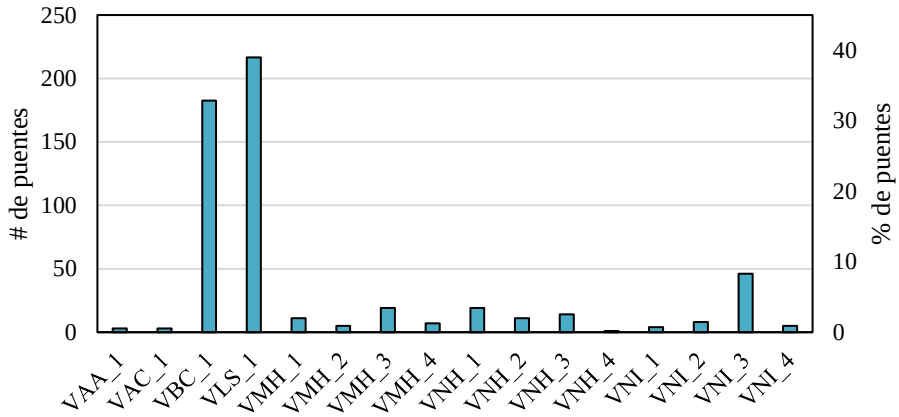


Figura 4-43. Puentes vehiculares por tipología estructural

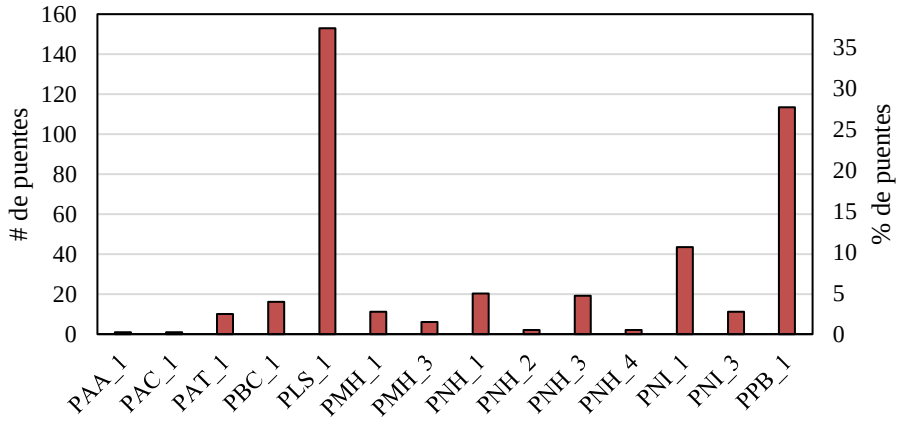


Figura 4-44. Puentes peatonales por tipología estructural

En la Figura 4-45 y Figura 4-46 se presenta la distribución porcentual del estado estructural y de servicio por tipología para los puentes vehiculares, respectivamente. En la Figura 4-47 y Figura 4-48 se muestra esta misma información para los puentes peatonales.

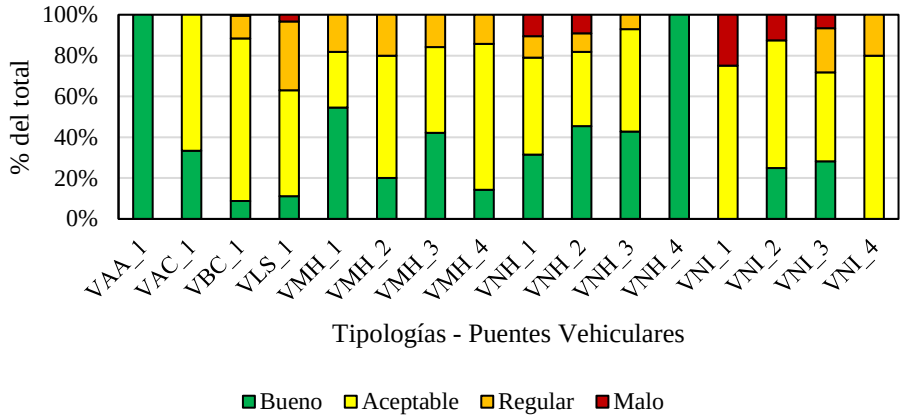


Figura 4-45. Distribución porcentual del estado estructural de los puentes vehiculares para cada tipología estructural

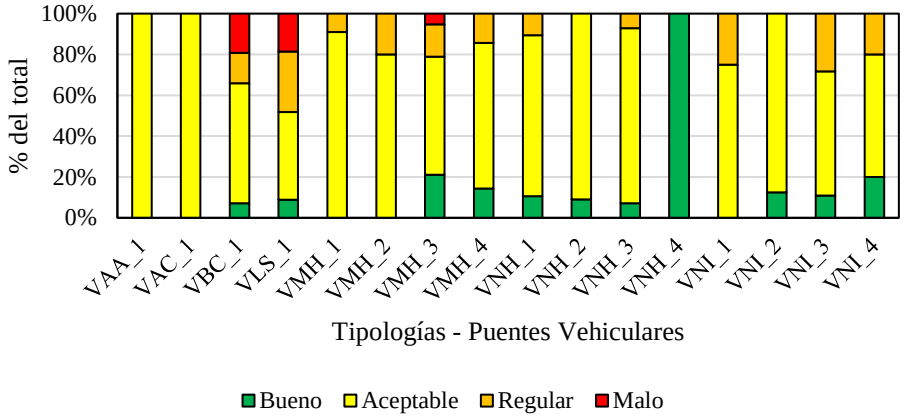


Figura 4-46. Distribución porcentual del estado de servicio de los puentes vehiculares para cada tipología estructural

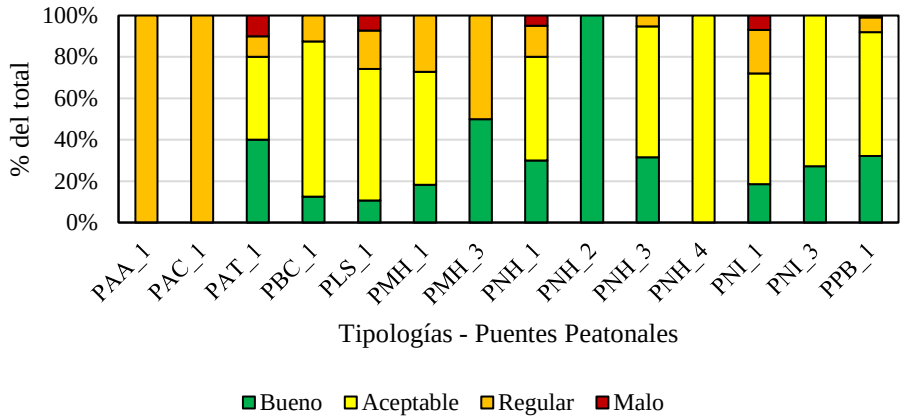


Figura 4-47. Distribución porcentual del estado estructural de los puentes peatonales para cada tipología estructural

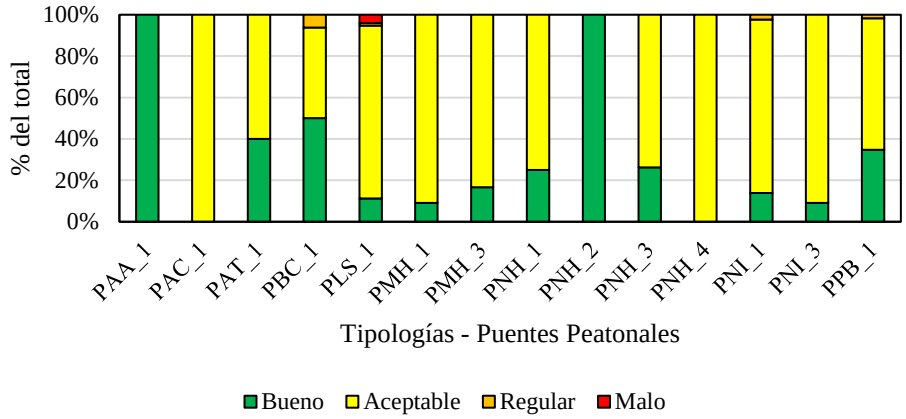


Figura 4-48. Distribución porcentual del estado de servicio de los puentes peatonales para cada tipología estructural

En los puentes vehiculares se evidencia que las tipologías con mayor porcentaje relativo de puentes en estado estructural Regular o Malo son la VLS_1, VNI_3, y VNH_1 con el 37%, 28.3%, y el 21% respectivamente. Por otro lado, las tipologías VLS_1, VBC_1, y VNI_3 presentan el mayor porcentaje de puentes en estado de servicio Regular o Malo con el 48%, 34%, y 28.26%. Lo anterior es crítico considerando que las tipologías VLS_1 (puentes vehiculares de luz simple) y VBC_1 (puentes vehiculares tipo box culvert) representan más del 70% del total de puentes vehiculares de la ciudad.

En el caso de los puentes peatonales, se puede observar que las tipologías PNI_1, PLS_1, PAT_1, y PNH_1 presentan el mayor porcentaje relativo de puentes en estado estructural Regular o Malo con el 28%, 25.3%, 20.2%, y el 20% respectivamente. Es de resaltar que la tipología PAT_1 (puentes peatonales atirantados) presente un alto porcentaje de puentes en estos estados, teniendo en cuenta que esta tipología representa menos del 5% del total de puentes peatonales, lo cual puede indicar que existen deficiencias o características que afectan sus condiciones de servicio en gran medida. En cuanto al estado de servicio, se evidencia que la tipología PLS_1 (puentes peatonales de luz simple) presenta un porcentaje relativo de 5.3% con estado Regular o Malo, mientras el resto de tipologías se encuentra mayoritariamente en estado Aceptable. Por último, el estado general de los puentes con tipología PPB_1 (puentes prototipo Bogotá) es adecuado, ya que el 92% y 98% se califican como Bueno o Aceptable en términos estructurales y de servicio respectivamente.

Adicionalmente, los resultados obtenidos también se agruparon de acuerdo a la malla vial a la que pertenecen los puentes. La Tabla 4-32 presenta el total de puentes por malla vial, y la Figura 4-49 y Figura 4-50 muestran la distribución porcentual relativa del estado estructural y de servicio de los puentes en cada malla vial. A partir de estas figuras, se evidencia que hay una relación directa entre la importancia de la malla vial y el estado estructural y de servicio de los puentes, representada en una disminución generalizada del porcentaje de puentes en estado Bueno y Aceptable. Esta tendencia se repite tanto para los puentes vehiculares como peatonales de la ciudad. Por último, es importante resaltar que el estado general de los puentes vehiculares rurales es muy malo tanto en términos estructurales y de servicio comparado con los demás. Por lo tanto, se recomienda hacer una intervención integral a todos los puentes que hacen parte de esta malla vial.

Tabla 4-32. Puente vehiculares y peatonales por malla vial

Malla Vial	Vehiculares	Peatonales
Arterial Vital	257	212
Arterial No vital	52	32
Intermedia y Local	166	159
Rural	79	2
Total general	**554**	**405**

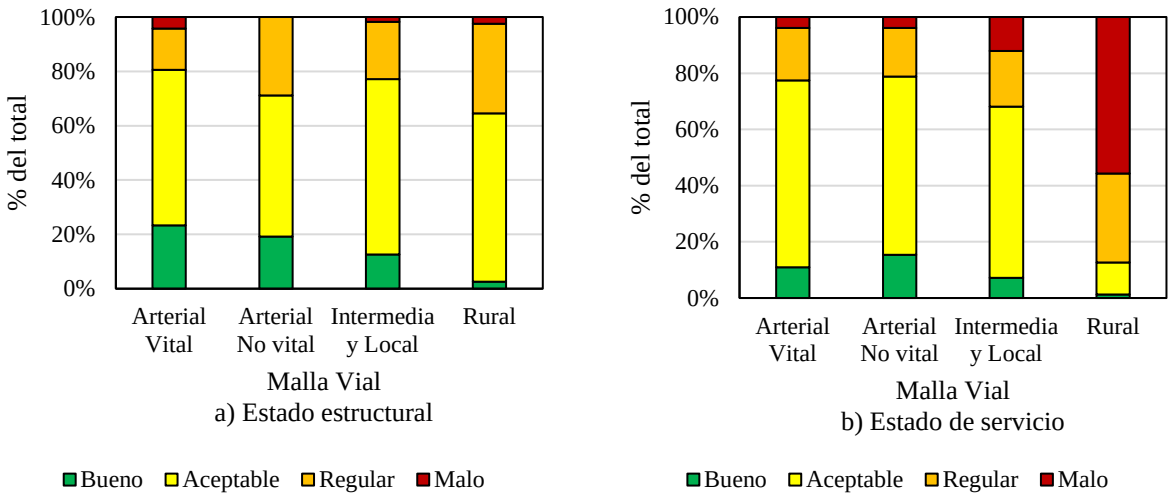


Figura 4-49. Distribución porcentual del estado de los puentes vehiculares según el tipo de malla vial

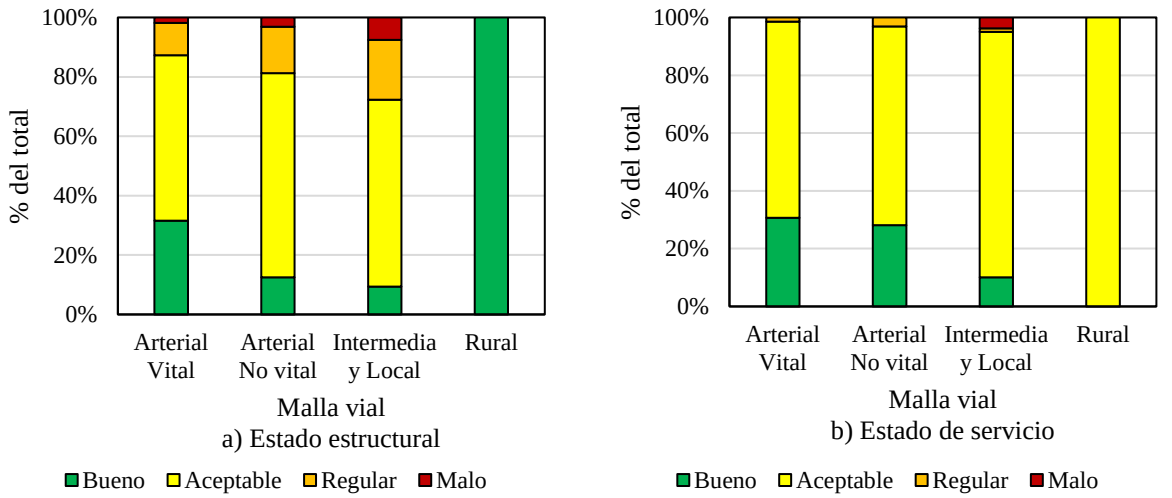


Figura 4-50. Distribución porcentual del estado de los puentes peatonales según el tipo de malla vial

4.1.1.3 Resumen de puentes en estado malo o regular

A continuación se presenta un resumen de los puentes identificados con estado estructural o de servicio malo o regular, con el fin de recomendar un posible orden de intervenciones de los programas de conservación y mantenimiento de la infraestructura de puentes del Distrito. Cabe resaltar que estas intervenciones no corresponden al mismo alcance que se describe en el Capítulo 8, donde se refiere a intervenciones para reforzamiento estructural o actualización sísmica de los puentes.

De acuerdo con la evaluación a partir de la inspección básica, los 16 puentes vehiculares listados en la Tabla 4-33 presentan un estado estructura malo, y los 115 puentes vehiculares listados en la Tabla 4-34 presentan un estado estructural regular.

Tabla 4-33. Listado de puentes vehiculares en estado estructural malo

22143026	22144593	22150770	24119271	24124796	24189752
22143791	22148054	22152105	24124616	24124812	
22144262	22149126	22154017	24124637	24189733	

Tabla 4-34. Listado de puentes vehiculares en estado estructural regular

22142959	22158252	24119331	24124621	24189732	24189798
22143095	22158273	24119339	24124626	24189740	24189799
22143635	22158337	24119345	24124630	24189746	24189801
22143797	22158357	24119346	24124631	24189747	24189802
22143992	22158560	24119347	24124633	24189748	24189804
22147606	22158594	24119369	24124634	24189749	24189812
22147953	24119246	24119372	24124655	24189751	24190008
22148754	24119267	24119377	24124658	24189754	24190009
22150493	24119268	24119379	24124694	24189756	24190015
22152066	24119280	24119380	24124711	24189757	24190020
22153290	24119283	24119492	24124720	24189763	24190031
22154117	24119285	24119493	24124723	24189769	24190032
22154208	24119288	24119495	24124724	24189776	24190033
22155745	24119289	24124592	24124736	24189778	24190037
22156363	24119291	24124597	24124746	24189781	24190046
22157302	24119295	24124600	24124748	24189782	
22157334	24119296	24124601	24124760	24189786	
22157522	24119301	24124603	24124762	24189788	
22157528	24119305	24124613	24124764	24189795	
22157925	24119327	24124617	24124795	24189797	

De acuerdo con la evaluación a partir de la inspección básica, los 76 puentes vehiculares listados en la Tabla 4-35 presentan un estado de servicio malo, y los 115 puentes vehiculares listados en la Tabla 4-36 presentan un estado de servicio regular.

Tabla 4-35. Listado de puentes vehiculares en estado de servicio malo

22143635	24124695	24189736	24189766	24189797	24190026
22158178	24124712	24189740	24189767	24189798	24190027
24119283	24124724	24189741	24189769	24189799	24190028
24119292	24124725	24189745	24189770	24189801	24190029
24119324	24124736	24189747	24189771	24189803	24190030
24119325	24124741	24189748	24189778	24189804	24190032
24119348	24124810	24189751	24189780	24189806	24190033
24119384	24124811	24189752	24189782	24189808	24190034
24119491	24124814	24189753	24189787	24189809	24190038
24124637	24124816	24189754	24189789	24189812	24190062
24124638	24124823	24189755	24189790	24189813	24190064
24124641	24189733	24189756	24189793	24189817	
24124650	24189735	24189762	24189794	24190008	

Tabla 4-36. Listado de puentes vehiculares en estado de servicio regular

22142939	22157516	24119306	24124607	24189739	24189788
22143158	22157522	24119308	24124613	24189742	24189796
22143206	22158006	24119321	24124615	24189743	24189802
22143992	22158018	24119330	24124617	24189746	24190004
22144465	22158168	24119334	24124633	24189749	24190005
22144593	22158215	24119344	24124640	24189757	24190006
22146834	22158252	24119346	24124659	24189758	24190007
22149629	22158273	24119347	24124694	24189761	24190009
22149954	22158274	24119358	24124719	24189763	24190016
22150770	22158290	24119359	24124730	24189764	24190020
22151102	22158337	24119362	24124742	24189765	24190031
22151656	24119270	24119364	24124748	24189768	24190035
22151916	24119271	24119371	24124764	24189772	24190036
22152105	24119275	24119375	24124771	24189773	24190037
22153219	24119276	24119376	24124774	24189774	24190063
22154008	24119277	24119377	24124775	24189775	
22154170	24119286	24119379	24124778	24189777	
22154319	24119290	24119495	24189732	24189781	
22157283	24119291	24119496	24189734	24189784	
22157494	24119296	24124603	24189737	24189785	

De acuerdo con la evaluación a partir de la inspección básica, los 17 puentes peatonales listados en la Tabla 4-37 presentan un estado estructura malo, y los 60 puentes peatonales listados en la Tabla 4-38 presentan un estado estructural regular.

Tabla 4-37. Listado de puentes peatonales en estado estructural malo

22147170	24119263	24119447	24119477	24124588	24124657
22154800	24119389	24119457	24124575	24124589	24124798
22155232	24119440	24119465	24124577	24124590	

Tabla 4-38. Listado de puentes peatonales en estado estructural regular

22142138	22155129	24119390	24119434	24119478	24124726
22145012	22155288	24119391	24119436	24119487	24124729
22146318	22155587	24119397	24119442	24124567	24124733
22147523	22155592	24119398	24119460	24124568	24124739
22148914	22155621	24119399	24119462	24124582	24124745
22149369	22160009	24119409	24119463	24124656	24124770
22149788	22160021	24119423	24119464	24124662	24124804
22151460	22160037	24119431	24119472	24124666	24124806
22154744	24119252	24119432	24119473	24124672	24124818
22155056	24119256	24119433	24119476	24124698	24124819

De acuerdo con la evaluación a partir de la inspección básica, los 6 puentes peatonales listados en la Tabla 4-39 presentan un estado de servicio malo, y los 6 puentes peatonales listados en la Tabla 4-40 presentan un estado de servicio regular.

Tabla 4-39. Listado de puentes peatonales en estado de servicio malo

22160050	22160051	22160052	24119440	24124575	24124579

Tabla 4-40. Listado de puentes peatonales en estado de servicio regular

22146351	22147311	22160033	24119385	24119503	24124761

Con base en los resultados presentados de la inspección básica, se recomienda realizar inspecciones detalladas con el fin de definir el alcance y cuantificar las intervenciones requeridas para los programas de conservación y mantenimiento de la infraestructura del Distrito, iniciando por los puentes con estado estructural malo (Tabla 4-33 y Tabla 4-37), luego de lo cual se deberá proceder con las reparaciones que recomienden dichos estudios. Luego se recomienda continuar con los puentes con estado estructural regular (Tabla 4-34 y Tabla 4-38). En las actividades de intervención por estado estructural se deberá considerar también las reparaciones o intervenciones requeridas según el estado de servicio.

Una vez sean atendidos todos los puentes en estados estructural malo o regular, se deberá continuar con la atención e intervención para los puentes restantes con estado de servicio malo o regular. Es importante recordar que después de realizar reparaciones estructurales o de servicio a un puente, se debe actualizar la base de datos para así mantener el orden de priorización de estas intervenciones actualizado.

CAPITULO
5

5 VALORACIÓN ECONÓMICA DE PUENTES

5.1 INTRODUCCIÓN Y LIMITACIONES

Uno de los componentes importantes del sistema de información de puentes del Distrito consiste en la valoración económica de los activos principales y la estimación de eventuales costos de reparación en caso de afectación de la infraestructura por eventos naturales o por acciones del hombre. El valor económico real, entendido como el costo aproximado para reconstruir una nueva infraestructura con las mismas características de la existente pero ajustada a la normativa vigente en el momento de reconstrucción, es un parámetro fundamental para evaluar potenciales pérdidas económicas en caso de desastre, priorizar intervenciones para los programas de mantenimiento y rehabilitación, analizar la importancia relativa y resiliencia de los puentes y valorar los programas de modernización y sustitución de infraestructura. Considerando que la valoración económica varía de acuerdo con una serie de efectos externos tales como las condiciones macroeconómicas, la oferta y demanda de servicios de construcción y materiales estructurales, la ubicación, el uso y cargas de diseño, las características geométricas y estructurales y los procedimientos constructivos se hace necesario contar con un modelo de costos que permita considerar las diferentes variables en una estimación confiable de los valores de reposición de la infraestructura. Además, dicho modelo debe ser consistente con una estimación de costos de reparación o reposición de componentes individuales por temas de reparación de daños debidos a eventos sísmicos. En este capítulo se presenta el modelo simplificado para la estimación de los costos de reposición y/o reparación de la infraestructura de puentes vehiculares y peatonales en las condiciones de la ciudad de Bogota en el año 2018.

Se plantea entonces la necesidad de realizar las siguientes evaluaciones específicas:

1. El valor de reposición de los puentes, o valor de construcción de nuevos puentes, el cual se relaciona con las pérdidas económicas que ocurrirían en el caso del colapso total del puente y la necesidad de su reemplazo tras la ocurrencia de un evento sísmico. Esta evaluación se realiza considerando el costo aproximado de reconstrucción de la infraestructura con las mismas características de la existente pero ajustada a la normativa vigente en el momento de reconstrucción y a las condiciones económicas actuales.

2. El valor de la reparación de los componentes bajo la suposición de niveles de daño tras la ocurrencia de un terremoto, los cuales se relacionan con las pérdidas económicas producidas por eventos que generan daños intermedios y menores y que deben ser reparados para recuperar la funcionalidad de la red vial. Esta evaluación se realiza considerando diferentes estados de daño hipotéticos en elementos o componentes estructurales importantes del puente y representa el costo medio que pudiera implicar la contratación de dichas actividades a firmas contratistas locales en las condiciones actuales del año 2018.

Como requerimientos específicos en esta evaluación se plantean los siguientes objetivos:

a) Elaborar una valoración económica de los activos expuestos, obtener la valoración de costos de obra nueva por metro cuadrado para cada uno de los puentes, a fin de ser utilizada en la valoración económica de reposición. Para esto se consideran el número de luces para cada tipología, involucrando como mínimo los capítulos de superestructura, subestructura y cimentación, así como la elaboración de los análisis de precios unitarios detallados de todas las actividades incluidas en los presupuestos.

b) Determinar las funciones de costos de reparación de las diferentes tipologías en función de los niveles de daño.

c) Generación de un conjunto de índices de cantidades y costos de componentes y de la estructura en general que sirvan de base para caracterizar las cantidades de obra para cada tipología.

d) Elaborar un programa que permita el evalúo de los puentes de acuerdo con las características geométricas, ubicación y tipología de cada estructura.

La metodología propuesta se basa en la estimación de las cantidades de materiales utilizados en la estructura (superestructura, subestructura y cimentación), el análisis de los costos directos de la construcción de la estructura y la estimación gruesa de los demás capítulos que hacen parte de los presupuestos típicos de un puente. Adicionalmente se cuantifican las variaciones que puede presentar el valor presupuestado de acuerdo con los datos encontrados en presupuestos recopilados de la construcción de puentes en Bogotá D.C. La metodología es validada mediante la comparación entre el valor estimado por el modelo propuesto y el valor real de construcción de puentes recientes según la información disponible en los documentos de los contratos.

Este análisis tiene como base la estimación de cantidades índice de materiales requeridos para la construcción del puente a partir de características como la luz, el área en planta, el gálibo, la tipología estructural y la ubicación del puente. La generación de estos índices se realiza mediante un análisis estadístico de planos y presupuestos de una muestra de los puentes típicos de Bogotá D.C y se utiliza información adicional obtenida de la literatura. Se elabora una hoja de cálculo de estimación de costos de reposición que permite evaluar el costo del portafolio de puentes expuestos para el posterior análisis del riesgo. Adicionalmente, el software desarrollado permite tener un valor de referencia del costo probable de construcción de un puente y con esto un orden de magnitud para verificar y comparar los presupuestos realizados por el IDU durante la contratación de futuros proyectos de construcción de este tipo de

infraestructura. Esta hoja de cálculo puede ser actualizada incrementalmente a medida que se incluyan datos base de nuevos puentes de la ciudad.

Para llevar a cabo la estimación de costos de reparación para diferentes estados de daño en elementos y componentes críticos de los puentes, se han revisado en la literatura los componentes que típicamente presentan daños por la demanda sísmica sobre la estructura, las actividades que se utilizan para reparar estos daños y la estimación de los costos para cada actividad de reparación. Adicionalmente, para utilizar los valores locales de reparación, la información ha sido sometida a un proceso de ajuste acorde a los costos encontrados en actividades equivalentes en los contratos de construcción, reforzamiento y/o mantenimiento efectuados por el IDU.

Las limitaciones del modelo propuesto de costos de reposición y costos de reparación y su aplicabilidad son las siguientes:

a) El valor de reposición y reparación son estimados con valores de referencia y se representan mediante un rango de costo probable; no se puede definir un valor determinista del costo de reposición/reparación de puentes debido a las variaciones inherentes proyecto a proyecto que pueden existir.

b) Los costos de reposición estimados incluyen todos los costos que usualmente se considerarían en un nuevo proyecto de construcción de puentes incluyendo el AIU, pero sin incluir temas como valor de la tierra, temas jurídicos o de licencias, obras anexas importantes como accesos, estabilizaciones, canalizaciones o cualquier otra obra o consideración particular.

c) Los costos de reposición estimados no incluyen costos de reparación o reconstrucción parcial para condiciones diferentes a las del puente original afectado por eventos sísmicos.

d) Los valores unitarios estimados, y por lo tanto los totales resultantes, tienen un alto nivel de incertidumbre y su uso para aplicaciones diferentes a la aquí establecida debe evaluarse por parte de especialistas.

e) La valoración económica que se presenta en este estudio está orientada a establecer el valor de reposición de los puentes para su uso en la generación de funciones de vulnerabilidad y posterior análisis del riesgo. Para otros usos, este valor puede servir como una referencia y no consiste ni pretende ser un valor fijo de contratación de proyectos de construcción y/o reparación de puentes.

f) Los valores índices a partir de los cuales se calculan las cantidades de obra son una buena aproximación y estimación de los materiales de la estructura, sin embargo, no pueden ser tratados como valores límite (mínimos o máximos) para la contratación de diseños de nuevos puentes y/o como índices de revisión de vulnerabilidad de puentes mediante comparación directa.

g) El tamaño de la muestra final de puentes levantados para cada tipología y/o componente utilizados en la estimación de cantidades está restringido al nivel de completitud de la información disponible en los planos recopilados.

h) Las decisiones técnicas según la práctica ingenieril de cada compañía de diseñadores de infraestructura de puentes, el nivel de diseño sísmico seleccionado según el código de diseño, la incidencia del efecto de los depósitos de suelos y demás variables consideradas en el diseño hacen que la cuantificación de cantidades estructurales sea representativa y deban aceptarse unos niveles importantes de incertidumbre.

i) Debido a que los estados de daño posibles en un componente son cualitativos, tal como se propone en la literatura internacional, los valores de reparación obtenidos del análisis de estados de daño de componentes es un valor aproximado de referencia.

j) Los valores de reparación por componentes pueden contener incertidumbres considerables debidos a las propiedades geométricas, detallamiento de refuerzo, nivel de ductilidad de conexiones, entre otros, en componentes que pertenecen a una misma tipología.

k) Se asume que es posible la reparación de puentes para casos de colapsos parciales de luces.

l) Los valores cuantificados de reparación en componentes o grupos de componentes estiman los posibles daños en elementos dentro del mismo grupo o adyacentes a los componentes deteriorados por el efecto sísmico; sin embargo, estos daños anexos no ocurren siempre y se convierte en parte de las limitaciones de este estudio.

5.2 RECOPILACIÓN Y REVISIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE

Con el fin de contar con información reciente, confiable y ajustada a la realidad local se realizó la recopilación de contratos de construcción, diseño, reforzamiento, reparación y mantenimiento de puentes en Bogotá y los planos estructurales de proyectos de construcción y reforzamiento disponibles en el Archivo Central del IDU, Centro Documental del IDU, Archivo Nacional y Archivo Distrital. En la Tabla 5-1 se incluye el resumen de la información recopilada requerida para la elaboración de los modelos de valoración económica. La identificación del tipo de contrato se realizó con base en el objeto definido para el contrato en las bases de datos suministradas por la entidad. La estimación de los indicadores y especificaciones técnicas por tipología constructiva se basó en un análisis estadístico de los planos de construcción y reforzamiento, identificados en el numeral 4.4 del presente documento.

En la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 presenta de manera detallada el contenido de cada una de las carpetas de referencia CC y CRM, respectivamente.

Tabla 5-1. Resumen de información recopilada requerida para la elaboración de los modelos de valoración económica

Ref.	Tipo de información	Descripción de la información	Autor/Entregó	Fecha
CC	Contratos de diseño y construcción	Esta carpeta incluye información administrativa de 72 proyectos de diseño y construcción.	IDU	Desde 1996 hasta 2017
CRM	Contratos de reforzamiento, reparación y mantenimiento	Esta carpeta incluye información administrativa de 38 proyectos de reforzamiento y/o mantenimiento.	IDU	Desde 1999 hasta 2017
PP	Planos de puentes IDU - Construcción	Se trata de los planos recopilados en el presente proyecto y descrito en el numeral 4.4.	IDU	Desde - hasta 2017
PC	Planos de Cartillas	Se trabajó con 5 cartillas de planos tipos para la revisión de cantidades típicas	Varios	Desde 1976 hasta 1985
CD1	Memorando DTM_20183660263973	Contenidos del memorando en cuestión. En resumen, contiene presupuestos de contratos de mantenimiento, informes de inspección y formatos de calificación	IDU	30/10/2018
CD2	Memorando DTE_20182151060431	Contenidos del memorando en cuestión. En resumen, contiene presupuestos de contratos de mantenimiento, informes de inspección y formatos de calificación	IDU	02/11/2018
CD3	Memorando DTE_20182151080951	Contiene de forma resumida, las dimensiones geométricas de los puentes construidos en 5 contratos.	IDU	09/11/2017

Tabla 5-2. Información contenida en la carpeta contratos de diseño y construcción

Archivo	Formato	Fecha	Contrato	Liquidación	Acta de Term.	Informe
22147001 IDU-180-2003	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:04	x	x	✓	x
22147049 IDU-180-2003	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:04	x	x	✓	x
22147050 IDU-180-2003	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:04	x	x	✓	x
22149629-IDU-298-1999	pdf	15-mar.-2018 14:56:38	x	x	x	✓
22151521-IDU-194-1996	pdf	14-abr.-2018 15:13:37	x	✓	✓	x
22153417-IDU-2-2001	pdf	06-abr.-2018 13:34:55	x	x	✓	x

Tabla 5-2. Información contenida en la carpeta contratos de diseño y construcción

Archivo	Formato	Fecha	Contrato	Liquidación	Acta de Term.	Informe
22153512 IDU-180-2003	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:04	x	x	✓	x
22154371 IDU-198-2002	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:06	x	x	x	✓
22156425 IDU-1879-2014	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:07	x	x	x	✓
24119271-IDU-25-2006	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:08	x	x	x	✓
24119280-IDU-25-2006	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:09	x	x	x	✓
24119436 IDU-17-2003	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:09	x	x	x	✓
IDU-016-2003	pdf	02-may.-2018 13:19:36	x	x	✓	x
IDU-017-2003	pdf	15-may.-2018 13:55:55	x	x	✓	x
IDU-019-2009	pdf	15-may.-2018 12:50:59	x	x	✓	x
IDU-04-2011	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:09	x	x	x	✓
IDU-062-2009	pdf	02-may.-2018 13:22:52	x	✓	✓	x
IDU-063-2009	pdf	02-may.-2018 13:31:06	x	x	✓	x
IDU-1-2005	pdf	06-abr.-2018 13:44:35	✓	✓	✓	x
IDU-110-2009	pdf	15-may.-2018 13:54:48	x	x	✓	x
IDU-111-2005	pdf	06-abr.-2018 14:21:10	✓	✓	x	x
IDU-116-2005	tif	28-mar.-2018 18:42:40	x	x	✓	x
IDU-12-2001	pdf	06-abr.-2018 14:09:19	x	x	x	✓
IDU-12-2002	pdf	06-abr.-2018 14:20:24	x	✓	✓	x
IDU-120-2000	pdf	02-may.-2018 14:00:18	✓	x	✓	x
IDU-121-2000	pdf	02-may.-2018 13:49:54	x	✓	✓	x
IDU-124-2000	pdf	06-abr.-2018 13:49:38	x	x	x	✓
IDU-125-2004	tif	28-mar.-2018 18:42:40	x	x	✓	x
IDU-134-2007	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:10	x	x	x	✓

Tabla 5-2. Información contenida en la carpeta contratos de diseño y construcción

Archivo	Formato	Fecha	Contrato	Liquidación	Acta de Term.	Informe
IDU-135-2000	pdf	14-abr.-2018 15:14:37	x	✓	x	x
IDU-136-2007	tif	28-mar.-2018 18:42:40	x	x	✓	x
IDU-147-2004	pdf	05-abr.-2018 14:33:55	x	✓	x	✓
IDU-1553-2017	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:10	✓	x	x	✓
IDU-170-2000	pdf	14-abr.-2018 15:14:25	x	x	✓	x
IDU-180-2003	tif	28-mar.-2018 18:42:40	x	x	✓	x
IDU-1838-2015	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:11	✓	x	x	✓
IDU-194-2001	pdf	02-may.-2018 13:01:34	x	✓	✓	x
IDU-220-2002	pdf	16-abr.-2018 17:19:52	x	x	x	✓
IDU-241-1999	pdf	14-abr.-2018 15:13:10	x	✓	x	✓
IDU-254-2000	pdf	14-abr.-2018 15:13:49	x	✓	x	✓
IDU-258-2000	pdf	02-may.-2018 13:53:30	x	✓	x	x
IDU-27-1999	pdf	16-abr.-2018 16:54:08	x	✓	✓	x
IDU-287-1999	pdf	14-abr.-2018 15:12:42	✓	✓	✓	x
IDU-289-2000	pdf	14-abr.-2018 15:14:20	x	✓	✓	✓
IDU-298-1999	pdf	02-may.-2018 13:49:44	x	x	x	✓
IDU-368-2001	pdf	02-may.-2018 13:03:38	x	✓	✓	✓
IDU-37-2007	pdf	16-abr.-2018 17:21:47	x	✓	x	✓
IDU-37-2009	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:12	x	x	x	✓
IDU-38-2002	pdf	04-abr.-2018 18:21:33	✓	✓	✓	x
IDU-396-2001	pdf	06-abr.-2018 14:20:24	x	✓	✓	✓
IDU-413-2002	pdf	02-may.-2018 13:15:42	x	✓	✓	x
IDU-438-2002	pdf	02-may.-2018 13:31:48	x	✓	✓	x

Tabla 5-2. Información contenida en la carpeta contratos de diseño y construcción

Archivo	Formato	Fecha	Contrato	Liquidación	Acta de Term.	Informe
IDU-441-2001	pdf	02-may.-2018 13:24:18	x	✓	✓	x
IDU-48-2004	pdf	05-abr.-2018 17:39:10	x	✓	✓	x
IDU-514-1999	pdf	14-abr.-2018 15:12:59	x	✓	✓	x
IDU-56-2010	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:12	✓	x	x	✓
IDU-585-2000	pdf	02-may.-2018 13:50:40	x	x	✓	✓
IDU-60-2010	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:13	✓	✓	x	✓
IDU-601-2000	pdf	02-may.-2018 13:56:32	x	✓	✓	✓
IDU-603-2000	pdf	02-may.-2018 13:16:34	x	✓	✓	x
IDU-62-2009	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:13	x	x	x	✓
IDU-63-2009	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:13	x	x	x	✓
IDU-65-2009	tif	28-mar.-2018 18:42:40	x	✓	x	x
IDU-682-2000	pdf	02-may.-2018 13:13:18	x	✓	✓	x
IDU-683-2000	pdf	04-abr.-2018 17:24:47	✓	✓	✓	x
IDU-71-2009	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:13	x	x	x	✓
IDU-71-2009	tif	28-mar.-2018 18:42:40	x	x	✓	x
IDU-778-2000	pdf	02-may.-2018 13:49:12	x	✓	x	x
IDU-79-2009	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:13	x	✓	x	✓
IDU-895-2013	tif	28-mar.-2018 18:42:39	✓	x	x	✓
IDU-945-2013	Carpeta/pdf	04-sept.-2018 17:21:13	x	x	x	✓

Tabla 5-3. Información contenida en carpeta contratos de reforzamiento, reparación y mantenimiento

Archivo	Formato	Fecha	Contrato	Liquidación	Acta de Term.	Informe
IDU-001-2007	pdf	02-jul.-2018 18:01:08	x	x	x	✓
IDU-037-2007	pdf	16-abr.-2018 17:21:47	x	x	✓	x
IDU-039-2000	pdf	04-jun.-2018 15:25:00	✓	x	✓	x
IDU-1009-2005(2)	pdf	03-jul.-2018 09:14:58	x	x	✓	x
IDU-1009-2005	pdf	03-jul.-2018 09:09:56	✓	✓	x	✓
IDU-101-2007	pdf	03-jul.-2018 09:37:32	✓	x	✓	x
IDU-109-2006	pdf	04-jun.-2018 15:38:00	✓	✓	✓	x
IDU-126-2005	pdf	04-jun.-2018 15:39:00	x	✓	✓	x
IDU-143-2001	pdf	03-jul.-2018 09:24:51	✓	x	✓	x
IDU-233-1999(2)	pdf	03-jul.-2018 09:45:37	✓	x	✓	✓
IDU-233-1999	pdf	04-jun.-2018 15:41:00	x	x	✓	x
IDU-238-1999	pdf	04-jun.-2018 15:41:00	✓	x	✓	✓
IDU-246-2000	pdf	03-jul.-2018 09:56:59	✓	✓	✓	✓
IDU-279-2002	pdf	07-jun.-2018 17:47:56	✓	x	x	x
IDU-298-2003	pdf	23-jul.-2018 17:10:08	✓	✓	✓	✓
IDU-307-2003	pdf	20-jul.-2018 13:58:11	✓	✓	✓	✓
IDU-318-2003(2)	pdf	23-jul.-2018 17:10:20	✓	✓	✓	x
IDU-318-2003	pdf	07-jun.-2018 17:47:35	x	x	✓	✓
IDU-342_2001	pdf	23-jul.-2018 17:10:47	✓	✓	✓	✓
IDU-358-2000	pdf	04-jun.-2018 15:41:00	✓	✓	✓	✓
IDU-463-2002	pdf	07-jun.-2018 17:48:03	✓	✓	✓	x
IDU-48-2004(2)	pdf	02-jul.-2018 18:34:17	✓	✓	✓	✓
IDU-515-2002	pdf	04-jun.-2018 15:43:00	✓	✓	✓	✓
IDU-531-2002	pdf	23-jul.-2018 17:14:33	✓	✓	✓	✓
IDU-532-2001	pdf	28-may.-2018 14:15:23	✓	x	✓	x
IDU-537-2002	pdf	28-may.-2018 14:14:56	✓	x	✓	x
IDU-597-2000	pdf	07-jun.-2018 17:48:31	✓	x	✓	x
IDU-6-2000	pdf	02-jul.-2018 18:00:20	✓	x	✓	x
IDU-65-2011	pdf	02-jul.-2018 18:34:04	✓	✓	✓	x
IDU-654-2000	pdf	04-jun.-2018 15:43:00	✓	✓	x	✓
IDU-666-2000	pdf	07-jun.-2018 17:48:42	✓	x	x	✓
IDU-70-2006	pdf	03-jul.-2018 08:58:57	✓	x	✓	✓
IDU-73-2005	pdf	02-jul.-2018 18:20:54	x	✓	✓	✓
IDU-765-2000	pdf	07-jun.-2018 17:48:53	✓	x	x	✓
IDU-77-2008	pdf	02-jul.-2018 17:53:57	✓	✓	✓	✓
IDU-796-2000	pdf	04-jun.-2018 15:43:00	✓	✓	✓	✓
IDU-91-2004	pdf	03-jul.-2018 09:31:04	✓	✓	✓	x
IDU-909-2017	Varios	02-nov.-2018	x	x	x	✓
IDU-1255-2017	Varios	02-nov.-2018	x	x	x	✓

Tabla 5-3. Información contenida en carpeta contratos de reforzamiento, reparación y mantenimiento

Archivo	Formato	Fecha	Contrato	Liquidación	Acta de Term.	Informe
IDU-1491-2017	Varios	02-nov.-2018	x	x	x	✓
IDU-1504-2017	Varios	02-nov.-2018	x	x	x	✓

5.3 MODELO DE VALORACIÓN ECONÓMICA DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES

5.3.1 Revisión bibliográfica

De acuerdo con referencias internacionales de evaluación del riesgo en infraestructura de puentes la valoración económica comúnmente se hace mediante la estimación de un costo índice de precio por metro cuadrado en planta específico para cada tipología. Una de las metodologías más robustas para estas valoraciones es la desarrollada por el Departamento de Transporte de California (CALTRANS, por sus cifras en inglés). CALTRANS presenta para cada año finalizado los costos típicos de estructura y costo total del puente normalizados por el área total construida en planta (ver Figura 5-1). Adicionalmente, dicha entidad genera anualmente los estadísticos de costos de construcción de puentes según su tipología a partir de los proyectos desarrollados durante el año de análisis y estima a partir de estadísticos históricos los costos de construcción para el año siguiente. Los costos proyectados para el año siguiente consideran las condiciones de construcción más favorables y más críticas, proponiendo así rangos posibles de valores. La comparación entre el intervalo propuesto para el año 2017 y los valores de precio por metro cuadrado del año 2016 se pueden ver en la Figura 5-2. Como se observa en esta figura, aunque los datos con los cuales esta información es generada son muy completos y reflejan la situación real de los proyectos, la evaluación del costo depende de valores que pueden variar hasta 2.5 veces dentro del rango propuesto y conlleva a una incertidumbre considerable en el precio estimado.

En la revisión de referencias adicionales como Duran (2017) y Villegas (2016) se encuentran los análisis de cantidades típicas de materiales de superestructura de puentes tipo placa-viga y tipo voladizos sucesivos parametrizados con respecto a la luz del puente. A partir de esta estimación de cantidades, los autores presentan una estimación del costo de estructura del puente como una referencia de comparación de resultados obtenidos en la práctica profesional. La Figura 5-3 presenta un ejemplo de la propuesta presentada por Duran (2017) para la obtención de cantidades de concreto (m^3) por cada metro cuadrado en planta del puente según la luz entre apoyos; la metodología sólo incluye puentes tipo viga-placa postensada. Otras referencias como el Bridge Design Aids (Caltrans Metric, 2005) presentan valores típicos de cantidades de construcción de estructura con relación a la luz para diferentes tipologías de puentes. En esta referencia, los valores definidos son propuestos a partir del uso de datos históricos de puentes construidos en autopistas de los Estados Unidos. Estos valores igualmente son usados como referencia aproximada para el cálculo posterior de cantidades y costos de estructura en proyectos de construcción de puentes en los Estados Unidos. Estos, al igual que se propone en este proyecto, son valores comparativos y no son usados de manera definitiva para procesos de licenciamiento ni pretende ser un valor fijo de contratación de proyectos de construcción. La Figura 5-4 presenta un ejemplo de la estimación de cantidades de concreto (m^3) por cada

metro cuadrado en planta del puente según la luz para puentes tipo viga cajón continuo en concreto reforzado utilizando la metodología propuesta por el Bridge Design Aids.

COMPARATIVE BRIDGE COSTS

JANUARY 2017

The following tabular data provides some **general guidelines** for structure type selection and its relative cost. These costs should be used only for **preliminary estimates** until more detailed information is developed. The following factors must be taken into account when determining a price within the cost range:

Factors for Lower End of Cost Range	Factors for Higher End of Cost Range
Short Spans, Low Structure Height, No Environmental Constraints, Large Project, No Aesthetic Issues, Dry Conditions, No Bridge Skew	Long Spans, High Structure Height, Environmental Constraints, Small Project, Aesthetic Issues, Wet Conditions (cofferdams required), Skewed Bridges
Urban Location	Remote Location
Seat Abutment	Cantilever Abutment
Spread Footing	Pile Footing (Large Diameter Piling)
No Stage Construction	2-Stage Construction

Factors that will increase the price from 25% - 150% over the high end of the cost range

Structures with more than 2 construction stages	Unique substructure construction		
Widenings less than 15 Ft.			
STRUCTURAL SECTION	COMMON SPAN RANGE (feet)	* COST RANGE (price/sqft)	REMARKS
RC SLAB	16 - 44	150-420	CAST-IN -PLACE CONCRETE BRIDGES ACCOUNT FOR APPROXIMATELY 65% OF BRIDGES BUILT ON CALIFORNIA STATE HIGHWAYS
RC T-BEAM GIRDER	40 - 60	140-280	
RC BOX GIRDER	50 - 120	135-250	
CIP/PS SLAB	40 - 65	130-250	
CIP/PS BOX GIRDER	100 - 250	120-350	
PC/PS SLAB	20 - 50	200-500	NO FALSE WORK REQUIRED
PC/PS T GIRDER	30 - 120	No Current Cost Data	
BULB TEE GIRDER	90 - 145	125-300	
WIDE FLANGE GIRDER	90 - 180	200-300	
PC/PS I GIRDER	50 - 120	160-440	
ADJACENT PC/PS GIRDER	50 - 110	No Current Cost Data	
PC/PS BOX GIRDER	120 - 200	125 - 280	
STRUCTURAL STEEL I GIRDER	60 - 300	250 - 500	

Figura 5-1. Rango de precios de construcción de tipologías de puentes en California (CALTRANS, 2016)

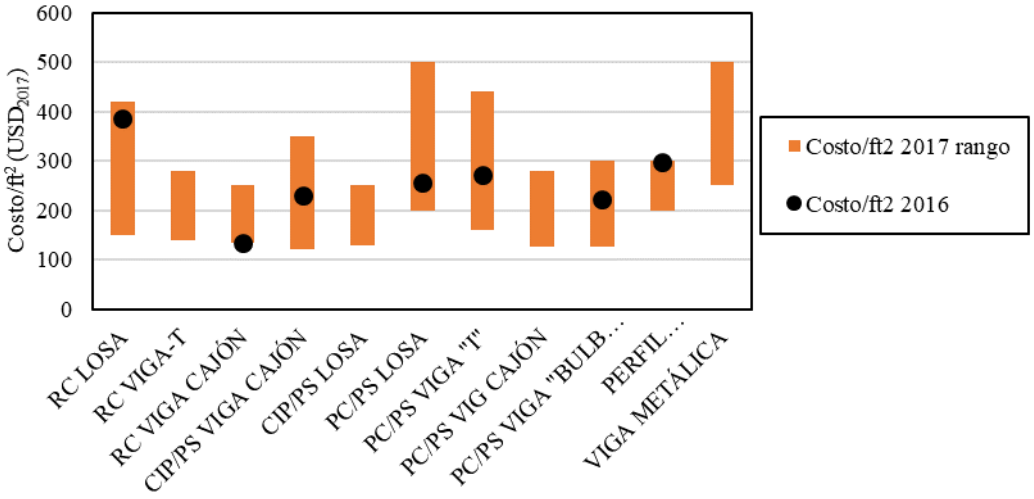


Figura 5-2. Costos año finalizado (2016) y costos año proyectado (2017) de CALTRANS

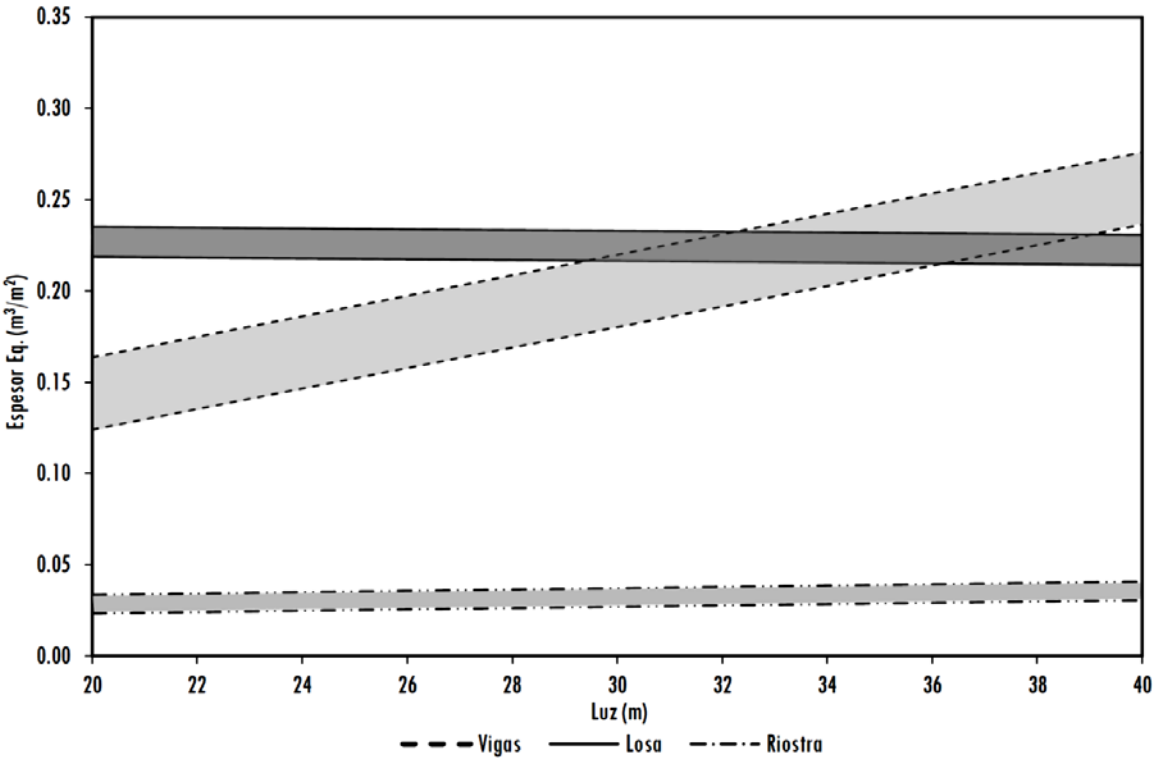


Figura 5-3. Ejemplo de la estimación de los m^3 de concreto por área en planta del puente según la luz en puentes tipo viga-placa postensada. "Figura 20. Ayudas de diseño de espesor equivalente" tomado de Durán (2017)

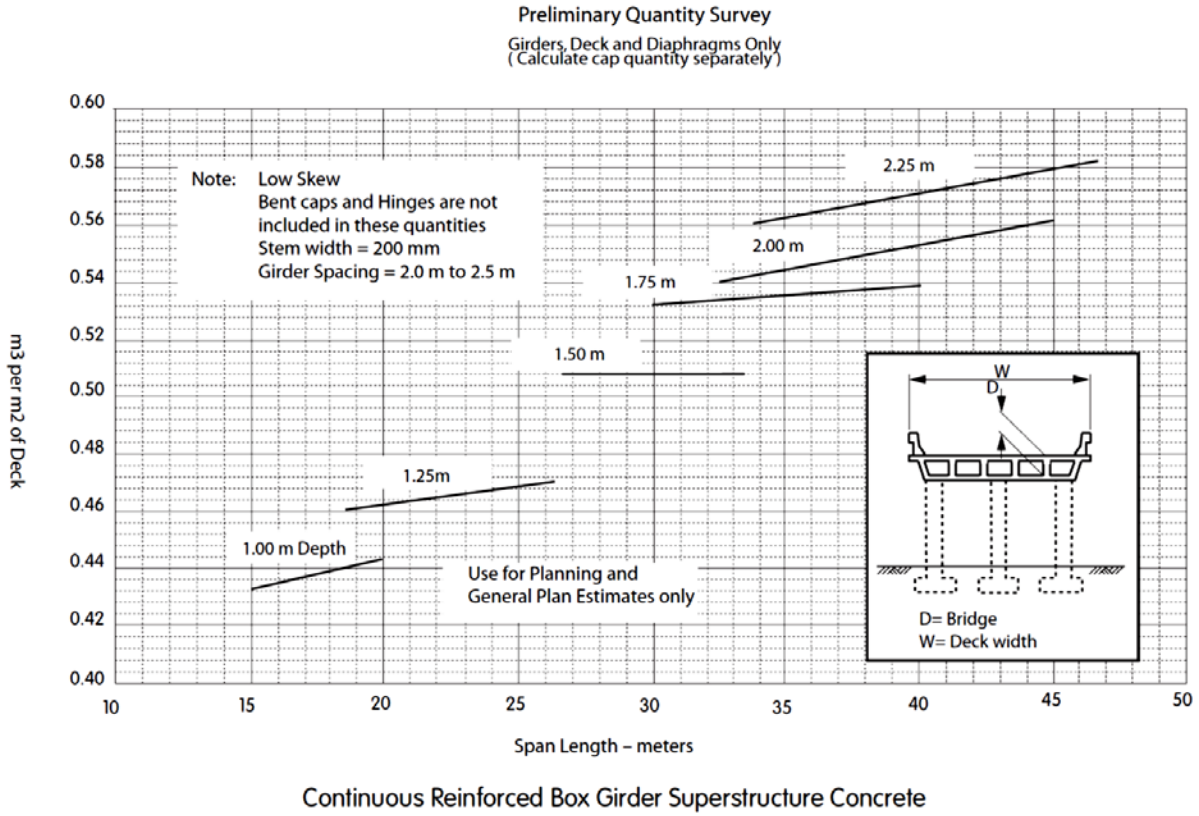


Figura 5-4. Ejemplo de la estimación de los m^3 por área en planta del puente según la luz en puentes tipo viga cajón continuo en concreto reforzado y su variación según el peralte del cajón. Tomado del Bridge Desig Aids (Caltrans Metric, 2005)

5.3.2 Metodología para la valoración económica de puentes

De acuerdo con las necesidades del proyecto, la valoración económica pretende generar un avalúo aproximado de la construcción de un puente nuevo dadas las características geométricas, la ubicación y la tipología constructiva correspondiente. Adicionalmente, la valoración debe incluir los capítulos típicos que hacen parte del costo final de un proyecto de construcción. Dada la generalidad de las variables propuestas, el valor resultante del costo del puente presentará variaciones considerables. De esta manera, la metodología general propuesta se define en los siguientes pasos:

1. Definición de características del puente
    a. Características generales del puente
        i. Coordenadas de latitud y longitud en Bogotá D.C.
        ii. Uso del puente (vehicular o peatonal)
        iii. Nivel de acceso
        iv. Tipo de suelo según Zonas de Amenaza Sísmica del Decreto de Microzonificación
    b. Características geométricas
        i. Longitud total del puente
        ii. Número de luces

iii. Longitud de cada luz del puente
iv. Ancho total del puente
v. Área en planta total
vi. Gálibo del puente

c. Tipología constructiva
i. Tipo de superestructura
ii. Tipo de subestructura
iii. Tipo de cimentación

d. Elementos no estructurales y/o que no hacen parte del puente
i. Número de separadores a utilizar
ii. Número de barandas e iluminación
iii. Espesor de capa de rodadura
iv. Número de rampas de acceso (para puentes vehiculares)
v. Número de escaleras y/o rampas de acceso (para puentes peatonales)
vi. Número total de juntas

2. Cálculo de las cantidades típicas de construcción de la estructura del puente de acuerdo con valores índices establecidos para cada tipología constructiva:
   a. Cálculo de cantidades de concreto, refuerzo pasivo, refuerzo activo y/o acero estructural de la superestructura según la longitud de cada luz.
   b. Cálculo de cantidades de concreto, refuerzo y/o acero estructural de la subestructura según el gálibo, el número de luces y el área en planta total de la estructura del puente.
   c. Cálculo de las cantidades de concreto, refuerzo y/o acero estructural de la cimentación de acuerdo con el número de luces, el área en planta total de la estructura del puente y la ubicación.
   d. Cálculo de cantidades de elementos no estructurales como barandas, separadores y otros, según longitud total del puente.
   e. Cálculo de cantidades de la estructura de las rampas de aproximación del puente usando los parámetros de gálibo del puente, ancho del puente y valores de pendiente típica en rampas de aproximación.
   f. Cálculo de cantidades de elementos globales adicionales como escaleras, rampas, juntas, entro otros.

3. Cálculo del costo de estructura del puente usando los análisis de precios unitarios últimos disponibles en el IDU. Se seleccionaron los precios unitarios que consideraran la mano de obra, procedimiento constructivo requerido, los materiales especificados y el suministro y transporte de los mismos.

4. Inferencia estadística del valor de los demás capítulos, diferentes al estructural, que componen el presupuesto típico de construcción de puentes (diseño, preliminares, pavimentos, redes, espacio público, gestión ambiental-social-tráfico, AIU, entre otros) a partir de índices calculados de proyectos reales de construcción.

5. Estimación del valor medio y la varianza esperada del valor de construcción total del puente.

La metodología general de evaluación económica de puentes se puede observar en la Figura 5-5.

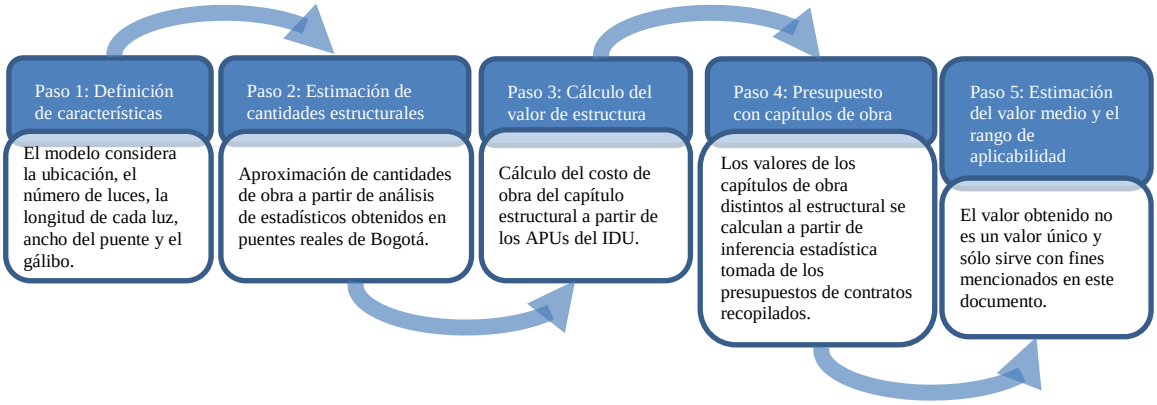


Figura 5-5. Metodología para la evaluación económica de puentes

5.3.3 Estimación de cantidades estructurales para presupuestos

5.3.3.1 Índices de referencia de cantidades

La presente metodología requiere que, dada la geometría, el número de luces, la tipología constructiva y la ubicación del puente se estimen las cantidades de materiales a utilizar en la construcción de la estructura del puente. Para esto, se hace necesario la definición de las cantidades que controlan el precio de la estructura de puentes vehiculares y peatonales y la definición de índices que permitan relacionar estas cantidades con las características del puente, a lo cual se le conoce como "valores índices". Los diferentes índices principalmente dependen del material estructural predominante y de la longitud de cada luz y/o del área en planta del puente.

El cálculo de los índices previamente mencionados se realiza con ayuda de los planos estructurales disponibles. Los puentes analizados deben ser representativos, de manera general, de la distribución estadística de los puentes en Bogotá; sin embargo, la revisión de los planos estructurales depende del nivel de completitud que estos tengan y del número de planos recopilado en el presente proyecto (ver numeral 4.4). La Figura 5-6 presenta los tipos de elementos de superestructura predominantes (según material y tipo de malla vial) en puentes vehiculares y la Figura 5-7 presenta el caso de los puentes peatonales. Se encuentra que los puentes vehiculares de mayor interés (en términos del área construida que representan en la ciudad y en la malla vial arterial) son los puentes de superestructura en concreto, superestructura preesforzada y los puentes tipo box culvert. Por otro lado, en los puentes peatonales no se encuentra una tipología que predomine en términos del área construida.

Debido a que varios de los índices a calcular dependen de la longitud de cada luz del puente, se determina que el análisis debe hacerse en consideración de este parámetro. En total se analizaron los datos de 235 luces (o ejes para el caso de subestructura) de puentes vehiculares y 12 para el caso de puentes peatonales. El total de datos analizados incluye la revisión de cartillas existentes de puentes vehiculares tomados como límite inferior, los datos tomados de investigaciones nacionales (Durán, 2017) y los estadísticos generados a partir de los planos disponibles en la referencia PP. La Tabla 5-4 y la Tabla 5-5 presentan el número total de datos

según la tipología constructiva de superestructura, subestructura y cimentación de los puentes vehiculares y peatonales estudiados, respectivamente.

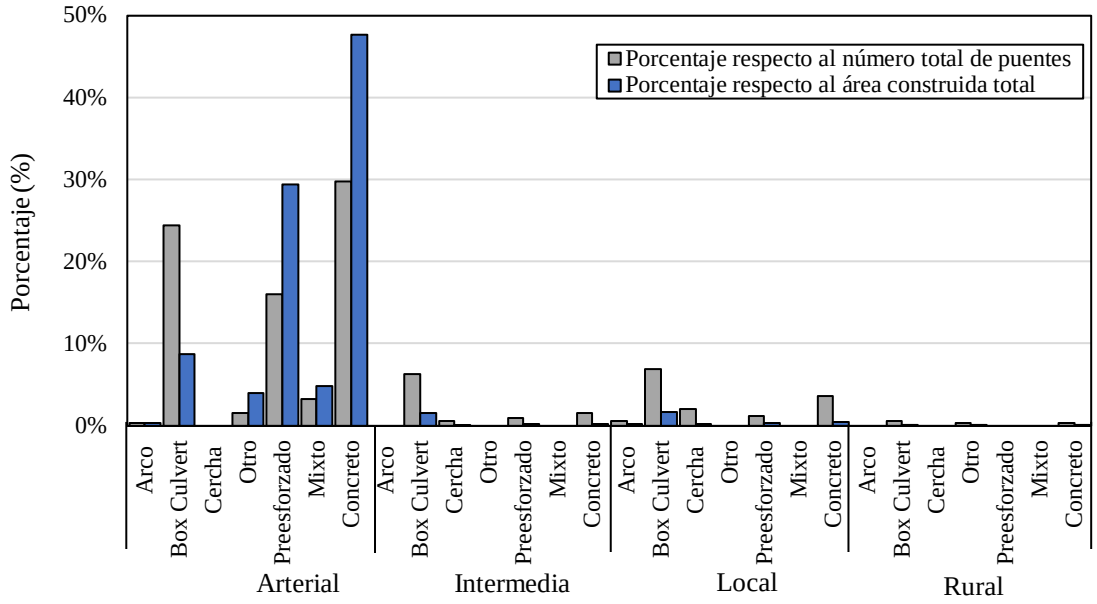


Figura 5-6. Distribución del número y área construida de puentes vehiculares (ambos en porcentaje respecto al total de puentes) según malla vial y tipo de superestructura

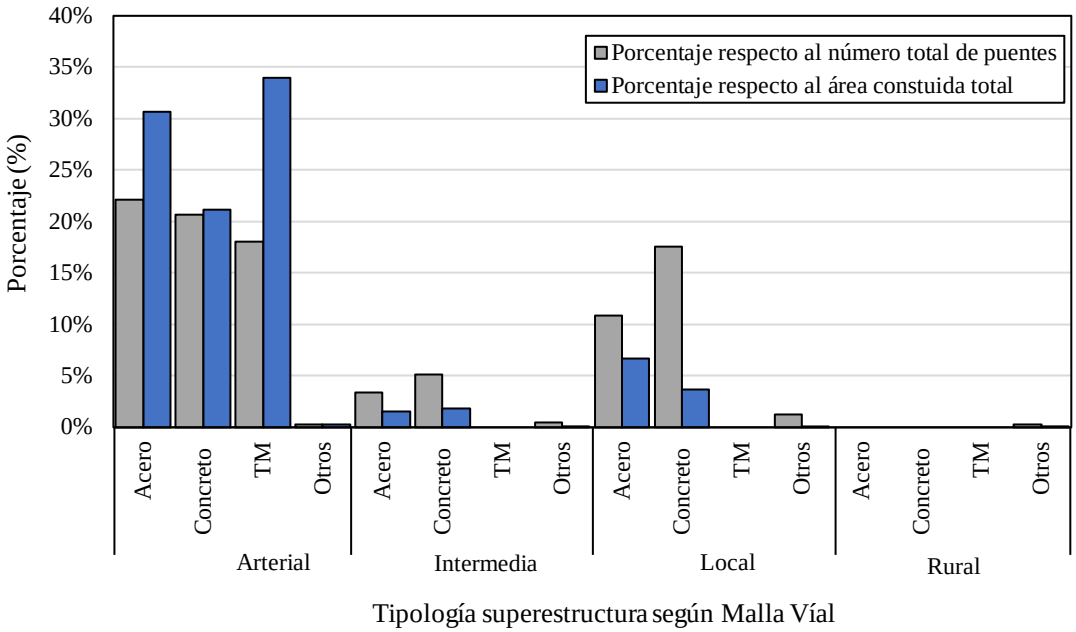


Figura 5-7. Distribución del número y área construida de puentes peatonales (ambos en porcentaje respecto al total de puentes) según malla vial y tipo de superestructura

Es fundamental resaltar que el número de datos recopilados para cada indicador está estrictamente limitado por el nivel de completitud de los planos estructurales disponibles y según el tipo de fuente de información. Por consiguiente, se dan variaciones en la cantidad de datos utilizados para calcular los indicadores de los distintos elementos de los tipos de puentes. Se considera que, para el tipo de análisis objetivo, estos datos son suficientes para el análisis de la valoración económica de puentes para evaluaciones del riesgo sísmico.

Tabla 5-4. Número de luces o ejes de apoyo de puentes vehiculares analizados

	Ítem	Número de datos
Superestructura	Box Culvert	65
	Viga cajón RC	18
	Viga placa RC	39
	Viga placa postensada	99
	Viga cajón postensada	9
	Vigas metálicas	5
Subestructura	Pantallas	2
	Péndulos	6
	Pórticos	19
Cimentación	Aluvial	4
	Cerros	3
	Deposito ladera	2
	Lacustre	25
	Piedemonte	2

Tabla 5-5. Número de luces o ejes de apoyo de puentes peatonales analizados

Ítem	Número de puentes
Viga cajón concreto reforzado	3
Armaduras / cerchas	3
Transmilenio	6

Los valores índices calculados sobre los puentes analizados se presentan en términos de la luz, el gálibo, el área en planta o el tipo de suelo donde se ubica el puente con el objeto de mejorar la aproximación estadística y/o de lograr una buena correlación con alguna de las características del puente. Cada uno de los planos es utilizado para el conteo de cantidades de los siguientes ítems:

1. Superestructura:
   a) Volumen (en m^3) de concreto en vigas, riostras, tableros y losas por cada luz de manera individual.
   b) Cuantía (en kg) de kilogramos de acero pasivo en vigas, riostras y losas por cada luz de manera individual.
   c) Cuantía (en ton-m) de fuerza hidráulica por longitud de acero activo en vigas y losas por cada luz de manera individual. Este ítem sólo aplica para las tipologías constructivas que utilizan pre-esforzado en alguno de sus componentes.
   d) Cuantía (en kg) de placa colaborante.

   De estas cantidades mencionadas, se calcularon los siguientes indicadores: espesor equivalente de concreto que corresponde al volumen total de concreto por área superficial de la superestructura

[m^3/m^2], cuantía de acero [kg/m^3] y cuantía de fuerza hidráulica por longitud de acero activo [ton-m/m^2].

2. Subestructura:
   a) Volumen (en m^3) de concreto en columnas, estribos, vigas cabezales, pantallas y demás componentes de la superestructura de un puente.
   b) Cuantía (en kg) de kilogramos de acero de refuerzo en columnas, estribos, vigas cabezales, pantallas y demás componentes de la subestructura de un puente.
   c) Área aferente de cada pila como medida de relación de la carga vertical sobre cada elemento que conforma la subestructura.

   Con la información de las cantidades de subestructura, se calcularon los siguientes indicadores: espesor equivalente de concreto [m^3/m^2 aferente] y la cuantía volumétrica de acero de refuerzo [kg/m^3].

3. Cimentación:
   a) Volumen (en m^3) de concreto en dados, zapatas y/o pilotes que hacen parte de la cimentación del puente.
   b) Cuantía (en kg) de acero de refuerzo presentes en las cimentaciones de los puentes.

   Usando las cantidades de los materiales de cimentación, se calcularon los siguientes indicadores: espesor equivalente de concreto [m^3/m^2] y cuantía volumétrica de acero de refuerzo [kg/m^3].

4. Rampas
   a) Volumen (en m^3) de concreto en las diferentes rampas que componen un puente.
   b) Cuantía (en kg) de acero de refuerzo presentes en las rampas de los puentes.

   Con la información de rampas recopilada de los planos estructurales, se calcularon los siguientes índices: espesor equivalente de concreto [m^3/m^2] y kilogramos de acero por área superficial de rampas [kg/m^2]. Para el caso de puentes vehiculares las cantidades de rampas hacen referencia a las rampas de aproximación, por el contrario, para el caso de los puentes peatonales hacen referencia a los accesos tipo rampas y escaleras, incluyendo la estructura que las soporta.

5.3.3.2 Índices de superestructura de acuerdo con la tipología y las características geométricas

Las cantidades de superestructura para los puentes de una luz de las cartillas de modelos de puentes de la Secretaría de Obras Públicas de Antioquia y las cartillas del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (PC) (ver ejemplos en la Figura 5-9 a la Figura 5-11), se pueden entender como los posibles valores de cantidades de puentes antiguos no intervenidos en Bogotá. El análisis de estos se incluye como un límite mínimo o como datos complementarios en las tipologías en las que la información era más limitada y/o en los casos de tipologías simples donde era necesario revisar que existiera consistencia con las referencias nacionales en el diseño y construcción de puentes previos a la definición de códigos de diseño actuales de este tipo de estructuras.

Para la mayoría de las tipologías, la información de referencia PP fue utilizada como base para el análisis de valores índice. Con esta información recopilada se construyeron las “curvas de relación de cantidades

según características geométricas" de los puentes vehiculares y peatonales de Bogotá. Los datos tomados incluyen distintos tipos de puentes diseñados en diferentes épocas. Las tipologías para las cuales se calcularon estas curvas son: puentes tipo losa (L), viga-placa de concreto reforzado (VP-RC), viga-placa con vigas pre-esforzados (VP-PS), viga-cajón de concreto reforzado (VC-RC), viga-cajón de concreto pre-esforzado (VC-PS) y box-culvert (BC). Para el caso de puentes especiales, el cálculo del valor del puente se recomienda hacerlo mediante un cálculo detallado particular para cada puente. En este informe, la valoración de puentes especiales se realiza mediante el cálculo aproximado del valor utilizando un único valor de referencia conservador por metro cuadrado en planta del puente.

La variación que se presenta en los indicadores calculados entre puentes de una misma tipología con condiciones similares es producto de las diferentes normas de diseño utilizadas, la diferencia en la amenaza sísmica y tipo de suelo, la diferencia en el flujo de tráfico esperado y debido a características específicas en la toma de decisiones por parte del diseñador.

A continuación, se presenta de la Figura 5-12 a la Figura 5-21 los estadísticos para superestructura de los puentes vehiculares y peatonales analizados. Para la mayoría de las gráficas se presenta una línea de tendencia que representa la curva de relación de cantidades según características geométricas y o una figura de cajas y bigotes. Esta última es una figura que pretende representar la distribución de los datos de manera simplificada y que es útil para entender el comportamiento de datos que no varían respecto a la luz, por ejemplo, la cantidad de kilogramos (kg) de acero por metro cúbico (m^3) de concreto. La explicación de cómo leer este tipo de figuras se presenta en la Figura 5-8.

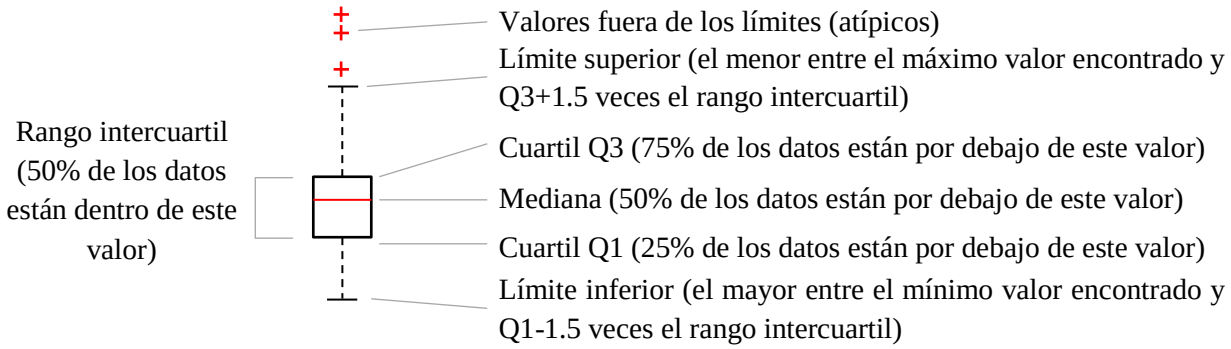
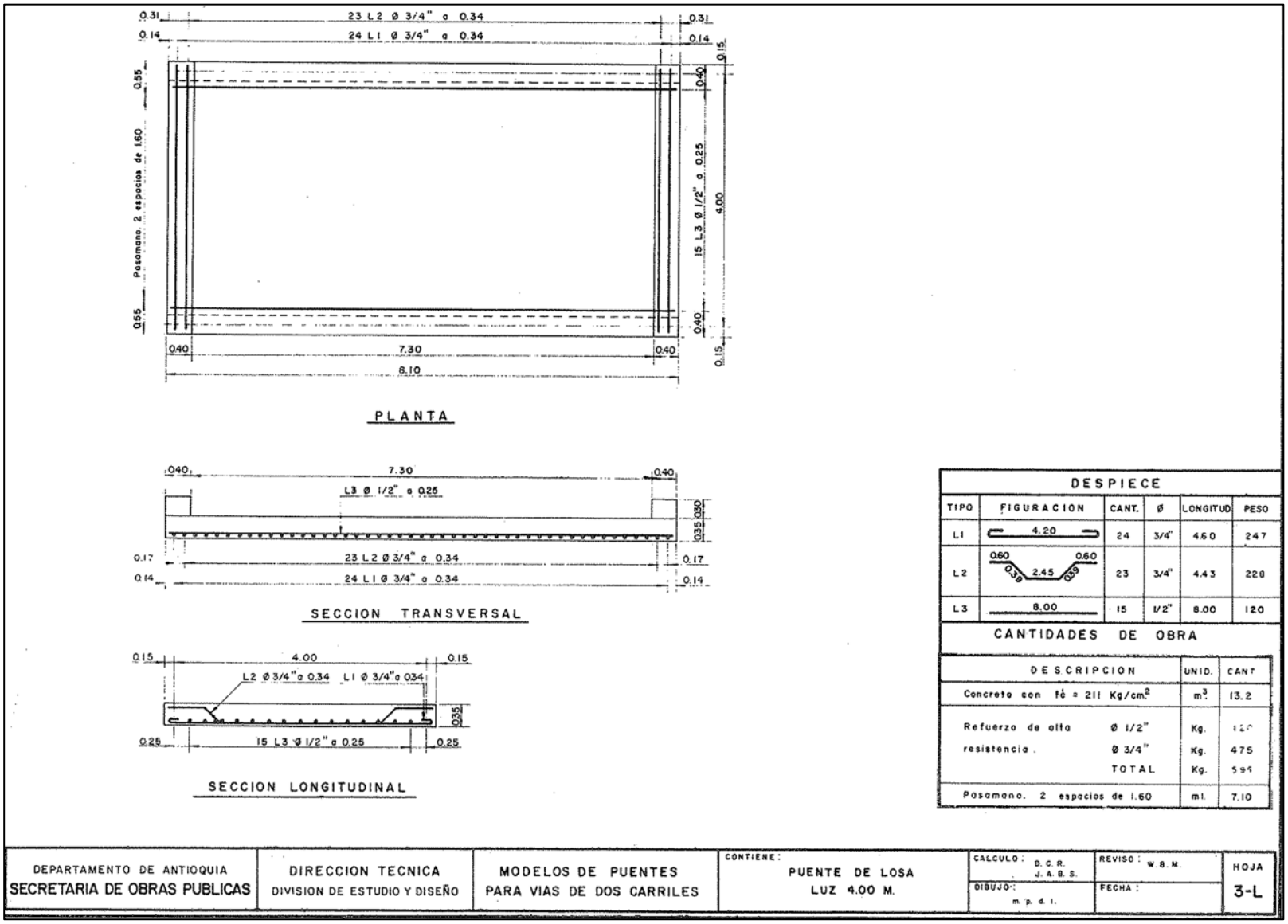


Figura 5-8 Interpretación de diagramas con cajas y bigotes

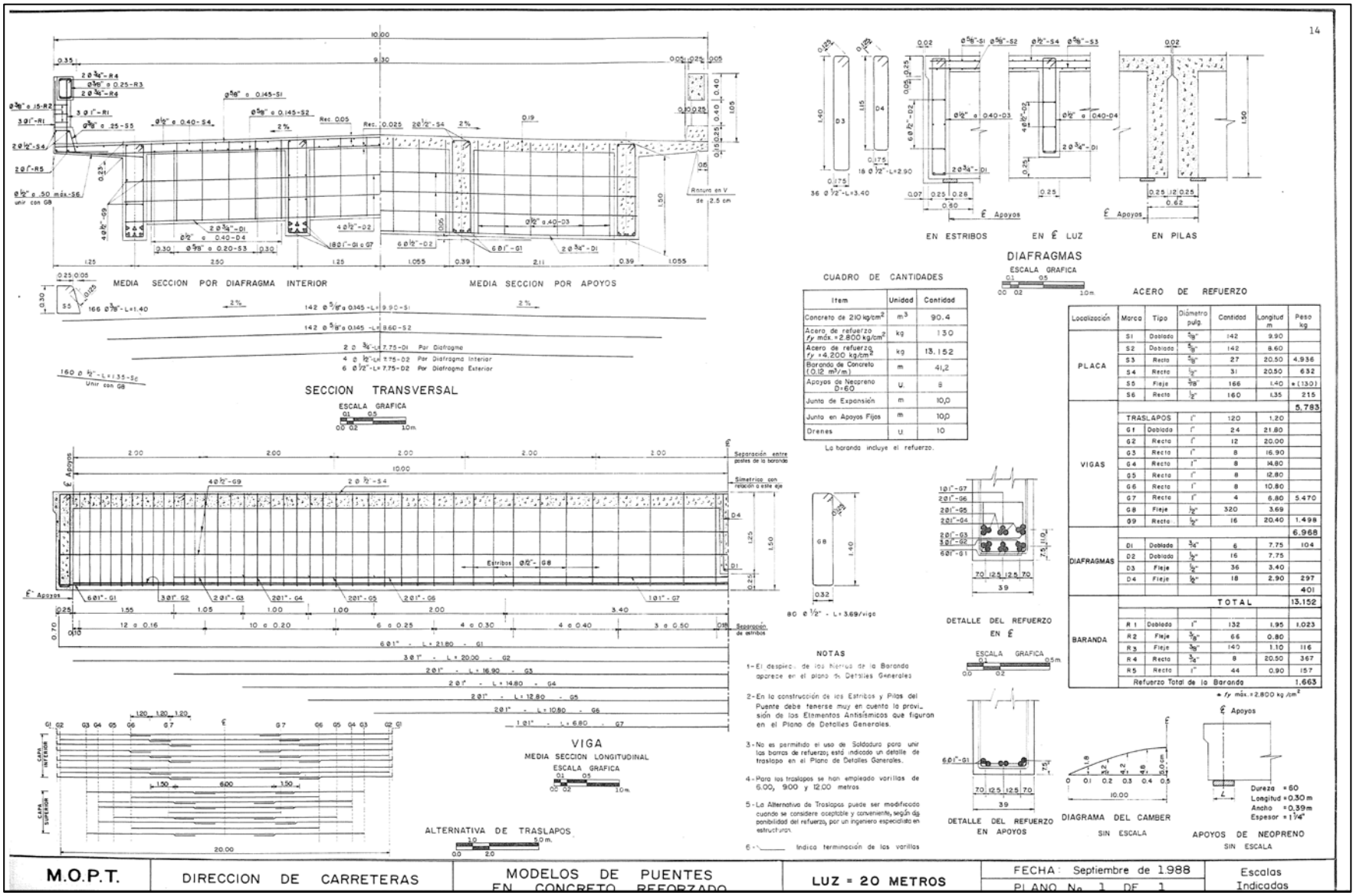
Como se mencionó anteriormente, el número de datos seleccionado para la creación de cada figura depende de la completitud de la información, es decir, el número de puentes con información disponible y precisa, y la importancia o representatividad de cada tipología dentro de Bogotá, según el tipo de malla vial a la que pertenecen principalmente. Adicionalmente, se debe destacar que, dado que las curvas propuestas dependen de la luz del puente, no se define un número mínimo de datos a tomar pues sería muy difícil lograr este valor por cada longitud de luz. Para este caso, se definió que al menos 5 datos fueran tomados para cada ítem. Los valores calculados a partir de las curvas generadas serán presentados de acuerdo a un nivel de confiabilidad que se calcula según el número de datos disponibles.



DESPIECE					
TIPO	FIGURACION	CANT.	Ø	LONGITUD	PESO
L1	4.20	24	3/4"	4.60	247
L2	0.60 / 2.45 / 0.60	23	3/4"	4.43	228
L3	8.00	15	1/2"	8.00	120

CANTIDADES DE OBRA			
DESCRIPCION		UNID.	CANT
Concreto con fć = 211 Kg/cm²		m³	13.2
Refuerzo de alta resistencia.	Ø 1/2"	Kg.	[illegible]
	Ø 3/4"	Kg.	475
	TOTAL	Kg.	595
Pasamano. 2 espacios de 1.60		ml.	7.10

Figura 5-9. Modelo de puente de losa (Departamento de Antioquia, 1972)



Item	Unidad	Cantidad
Concreto de 210 kg/cm²	m³	90.4
Acero de refuerzo fy máx.=2.800 kg/cm²	kg	130
Acero de refuerzo fy =4.200 kg/cm²	kg	13.152
Baranda de Concreto (0.12 m³/m)	m	41,2
Apoyos de Neopreno D=60	U.	8
Junta de Expansión	m	10,0
Junta en Apoyos Fijos	m	10,0
Drenes	U.	10

La baranda incluye el refuerzo.

Localización	Marca	Tipo	Diámetro pulg.	Cantidad	Longitud m	Peso kg
PLACA	S1	Doblada	5/8"	142	9.90	
	S2	Doblada	5/8"	142	8.60	
	S3	Recta	5/8"	27	20.50	4.936
	S4	Recta	1/2"	31	20.50	632
	S5	Fleje	3/8"	166	1.40	* (130)
	S6	Recta	1/2"	160	1.35	215
						5.783
VIGAS	TRASLAPOS		1"	120	1.20	
	G1	Doblada	1"	24	21.80	
	G2	Recta	1"	12	20.00	
	G3	Recta	1"	8	16.90	
	G4	Recta	1"	8	14.80	
	G5	Recta	1"	8	12.80	
	G6	Recta	1"	8	10.80	
	G7	Recta	1"	4	6.80	5.470
	G8	Fleje	1/2"	320	3.69	
	G9	Recta	1/2"	16	20.40	1.498
						6.968
DIAFRAGMAS	D1	Doblado	3/4"	6	7.75	104
	D2	Doblado	1/2"	16	7.75	
	D3	Fleje	1/2"	36	3.40	
	D4	Fleje	1/2"	18	2.90	297
						401
				TOTAL		13.152
BARANDA	R1	Doblado	1"	132	1.95	1.023
	R2	Fleje	3/8"	66	0.80	
	R3	Fleje	3/8"	140	1.10	116
	R4	Recta	3/8"	8	20.50	367
	R5	Recta	1"	44	0.90	157
	Refuerzo Total de la Baranda					1.663

* fy máx.=2.800 kg/cm²

NOTAS

1- El despiec. de los hierros de la Baranda aparece en el plano de Detalles Generales

2- En la construcción de los Estribos y Pilas del Puente debe tenerse muy en cuenta la provisión de los Elementos Antisísmicos que figuran en el Plano de Detalles Generales.

3- No es permitido el uso de Soldadura para unir las barras de refuerzo; está indicado un detalle de traslapo en el Plano de Detalles Generales.

4- Para los traslapos se han empleado varillas de 6.00, 9.00 y 12.00 metros

5- La Alternativa de Traslapos puede ser modificada cuando se considere aceptable y conveniente, según disponibilidad del refuerzo, por un ingeniero especialista en estructuras

6- Indica terminación de las varillas

Figura 5-10. Modelo de puente de viga losa postensado (Departamento de Antioquia, 1972)

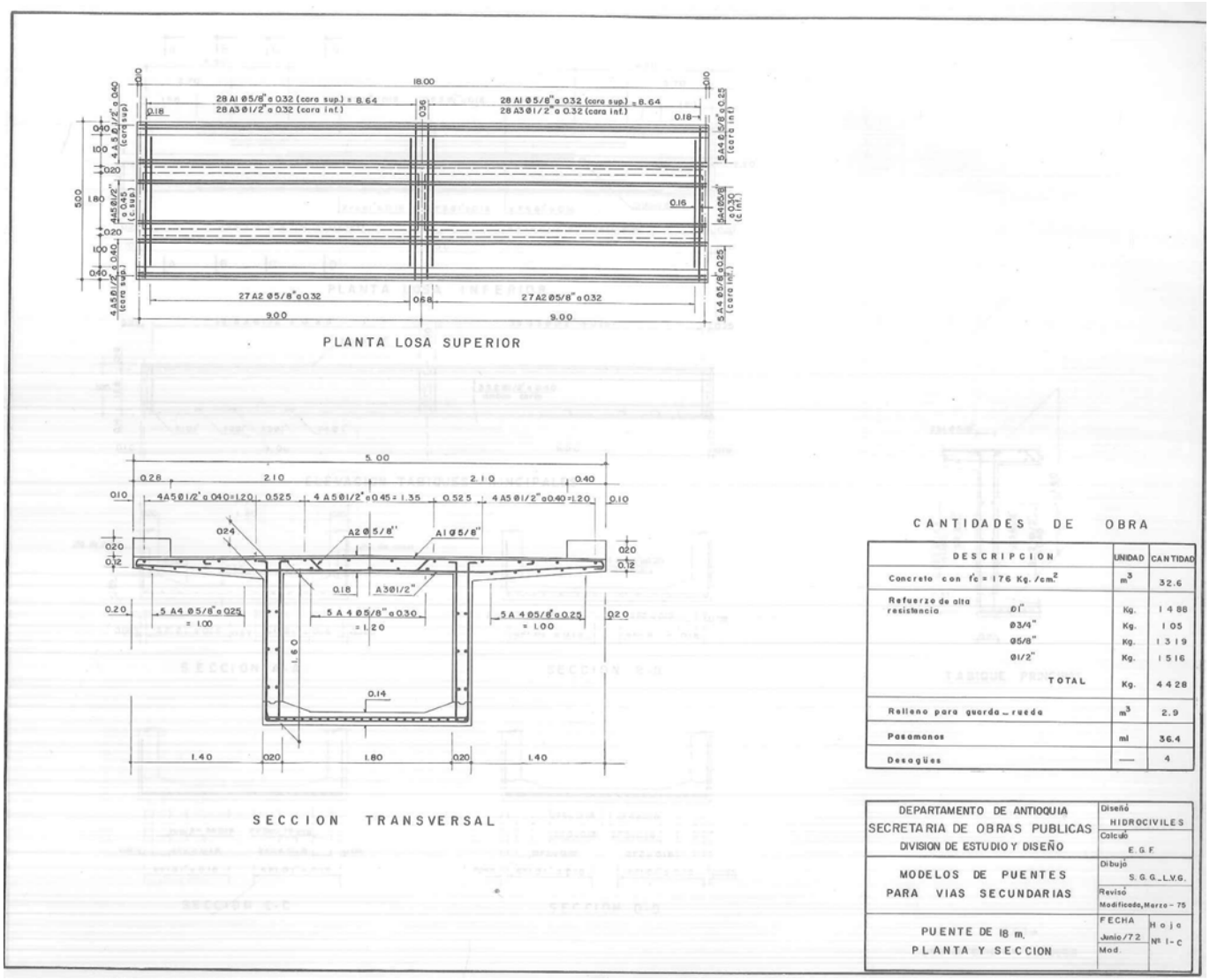
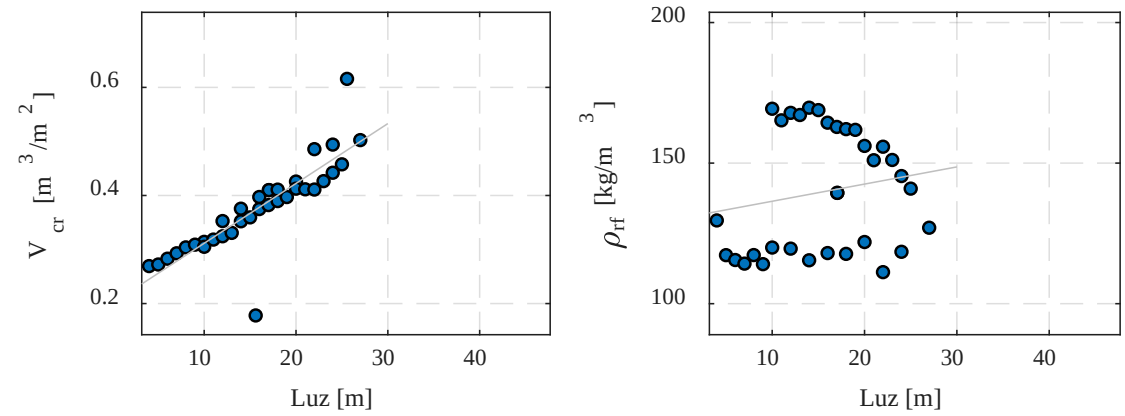
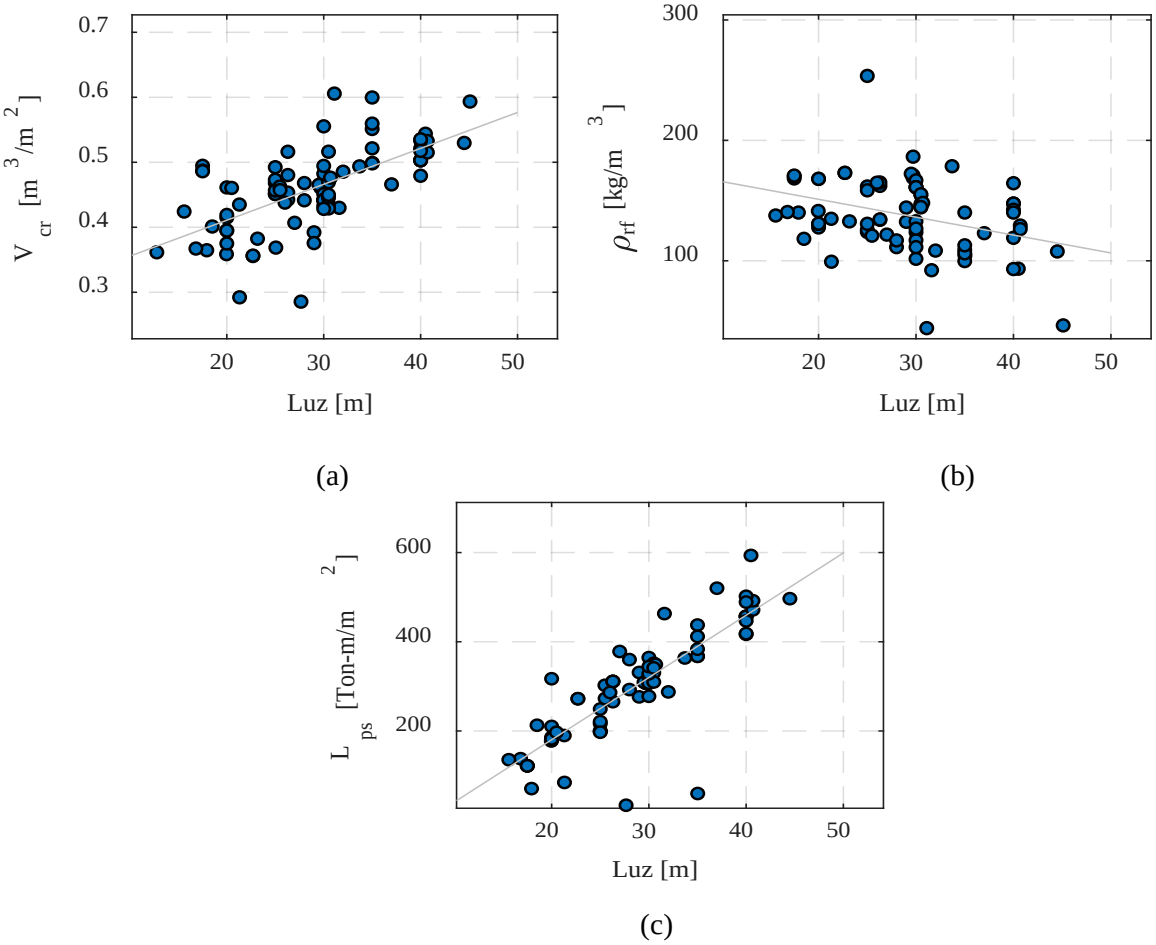


Figura 5-11. Modelo de puente viga-cajón reforzado (Departamento de Antioquia, 1972)



a) b)

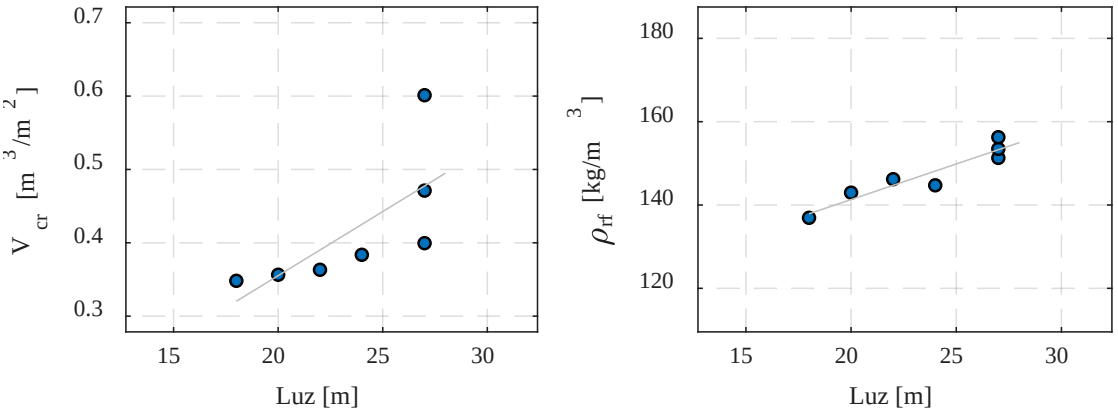
Figura 5-12. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga-placa reforzados



(a) (b)

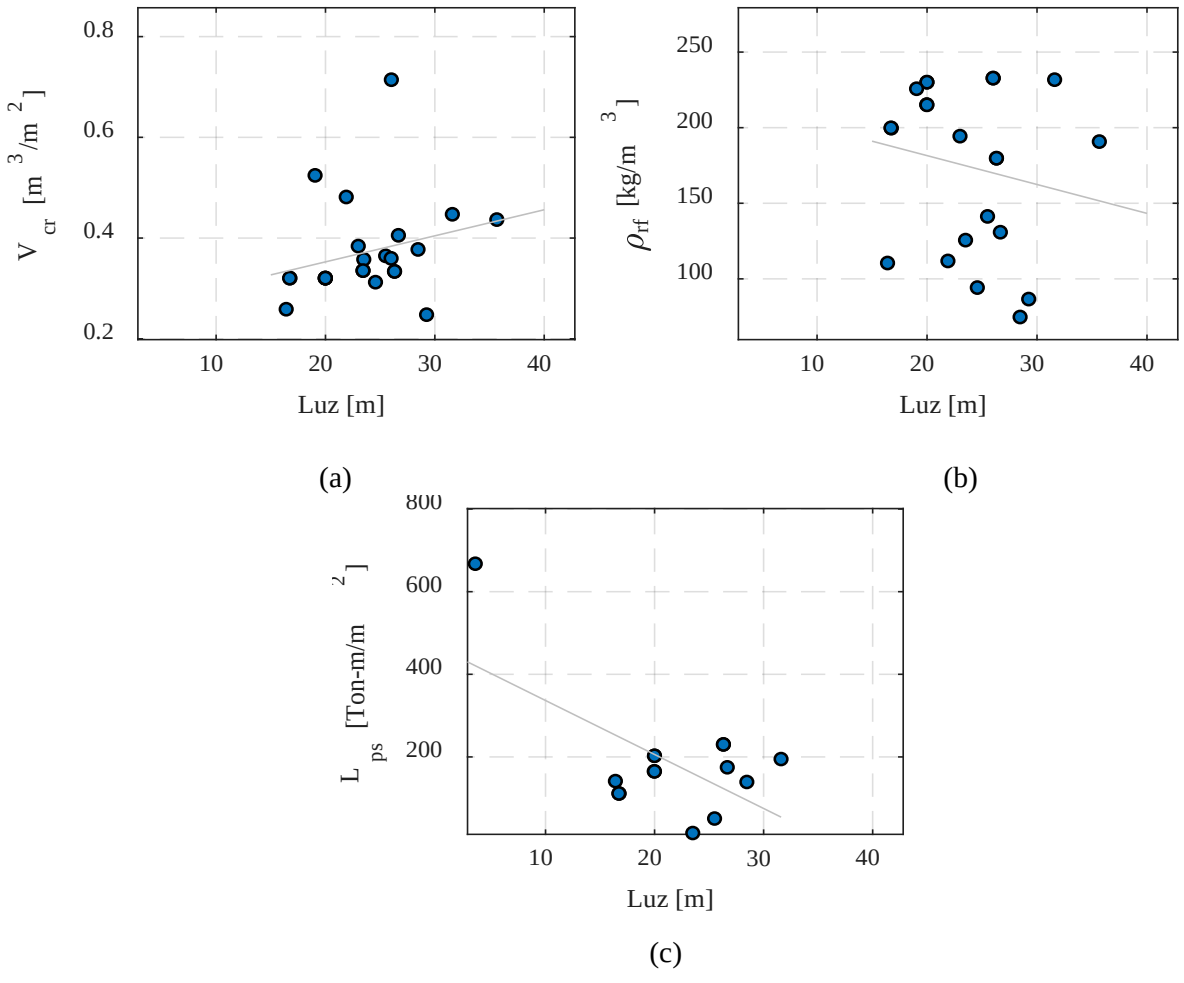
(c)

Figura 5-13. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz, b) cantidad de kg de acero por m^3 de concreto según luz y c) fuerza hidráulica por longitud de acero según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga-placa postensados



a) b)

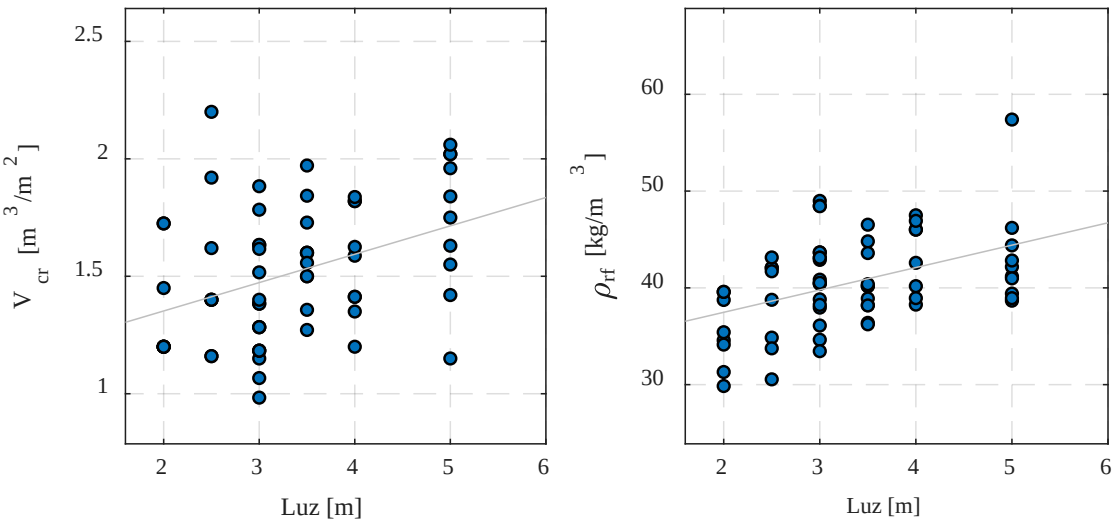
Figura 5-14. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga cajón reforzados.



(a) (b)

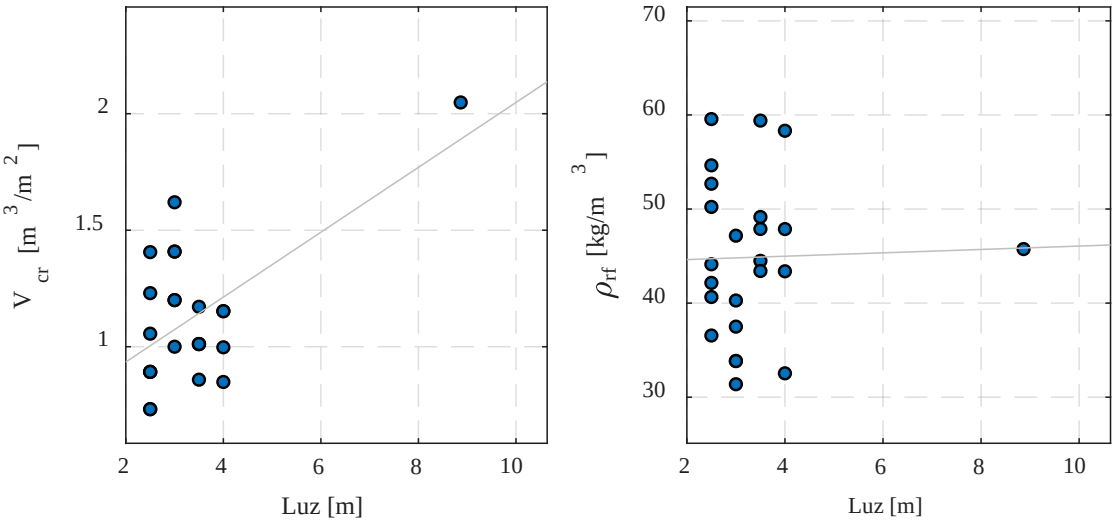
(c)

Figura 5-15. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz y c) fuerza hidráulica por longitud de acero según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo viga cajón postensados



a) b)

Figura 5-16. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo box culverts de una celda.



a) b)

Figura 5-17. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes vehiculares tipo box culvert de varias celdas.

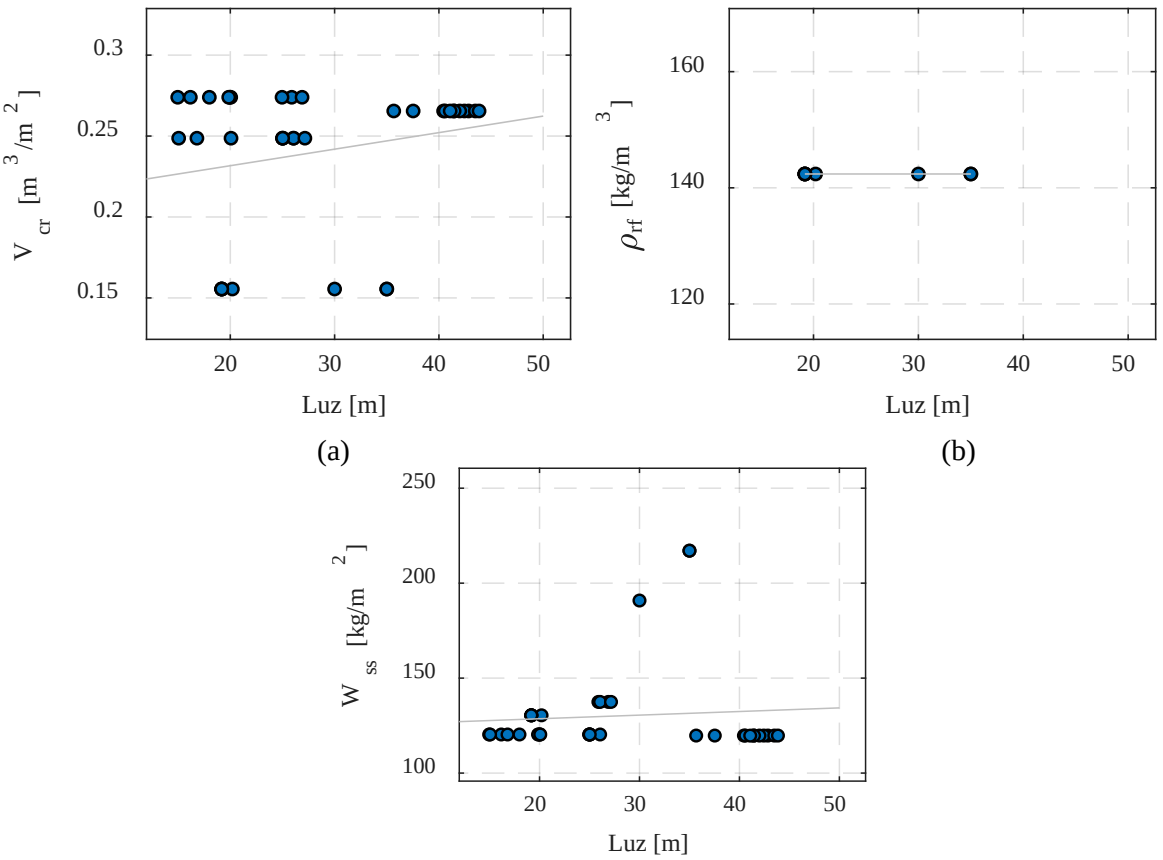


Figura 5-18. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz, b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz y c) kg de acero estructural por área en panta según luz para superestructura de puentes vehiculares mixtos.

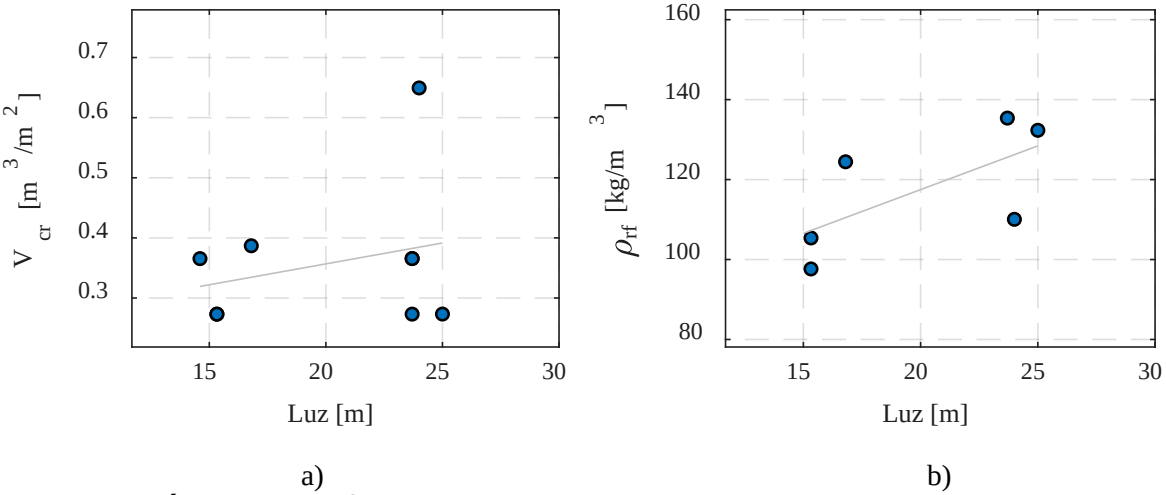


Figura 5-19. Índices de a) m^3 de concreto por área en planta según luz y b) cantidad de kg de acero por cada m^3 de concreto según luz para superestructura de puentes peatonales tipo viga cajón de concreto reforzado

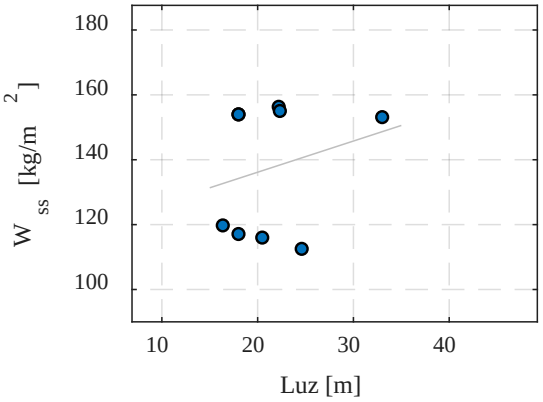


Figura 5-20. Índices de cantidad de kg de acero por área en planta según luz superestructura de puentes peatonales de armadura en acero

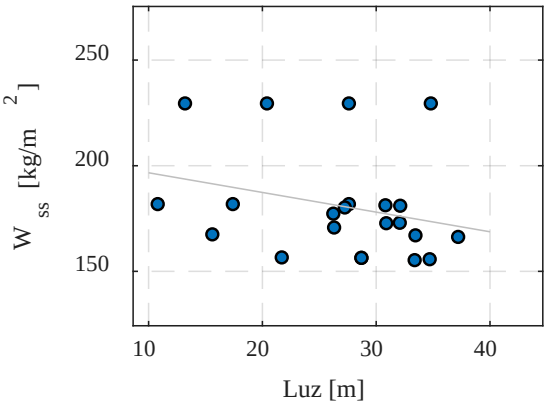
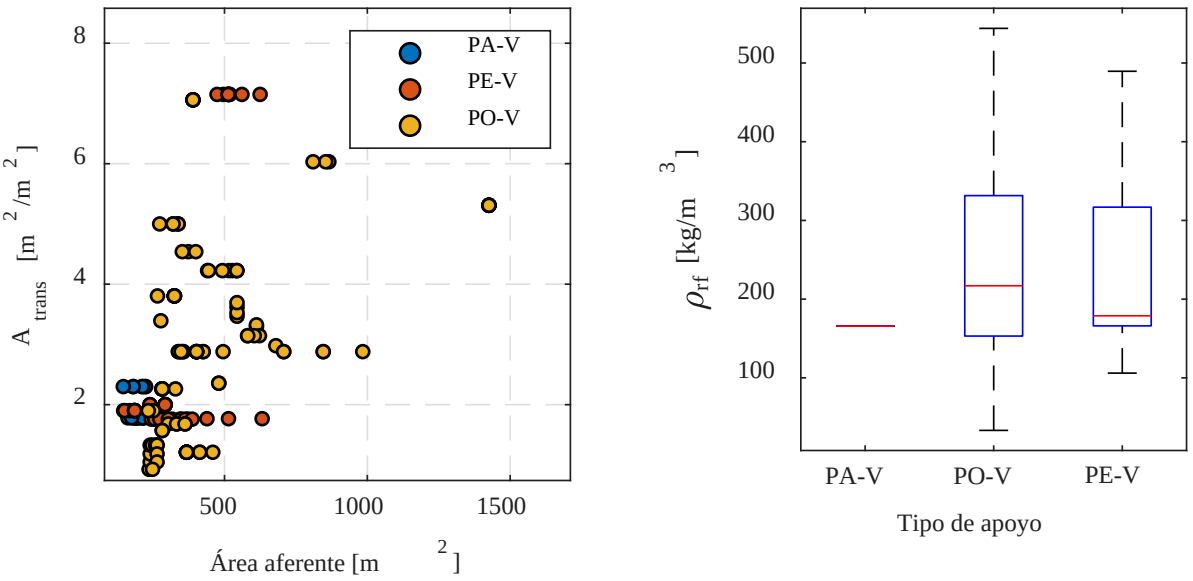


Figura 5-21. Índices de cantidad de kg de acero estructural por área en planta según luz superestructura de puentes peatonales tipo Transmilenio

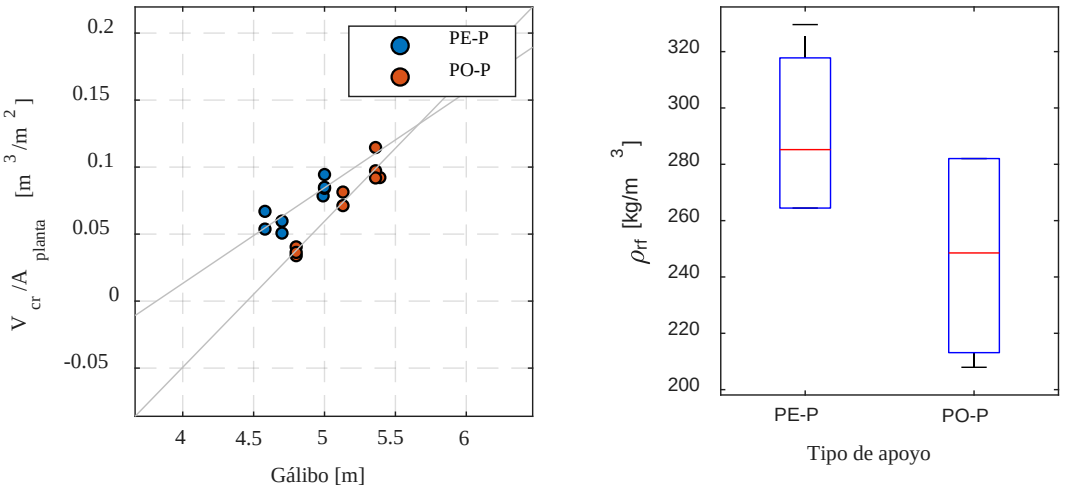
5.3.3.3 Índices de subestructura de acuerdo con la tipología y las características geométricas

Para el caso de subestructura de puentes vehiculares, se optó por calcular los indicadores de acuerdo con la relación entre el área aferente en planta y el área de la sección transversal de las columnas como indicador del nivel de carga de los elementos. Lo anterior se realizó discretizando con respecto al tipo de apoyo: pantalla-PA, péndulo-PE o pórtico-PO), ver Figura 5-22. Para el caso de subestructura en concreto reforzado de puentes peatonales, el valor índice se obtuvo para la relación entre tres parámetros: el volumen total de concreto en relación al área aferente en planta del apoyo y el gálibo (ver Figura 5-23). Para el caso de puentes prototipo Bogotá, la relación de cantidades se calculó respecto al peso total de acero estructural, el área en planta y el gálibo (ver Figura 5-24). Tanto para puentes vehiculares como peatonales, las cuantías de acero se obtuvieron como un único valor relacionado con la cantidad de concreto presente en la subestructura; por lo tanto, este índice se muestra como un diagrama de cajas y bigotes.



a) b)

Figura 5-22. Cantidades de subestructura según el tipo de apoyo: a) relación área transversal de elemento estructural según el área aferente de cada apoyo y b) kg de acero por m3 de concreto en puentes vehiculares



a) b)

Figura 5-23. Cantidades de subestructura según el tipo de apoyo: a) relación área transversal de elemento estructural según el área aferente de cada apoyo y b) kg de acero por m3 de concreto en puentes peatonales con apoyos concreto reforzado

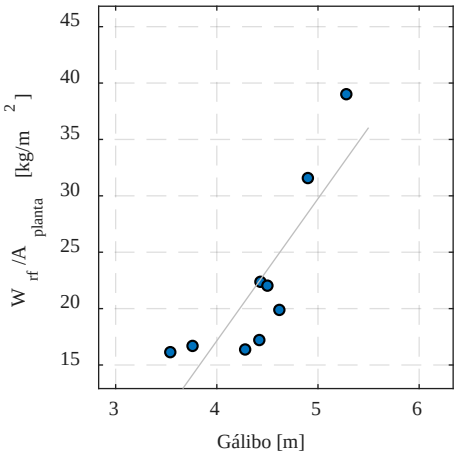
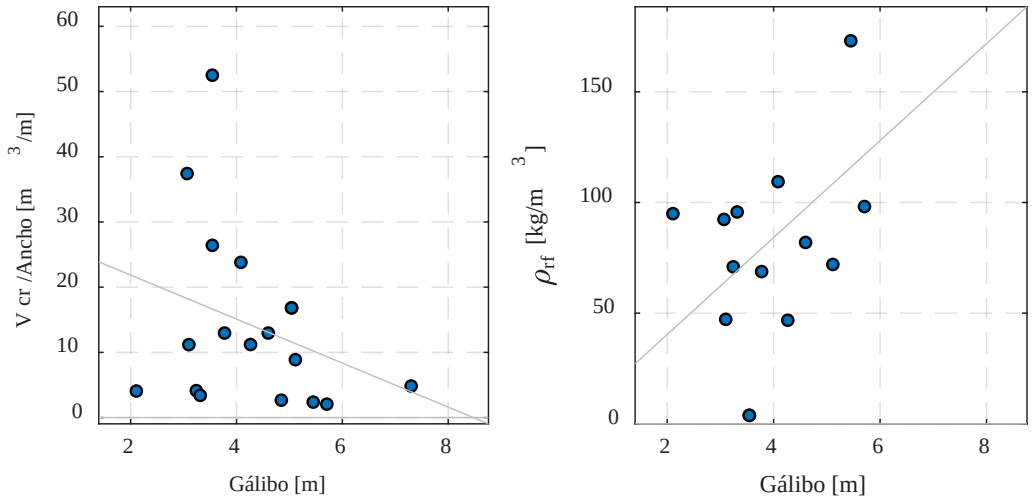


Figura 5-24. Índices de cantidad de kg de acero estructural por área en planta según el gálibo para subestructura de puentes peatonales tipo Transmilenio

Para el cálculo de cantidades en estribos, los índices se relacionaron con la altura de llegada de la rampa (gálibo). La Figura 5-25 presenta los valores índices para puentes vehiculares analizados.



a) b)

Figura 5-25. Cantidades de a) m^3 de concreto por área en planta total según la altura del estribo y b) kg por m^3 de acero de refuerzo dispuesto en estribos

En el caso de puentes peatonales, el costo asociado a las rampas o escaleras de acceso al puente puede ser significativo. Por este motivo, se calcularon de manera aproximada las cantidades de concreto y acero de refuerzo, para el caso de puentes en concreto reforzado (ver Figura 5-26) y cantidades de acero estructural para el caso de puentes prototipo Bogotá (ver Figura 5-27).

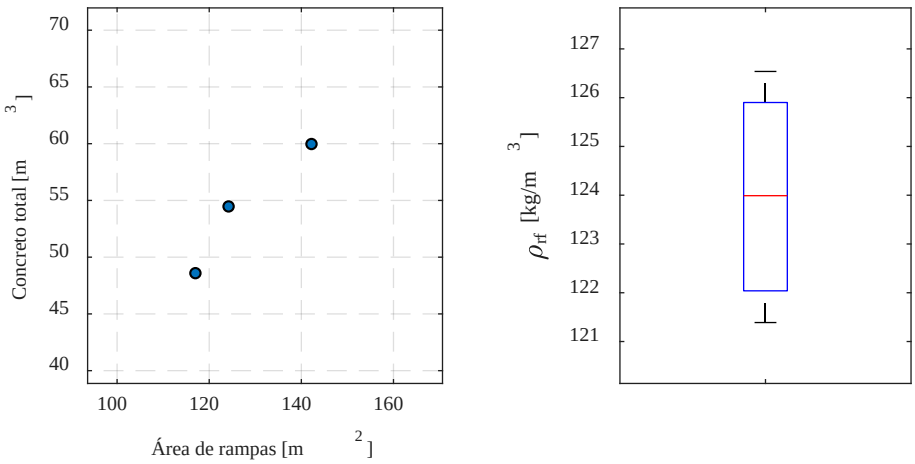


Figura 5-26. Cantidades de a) m3 de concreto por área en planta de rampa y b) kg por m3 de acero de refuerzo dispuesto en estructuras de rampas o escaleras en puentes peatonales de concreto reforzado

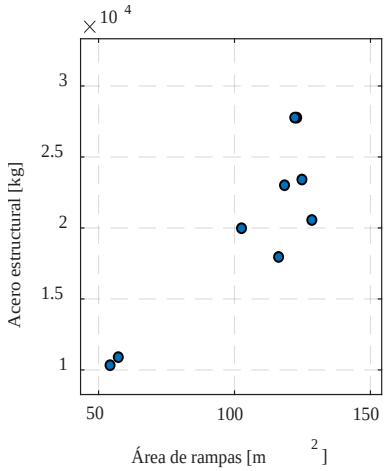
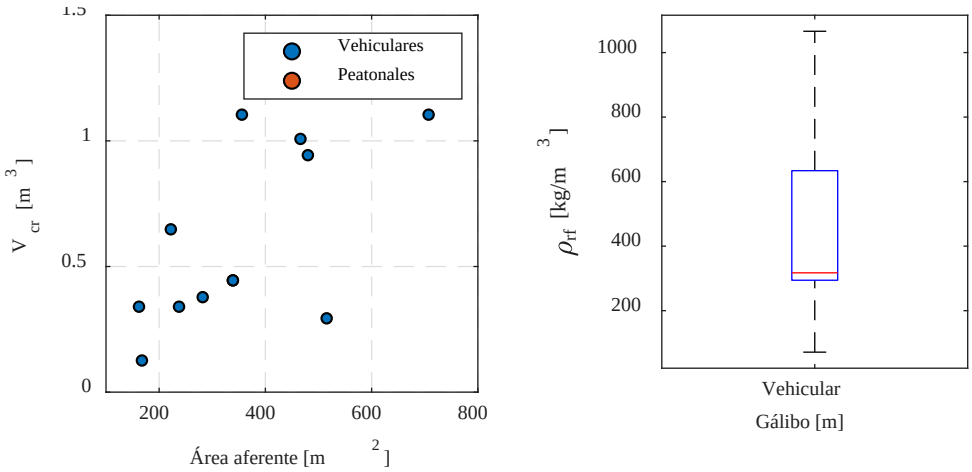


Figura 5-27. Cantidades de kg de acero estructural según el área en planta de rampa o escaleras en puentes peatonales prototipo Bogotá

5.3.3.4 Índices de topes sísmicos de acuerdo con el tipo de puente

Las cantidades índice en topes sísmicos para puentes de Bogotá se calcularon de manera general para puentes vehiculares y peatonales. La Figura 5-28 presenta las cantidades de concreto y acero de refuerzo típico utilizado en estos elementos. Las cantidades son representativas de los topes sísmicos en un solo apoyo (o eje de apoyos).



a) b)

Figura 5-28. Cantidades de a) m³ de concreto y b) kg por m³ de acero de refuerzo dispuesto en topes sísmicos de puentes de Bogotá

5.3.3.5 Índices de cimentación de acuerdo con la tipología, las características geométricas y la ubicación del puente

Las cantidades índice de cimentación para puentes de Bogotá fueron estimadas a partir del tipo de suelo sobre el cual se encontraba cada uno de los puentes analizados (ver Figura 5-29), el área aferente del apoyo y el gálibo. La evaluación de las cantidades de concreto y acero para los dados y pilotes de cimentación se presentan en la Figura 5-30 y la Figura 5-31, para el caso de puentes vehiculares, y la Figura 5-32 para puentes peatonales. Los índices de dados se relacionaron con el área en planta del puente y el gálibo. Para el total de kilogramos de acero de refuerzo, se utilizó la relación de ésta con el volumen de concreto para obtener la cuantía volumétrica.

(Espacio en blanco intencional)

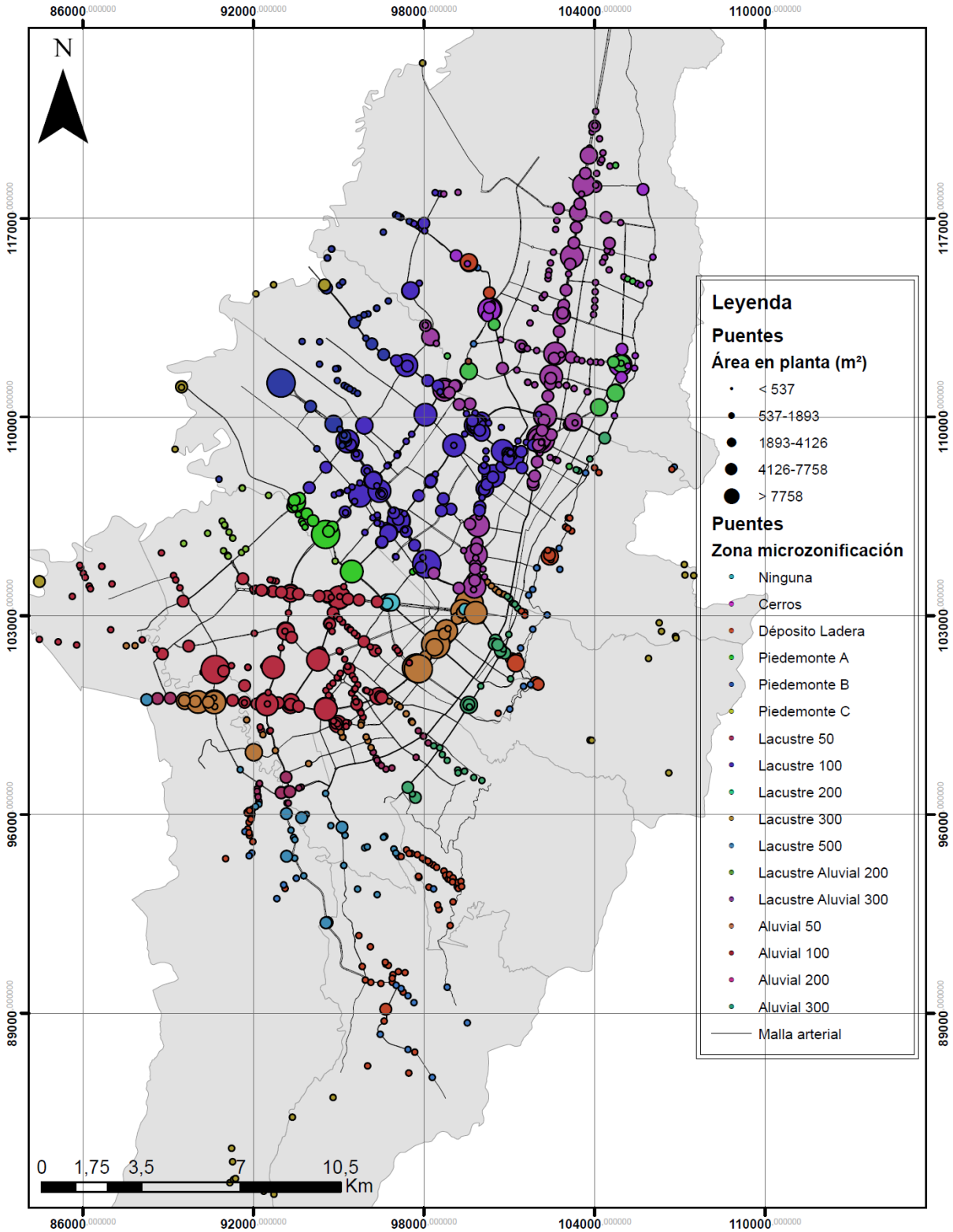


Figura 5-29. Ubicación de los puentes de Bogotá. Los colores indican el tipo de zona de amenaza sísmica y el tamaño de círculo indica el tamaño del puente

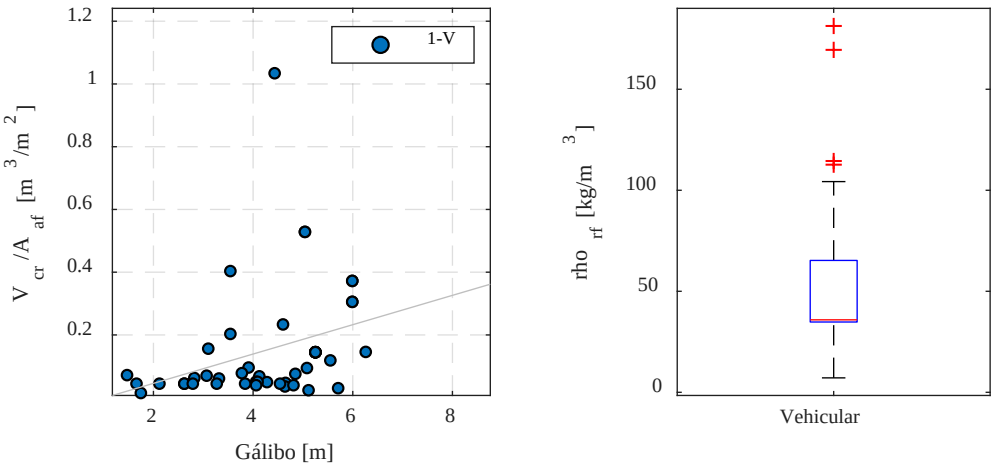


Figura 5-30. Cantidades de dados de cimentación por área aferente según el gálibo del puente

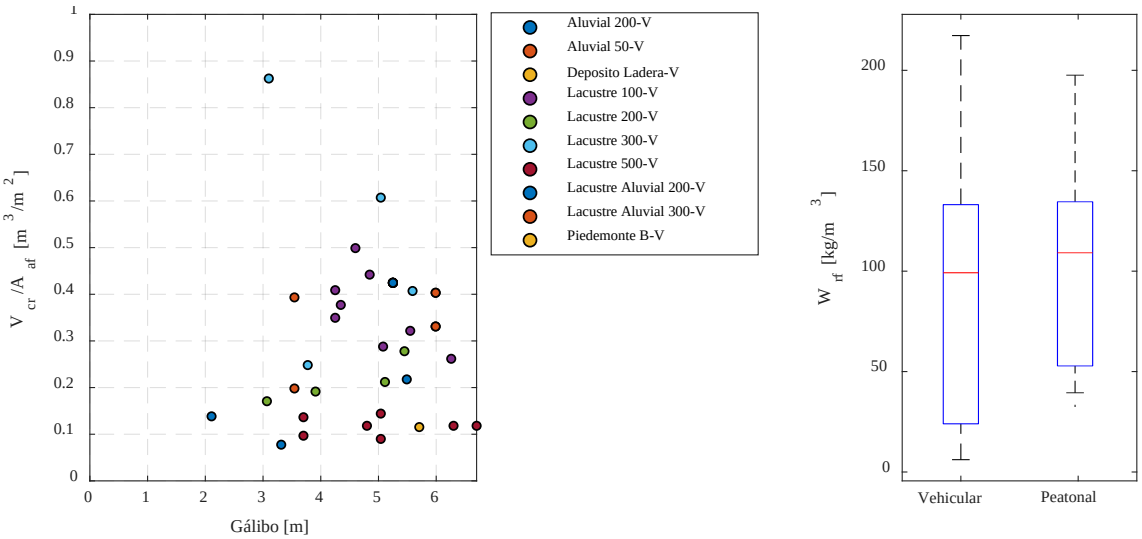


Figura 5-31. Cantidades de pilotes a) volumen de concreto por área aferente, según el gálibo y el tipo de suelo para los pilotes de puentes vehiculares y b) distribución de la cuantía volumétrica de kg acero de refuerzo por m3 de concreto de puentes vehiculares y peatonales

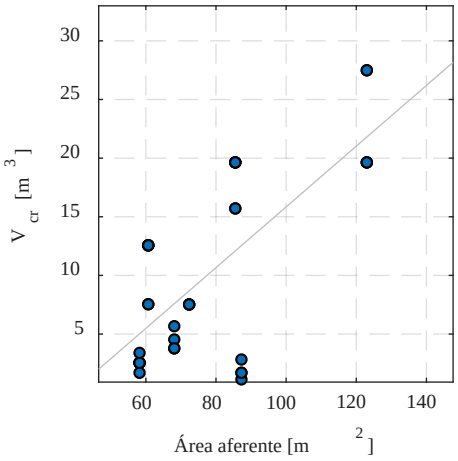


Figura 5-32. Volumen de concreto según el área aferente al apoyo para puentes peatonales

5.3.4 Comparación de índices con información en literatura

Se validaron los índices de cantidades obtenidos con los encontrados en la bibliografía mencionada en el literal 5.3.1 principalmente con la referencia "Bridge Design Aids" (Caltrans Metric, 2005). Esta se limita a una comparación de órdenes de magnitud y tendencias generales de los índices calculados para cada tipo de elemento, dado que, debido a que se trata de una referencia internacional existen diferencias en las técnicas y procedimientos constructivos, niveles de amenaza sísmica, tipos de suelos, y demás parámetros y criterios del diseño estructural. Por lo tanto, la comparación se realiza sólo para validar que los valores no sean muy distintos a los esperados en otros países. La Figura 5-33 a la Figura 5-39 presenta la comparación con los índices reportados según la tipología constructiva.

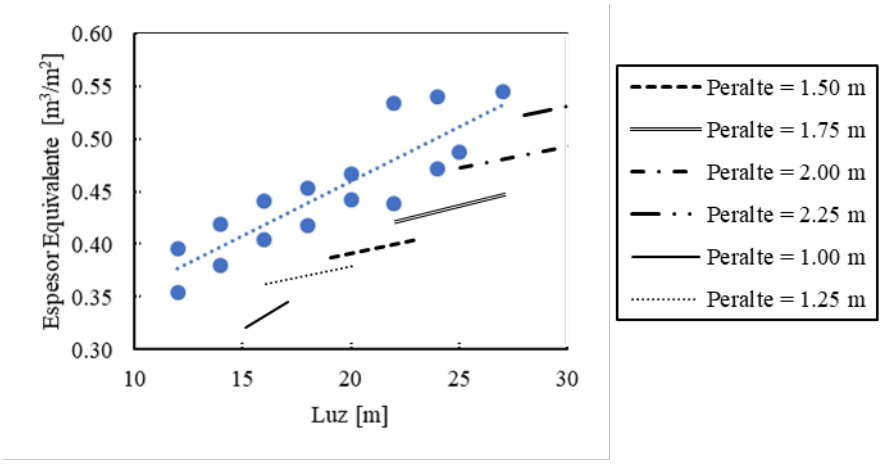


Figura 5-33. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga-placa reforzada

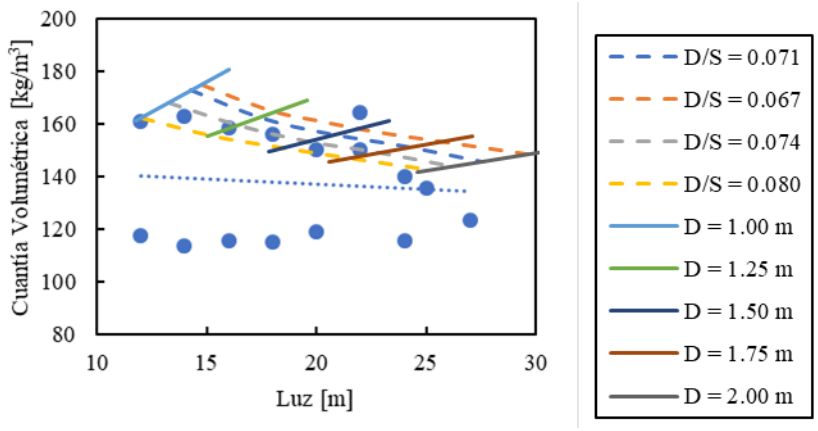


Figura 5-34. Comparación de cuantía volumétrica de refuerzo de superestructura de puentes de viga-placa reforzada

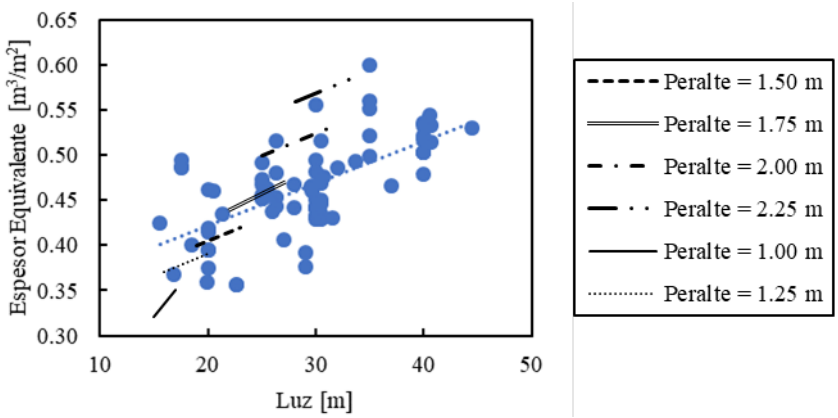


Figura 5-35. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga-placa postensada

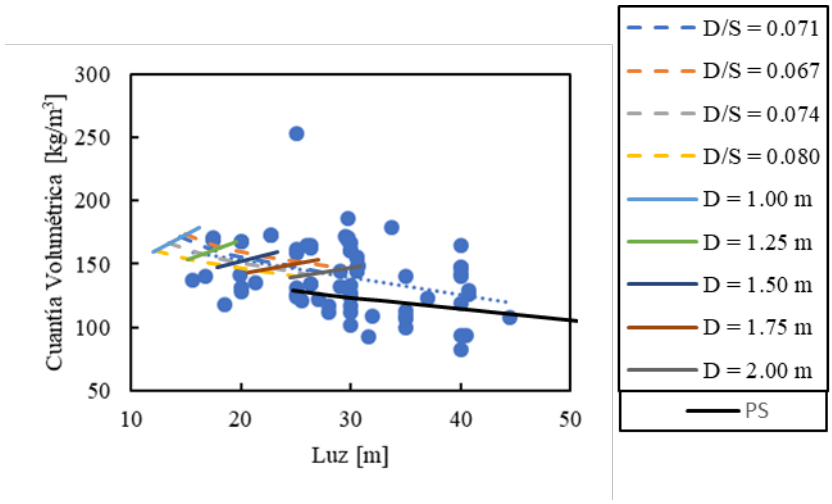


Figura 5-36. Comparación de cuantía volumétrica refuerzo de superestructura de puentes de viga-placa postensada

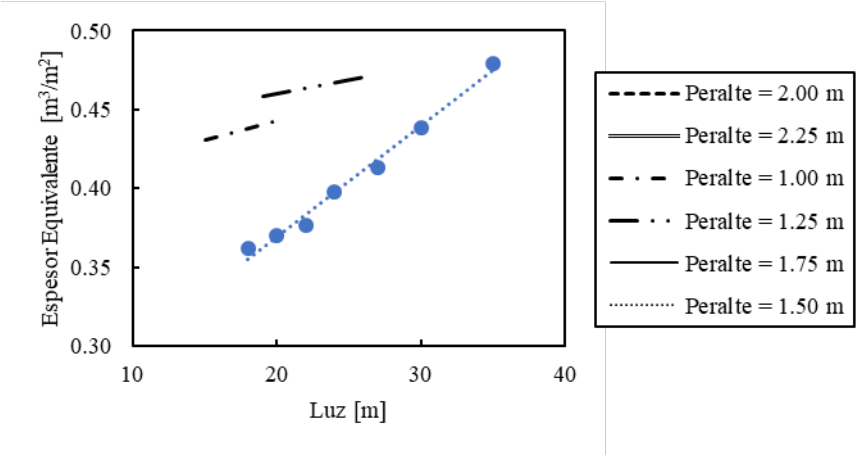


Figura 5-37. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga cajón en concreto reforzado

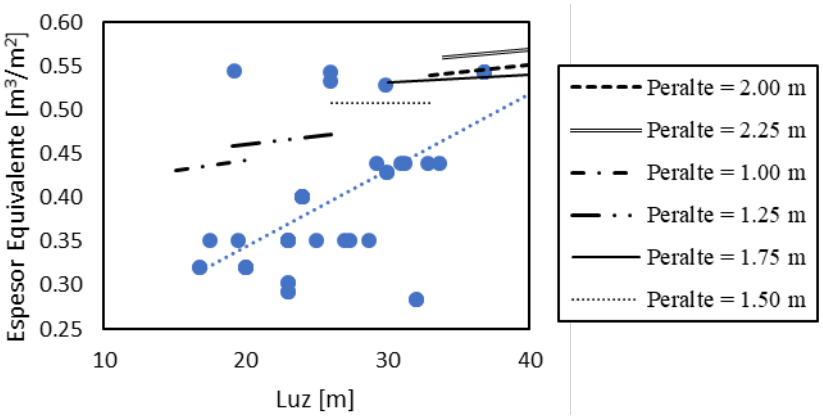


Figura 5-38. Comparación de volumen de concreto de superestructura de puentes de viga cajón en concreto postensado

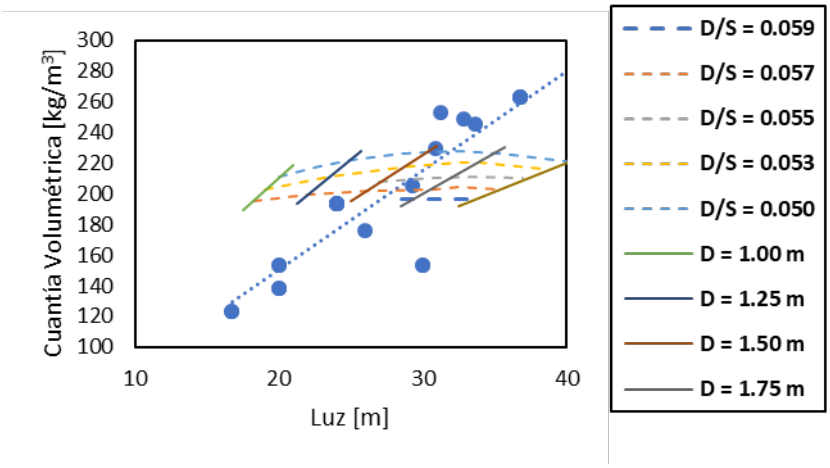


Figura 5-39. Comparación de cuantía volumétrica de refuerzo de superestructura puentes de viga cajón en concreto postensado

De lo anterior, se puede concluir que los estadísticos obtenidos manejan el mismo orden de magnitudes que los reportados por la guía de diseño del CALTRANS, teniendo en consideración las diferencias mencionadas. Por consiguiente, el ejercicio de comparación valida los datos estadísticos encontrados. Esto permite utilizar las curvas de datos de cantidades como base de la metodología de valoración económica.

5.3.5 Precios unitarios para valoración económica

Los precios unitarios utilizados para el modelo de valoración económica corresponden a los disponibles en la base de datos de precios de referencia IDU-2018-I, los cuales junto con la estimación de las cantidades estructurales para un puente particular permiten estimar el costo de su estructura. Las especificaciones de capacidades de materiales para cada elemento se fijaron a partir de las más típicas encontradas en los planos levantados y los cuales se presentan en la Figura 5-40.

COSTO ESTRUCTURAS					
ITEM	1		DESCRIPCIÓN	UN	APU
1	1.1	CONCRETO EN OBRA	CONCRETO 2000 PSI (Hecho en Obra 1:2:2)	m³	$ 282,144
2	1.2		CONCRETO 3000 PSI (Hecho en Obra 1:2:2)	m³	$ 322,361
3	1.3		CONCRETO 3500 PSI (Hecho en Obra 1:2:2)	m³	$ 322,102
4	1.4		CONCRETO 4000 PSI (Hecho en Obra 1:2:2)	m³	$ 331,962
5	1.5	CONCRETO ESTRIBOS	CONCRETO 3000 PSI PARA ESTRIBOS (Premezclado. Incluye Suministro, Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	m³	$ 575,277
6	1.6		ESTRIBOS CONCRETO GRAVA COMUN 3000PSI (210kG/cm2) ACELERADO A 2 DIAS (INCLUYE ACELERANTE, FORMALETA, CURADO DE CONCRETO Y MANO DE OBRA).	m³	$ 557,998
7	1.7	CONCRETO ESTRIBOS Y SUPERESTRUCTURA/SUPERESTRUCTURA	CONCRETO GRAVA COMÚN 3000 PSI PARA ESTRIBOS Y SUPER ESTRUCTURA (NO INCLUYE REFUERZO NI CURADO)	m³	$ 393,307
8	1.8		CONCRETO GRAVA COMÚN 3500 PSI PARA ESTRIBOS Y SUPER ESTRUCTURA (NO INCLUYE REFUERZO NI CURADO)	m³	$ 455,625
9	1.9		CONCRETO GRAVA COMÚN 4000 PSI PARA ESTRIBOS Y SUPER ESTRUCTURA (NO INCLUYE REFUERZO NI CURADO) (M3)	m³	$ 429,451
10	1.10		CONCRETO 5000 PSI PARA SUPERESTRUCTURA (Premezclado, Incluye suministro, formaleteo y colocación. No incluye refuerzo no curado)	m³	$ 669,292
11	1.11		CONCRETO 5000 PSI (350 Kg/Cm2) PARA SUPER ESTRUCTURA ACELERADO A 2 DIAS. (Concreto grava común.Incluye acelerante, formaleta, curado de concreto y mano de obra).	m³	$ 613,476
12	1.12		CONCRETO 6000 PSI PARA SUPER ESTRUCTURA (Premezclado. Incluye Suministro, Formaleteo y Colocación. No incluye Refuerzo, Curado).	m³	$ 737,200
13	1.13	CONCRETO ELEMENTOS SUPERESTRUCTURA	CONCRETO 3000 PSI PARA PUENTE CAJON (Premezclado. Incluye Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	m³	$ 573,492
14	1.14		CONCRETO 3500 PSI PARA VIGA (Premezclado. Incluye Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	m³	$ 684,738
15	1.15		CONCRETO 4000 PSI PARA PLACAS Y VIGAS AEREAS (Premezclado. Incluye suministro, formaleteo y colocación. No incluye refuerzo, curado, andamio, cerchas, parales)	m³	$ 684,974
16	1.16		CONCRETO 4000 PSI PREMEZCLADO PARA TABLERO PUENTE (Incluye Suministro e instalación, bombeo de concreto, aditivo para puente de adherencia de concreto fresco y endurecido).	m³	$ 509,951
17	1.17		CONCRETO 4000 PSI PARA TABLERO PUENTE DE 5.30m x 0.20m x 27.00m (Premezclado. Incluye Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	m³	$ 567,498
18	1.18		CONCRETO 5000 PSI PARA VIGA TIPO I DE 1.40m x 0.65m CON ALA DE 0.20m Y LONGITUD DE 27.0m(Premezclado. Incluye Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	m³	$ 720,359
19	1.19		IZAJE Y MONTAJE DE VIGA EN CONCRETO L=30mt APROX INCLUYE DOS GRUAS TELESCOPICAS 50TON PERSONAL PARA IZAJE Y MONTAJE	Un	$ 6,379,646
20	1.20		CONCRETO 3000 PSI PARA BARANDAS (Premezclado. Incluye Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	m³	$ 490,890
21	1.21	CONCRETO SUBESTRUCTURA	CONCRETO 3000 PSI PARA MURO DE CONTENCIÓN (Premezclado. Incl. Sumin, Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	m³	$ 608,504
22	1.22		CONCRETO 3500 PSI PARA MURO ESTRUCTURAL (Premezclado. Incl. Sumin, Formaleteo, bombeo, curado y Colocación. No incl. Refuerzo)	m³	$ 717,353
23	1.23		CONCRETO 4000 PSI PARA MURO ESTRUCTURAL (Premezclado. Incl. Sumin, Formaleteo, bombeo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	m³	$ 593,148
24	1.24		CONCRETO 4000 PSI PARA MURO DE CONTENCIÓN (Premezclado. Incl. Sumin, Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	m³	$ 663,111
25	1.25	CONCRETO CIMENTACIONES	CONCRETO 3500 PSI (245 Kg/Cm2) GRAVA COMUN PARA CIMENTACIONES (INCLUYE FORMALETA. NO INCLUYE REFUERZO NI CURADO. INCLUYE SUMINISTRO Y COLOCACION).	m³	$ 455,667
26	1.26		CONCRETO 4000 PSI PARA DADOS (Premezclado. Incluye Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	m³	$ 515,885
27	1.27		CONCRETO 3000 PSI PARA ZAPATA (Premezclado. Incluye bombeo, Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	m³	$ 505,455
28	1.28		CONCRETO 3500 PSI PARA ZAPATAS (Premezclado. Incluye bombeo, Sumin., Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	m³	$ 526,247
29	1.29	CONCRETO PILOTES POR METRO LINEAL	PILOTE D=20 CM (Incl. Excavación, Cargue y Retiro de Sobrantes, Movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto).	ml	$ 253,221
30	1.30		PILOTE D=25 CM (Incl. Excavación, Concreto, Cargue y Retiro de Sobrantes, Desmovilización, montaje y desmontaje de Equipo. Incluye movilización hacia y desde la obra y entre perforaciones, montaje y desmontaje, registro de muestras correspondientes al perfil estratigráfico. También incluye el cargue, retiro y disposición final de escombros. Suministro y colocación del concreto).	ml	$ 161,340
31	1.31		PILOTES DE CONCRETO (PREBARRENADOS) CON DIÁMETRO 0.30M 3000 PSI (Incluye: Excavación, Fundida, Localización, Prehuecos, Agua de Carrotanques, Retiro de lodos y Descabece de pilotes)	ml	$ 200,721
32	1.32		PILOTE D=40 CM (Incl. Excavación, Cargue y Retiro de Sobrantes, Movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto). Incluye movilización hacia y desde la obra y entre perforaciones, montaje y desmontaje, registro de muestras correspondientes al perfil estratigráfico. También incluye el cargue, retiro y disposición final de escombros, suministro y colocación del concreto.	ml	$ 294,222
33	1.33		PILOTE D=50 CM (Incl. Excavación, concreto,cargue y Retiro de Sobrantes, desmovilizacion montaje y desmontaje de equipo. Incluye , movilización hacia y desde la obra y entre perforaciones, montaje y desmontaje, registro de muestras correspondientes al perfil estratigráfico. También incluye el cargue, retiro y disposición final de escombros, suministro y colocación del concreto.	ml	$ 352,652
34	1.34		PILOTE D=60 CM (Incl. Excavación, concreto, cargue y Retiro de Sobrantes, Movilización, montaje y desmontaje equipo. Incluye , movilización hacia y desde la obra y entre perforaciones, montaje y desmontaje, registro de muestras correspondientes al perfil estratigráfico. También incluye el cargue, retiro y disposición final de escombros, suministro y colocación del concreto.	ml	$ 427,385
35	1.35		PILOTE D=70 CM (Incl. Excavación, Cargue, movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto)	ml	$ 500,223
36	1.36		PILOTE D=80 CM (Incl. Excavación, Cargue, movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto)	ml	$ 658,884
37	1.37		PILOTE D=90 CM (Incl. Excavación, Cargue, movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto)	ml	$ 713,298
38	1.38		PILOTE D=100 CM (Incl. Excavación, Cargue, movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto)	ml	$ 774,083
39	1.39		PILOTE D=110 CM (Incl. Excavación, Cargue, movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto)	ml	$ 1,062,559
40	1.40		PILOTE D=120 CM (Incl. Excavación, Cargue, movilización, montaje y desmontaje equipo, y concreto)	ml	$ 1,136,161

Figura 5-40. Precios unitarios de materiales utilizados típicamente en la construcción de puentes. Tomado del Sistema de Precios de Referencia IDU-2018-1

5.3.6 Presupuestación típica para construcción de puentes

El cálculo del valor total del puente debe considerar todos los posibles capítulos que conforman el presupuesto típico de obra de infraestructura de puentes en Bogotá. Para el presente proyecto, se revisaron un total de 84 contratos (ver por ejemplo la Figura 5-41). De este total, 77 fueron seleccionados dado que se identificaron como "Contratos de construcción únicamente de puentes". De estos contratos seleccionados 27 pertenecen a puentes vehiculares y 49 a puentes peatonales. Se considera su validez estadística para representar el total de puentes en Bogotá.

A estos contratos se les realizó una inspección detallada de las actividades realizadas y se pre-procesaron los datos manualmente para poder cuantificar los valores de los siguientes capítulos:

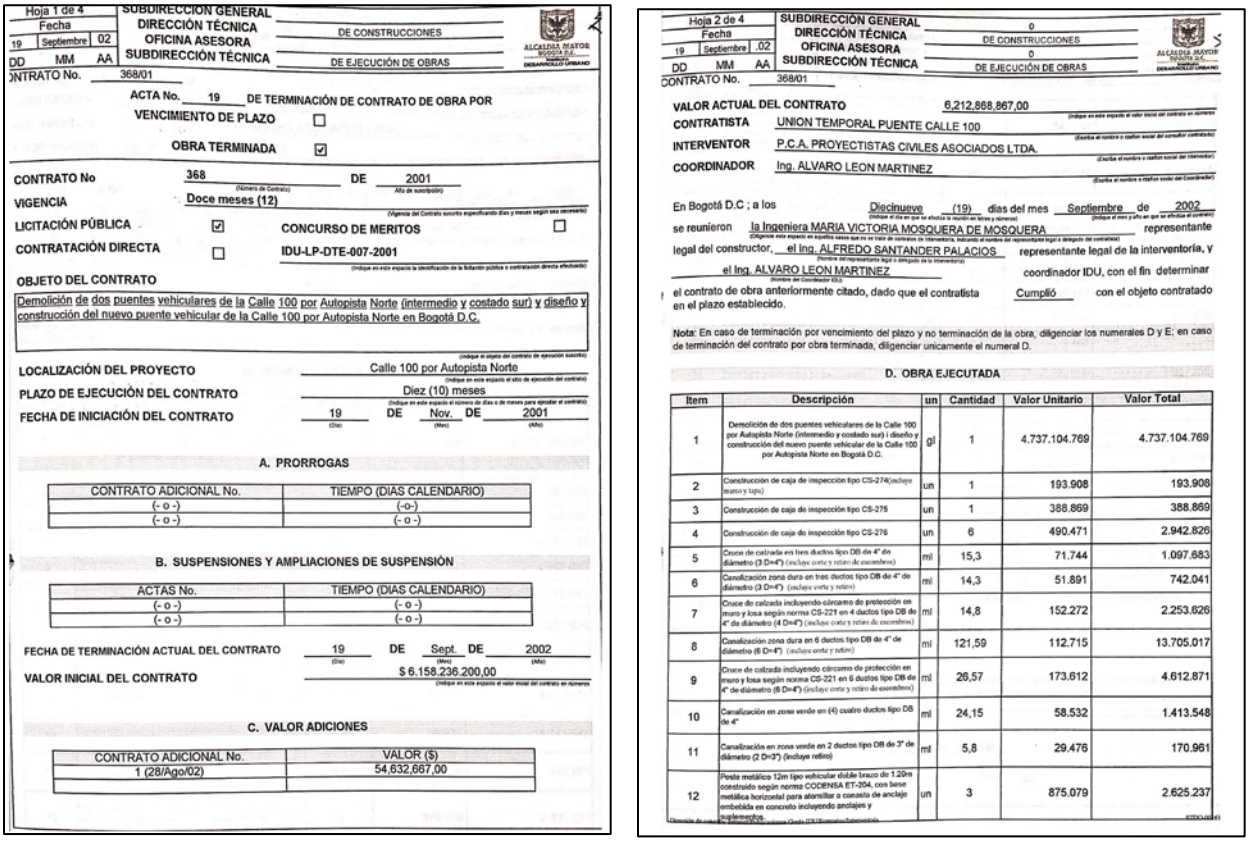
1. Diseño: Actividades de diseño inicial del proyecto, incluye diseños arquitectónicos, estructurales de redes, geométrico y demás, así como costo por reprocesos de diseños anteriores por cambio en normativa de construcción.
2. Preliminares: Actividades de iniciación de la construcción del proyecto, replanteo, demolición de pavimento superficies existentes y descapote de material común.
3. Pavimentos: Actividades de la estructura de pavimentos definida por el diseño, incluye las mezclas asfálticas/losas de concreto y sub-bases y su instalación y disposición, tanto en las rampas como sobre el tablero.
4. Espacio Público: Corresponde a las actividades de paisajismo, zonas de ciclo-rutas y andenes sobre el puente y las rampas.
5. Estructura: Corresponde a las actividades y materiales requeridos para la construcción de la estructura del puente de acuerdo con los diseños definidos. Adicional a la estructura, en este capítulo se incluyeron los costos debidos a las rampas de aproximación (caso de puentes vehiculares) y/o las rampas y escaleras junto con las estructuras de apoyo (caso de puentes peatonales).
6. Redes: Actividades y materiales requeridos para la instalación del paso de redes de servicios (alcantarillado, acueducto, eléctricas y telefónicas)
7. A.I.U: Costo por administración, imprevistos y utilidad del proyecto.
8. Gestión Ambiental, Social y Tráfico: Costos incurridos por la implementación del plan de manejo ambiental, plan de gestión social y plan de manejo de tráfico del proyecto.
9. Otros: Incluye las actividades no abarcadas por los capítulos anteriores, tales como los fondos especiales para compensaciones, costos estimados de obras de licitación, fondo especial para contingencias.
10. Valor total del contrato: Este valor corresponde al valor referenciado en el acta de recibo del puente. El valor es traído a valor presente neto utilizando el Índice de Costos de Construcción Pesada (ICCP) reportada por DANE.

Con esta información, se procede a calcular la relación entre los costos asociados a cada capítulo y el valor total del contrato. Los valores porcentuales presentan la facilidad de que los datos son comparables sin la necesidad de afectarlos por el ICCP. Los valores porcentuales encontrados para los proyectos presentan una variación muy importante, sin embargo, la selección de contratos únicamente de construcción de un puente permite eliminar sesgos o errores producidos por contratos donde el objeto del mismo incluye obras complementarias que cuantitativamente representan parte importante del costo del proyecto (por ejemplo,

aquellos proyectos donde se construyeron puentes y a la vez se realizaron actividades de construcción de troncales).

Se realizó la digitalización de los costos contenidos en las actas de terminación disponibles de los 77 contratos de construcción recopilados. Dichos costos, reportados de forma independiente en las cantidades del acta, se agruparon en los capítulos ya mencionados anteriormente. En el presente proyecto, estos valores de distribución fueron utilizados para definir el porcentaje que típicamente representa el valor de la estructura respecto al costo del proyecto; estos valores son utilizados posteriormente para extrapolar el valor del costo de la estructura al costo total del puente y los demás capítulos.

La Figura 5-42 a la Figura 5-44, presentan la distribución de los valores encontrados para la relación costo del capítulo entre el costo total del proyecto para diferentes agrupaciones de puentes. En estas gráficas se puede observar los capítulos que generalmente generan mayor impacto en el costo del proyecto, las variaciones que existen para el valor de cada capítulo, valores máximos, entre otros.



Hoja 1 de 4 — SUBDIRECCIÓN GENERAL / DIRECCIÓN TÉCNICA / OFICINA ASESORA / SUBDIRECCIÓN TÉCNICA — DE CONSTRUCCIONES — DE EJECUCIÓN DE OBRAS

Fecha: 19 Septiembre 02 (DD MM AA)

CONTRATO No. 368/01

ACTA No. 19 DE TERMINACIÓN DE CONTRATO DE OBRA POR

VENCIMIENTO DE PLAZO ☐

OBRA TERMINADA ☑

CONTRATO No 368 (Número de Contrato) DE 2001 (Año de suscripción)

VIGENCIA Doce meses (12) (Vigencia del Contrato suscrito especificando días y meses según sea necesario)

LICITACIÓN PÚBLICA ☑ CONCURSO DE MERITOS ☐

CONTRATACIÓN DIRECTA ☐ IDU-LP-DTE-007-2001 (Indique en este espacio la identificación de la licitación pública o contratación directa efectuada)

OBJETO DEL CONTRATO

Demolición de dos puentes vehiculares de la Calle 100 por Autopista Norte (intermedio y costado sur) y diseño y construcción del nuevo puente vehicular de la Calle 100 por Autopista Norte en Bogotá D.C. (Indique el objeto del contrato de ejecución suscrito)

LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO Calle 100 por Autopista Norte (Indique en este espacio el sitio de ejecución del contrato)

PLAZO DE EJECUCIÓN DEL CONTRATO Diez (10) meses (Indique en este espacio el número de días o de meses para ejecutar el contrato)

FECHA DE INICIACIÓN DEL CONTRATO 19 (Día) DE Nov. (Mes) DE 2001 (Año)

A. PRORROGAS

CONTRATO ADICIONAL No.	TIEMPO (DIAS CALENDARIO)
(- o -)	(-o-)
(- o -)	(- o -)

B. SUSPENSIONES Y AMPLIACIONES DE SUSPENSIÓN

ACTAS No.	TIEMPO (DIAS CALENDARIO)
(- o -)	(- o -)
(- o -)	(- o -)

FECHA DE TERMINACIÓN ACTUAL DEL CONTRATO 19 (Día) DE Sept. (Mes) DE 2002 (Año)

VALOR INICIAL DEL CONTRATO $ 6.158.236.200,00 (Indique en este espacio el valor inicial del contrato en números)

C. VALOR ADICIONES

CONTRATO ADICIONAL No.	VALOR ($)
1 (28/Ago/02)	54,632,667,00

Hoja 2 de 4 — SUBDIRECCIÓN GENERAL / DIRECCIÓN TÉCNICA / OFICINA ASESORA / SUBDIRECCIÓN TÉCNICA — 0 DE CONSTRUCCIONES — 0 DE EJECUCIÓN DE OBRAS

Fecha: 19 Septiembre 02 (DD MM AA)

CONTRATO No. 368/01

VALOR ACTUAL DEL CONTRATO 6,212,868,867,00 (Indique en este espacio el valor inicial del contrato en números)

CONTRATISTA UNION TEMPORAL PUENTE CALLE 100

INTERVENTOR P.C.A. PROYECTISTAS CIVILES ASOCIADOS LTDA. (Escriba el nombre o razón social del consultor contratado)

COORDINADOR Ing. ALVARO LEON MARTINEZ (Escriba el nombre o razón social del Interventor) (Escriba el nombre o razón social del Coordinador)

En Bogotá D.C ; a los Diecinueve (19) (Indique el día en que se efectúa la reunión en letras y números) días del mes Septiembre (Indique el mes y año en que se efectúa el contrato) de 2002 se reunieron la Ingeniera MARIA VICTORIA MOSQUERA DE MOSQUERA (Digitar este espacio en español cuando sea en el caso de contratos de interventoría, indicando el nombre del representante legal o delegado del contratista) representante legal del constructor, el Ing. ALFREDO SANTANDER PALACIOS (Nombre del representante legal o delegado de la interventoría) representante legal de la interventoría, y el Ing. ALVARO LEON MARTINEZ (Nombre del Coordinador IDU) coordinador IDU, con el fin determinar el contrato de obra anteriormente citado, dado que el contratista Cumplió con el objeto contratado en el plazo establecido.

Nota: En caso de terminación por vencimiento del plazo y no terminación de la obra, diligenciar los numerales D y E; en caso de terminación del contrato por obra terminada, diligenciar unicamente el numeral D.

D. OBRA EJECUTADA

Item	Descripción	un	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Demolición de dos puentes vehiculares de la Calle 100 por Autopista Norte (intermedio y costado sur) i diseño y construcción del nuevo puente vehicular de la Calle 100 por Autopista Norte en Bogotá D.C.	gl	1	4.737.104.769	4.737.104.769
2	Construcción de caja de inspección tipo CS-274(incluye marco y tapa)	un	1	193.908	193.908
3	Construcción de caja de inspección tipo CS-275	un	1	388.869	388.869
4	Construcción de caja de inspección tipo CS-276	un	6	490.471	2.942.826
5	Cruce de calzada en tres ductos tipo DB de 4" de diámetro (3 D=4") (incluye corte y retiro de escombros)	ml	15,3	71.744	1.097.683
6	Canalización zona dura en tres ductos tipo DB de 4" de diámetro (3 D=4") (incluye corte y retiro)	ml	14,3	51.891	742.041
7	Cruce de calzada incluyendo cárcamo de protección en muro y losa según norma CS-221 en 4 ductos tipo DB de 4" de diámetro (4 D=4") (incluye corte y retiro de escombros)	ml	14,8	152.272	2.253.626
8	Canalización zona dura en 6 ductos tipo DB de 4" de diámetro (6 D=4") (incluye corte y retiro)	ml	121,59	112.715	13.705.017
9	Cruce de calzada incluyendo cárcamo de protección en muro y losa según norma CS-221 en 6 ductos tipo DB de 4" de diámetro (6 D=4") (incluye corte y retiro de escombros)	ml	26,57	173.612	4.612.871
10	Canalización en zona verde en (4) cuatro ductos tipo DB de 4"	ml	24,15	58.532	1.413.548
11	Canalización en zona verde en 2 ductos tipo DB de 3" de diámetro (2 D=3") (incluye retiro)	ml	5,8	29.476	170.961
12	Poste metálico 12m tipo vehicular doble brazo de 1.20m construido según norma CODENSA ET-204, con base metálica horizontal para atornillar o camarilla de anclaje embebida en concreto incluyendo anclajes y suplementos	un	3	875.079	2.625.237

Figura 5-41. Acta de terminación de un contrato típico de construcción de puentes (Acta No. 19 de terminación de contrato de obra, Contrato IDU-368-2001)

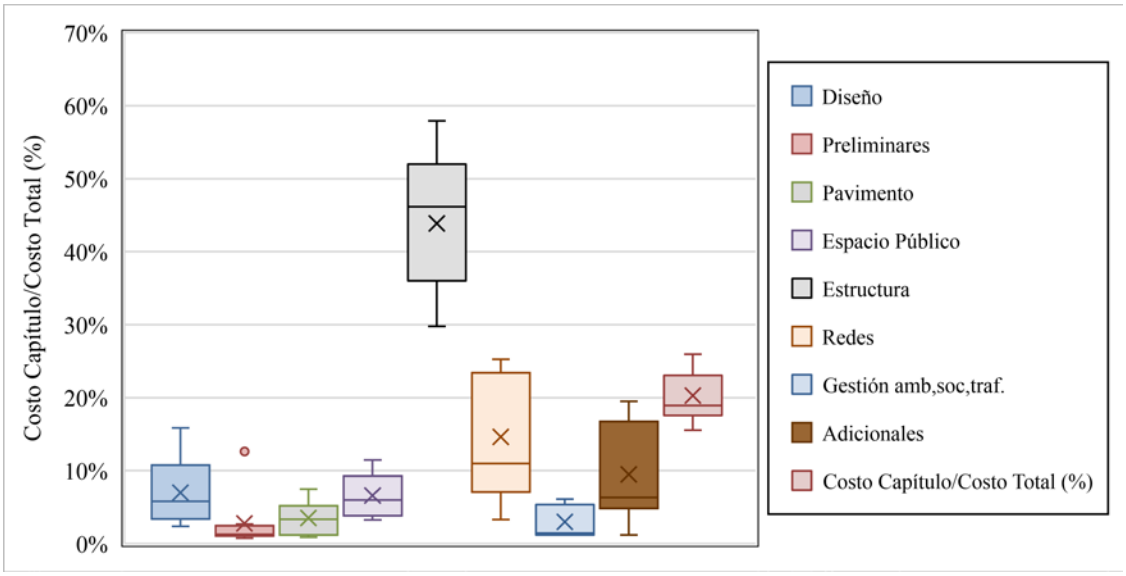


Figura 5-42. Peso de los capítulos del contrato con respecto al costo total para proyectos de construcción de puentes vehiculares

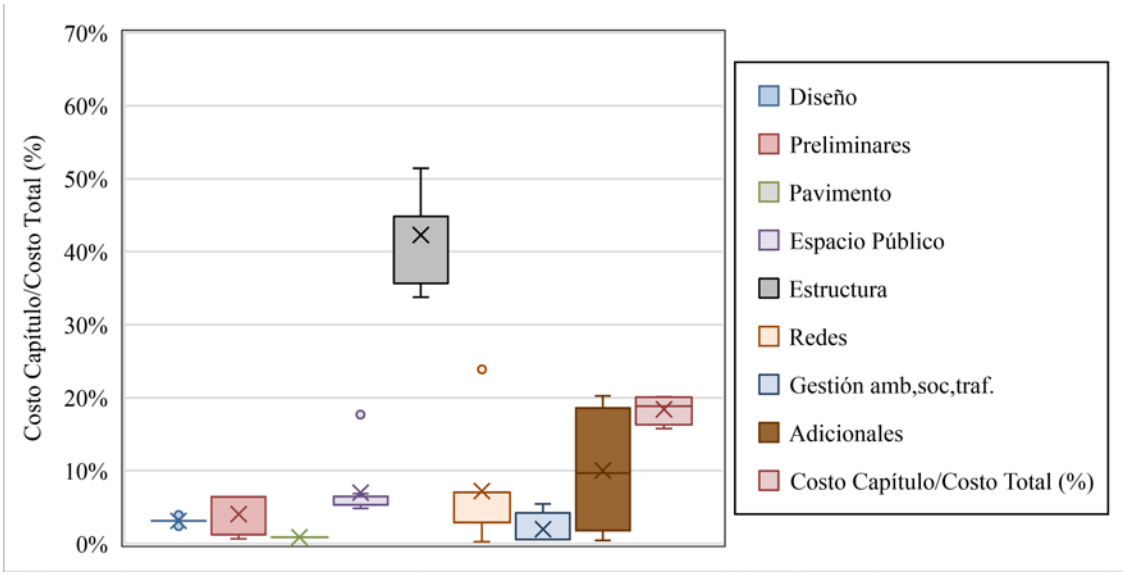


Figura 5-43. Peso de los capítulos del contrato con respecto al costo total para proyectos de construcción de puentes peatonales

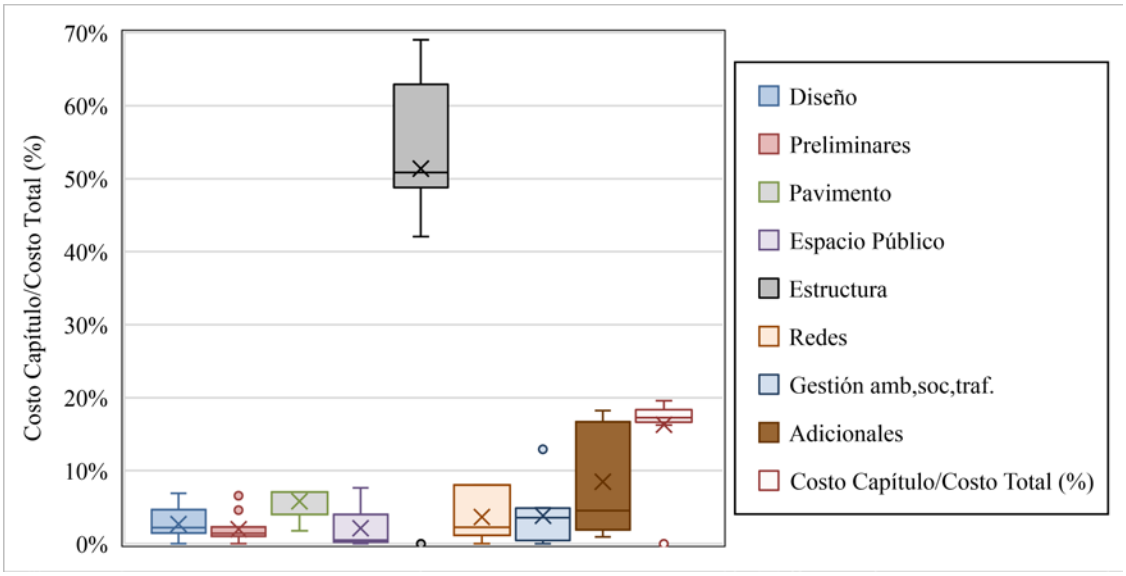


Figura 5-44. Peso de los capítulos del contrato con respecto al costo total para proyectos de construcción de puentes tipo Transmilenio para Bogotá

5.3.7 Variación del valor estimado mediante presupuesto de acuerdo con estadísticos

Adicionalmente, con la información recopilada se realizó la comparación con el costo inicial del contrato y el costo final del acta de terminación, en veras de identificar la distribución del factor por sobrecostos en los contratos de construcción de puentes en la ciudad. Estos sobrecostos se pueden dar por una amplia lista de naturalezas que incluyen suspensiones, retrasos y cantidades no consideradas.

A partir de esta relación, es posible definir con respecto a una confiabilidad específica la probabilidad que los resultados obtenidos excedan o estén por debajo del valor estimado. La Figura 5-45 presenta la distribución de valores de la relación costo final real entre costo contrato inicialmente.

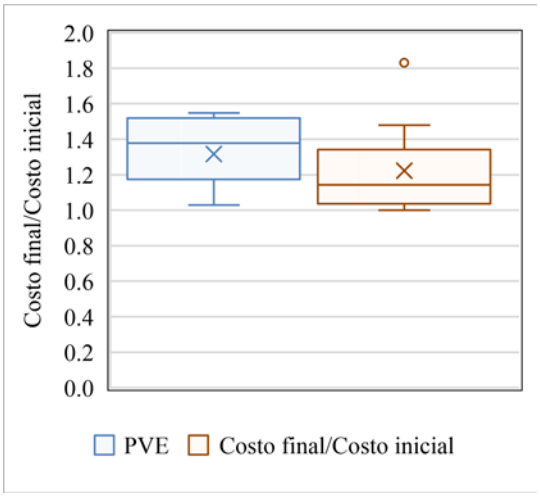


Figura 5-45. Relación entre costo inicial y costo final de contratos de construcción de puentes en Bogotá

5.3.8 Validación del modelo de valoración económica

La validación del modelo de valoración económica se realizó mediante la aplicación del algoritmo descrito en la Figura 5-5 a cuatro puentes de la referencia CRM para los cuales se cuenta con planos estructurales y con la información del valor de construcción a partir de contratos. La Tabla 5-6 presenta los puentes usados para la validación del modelo de costos, las dimensiones y características requeridas por el modelo, el valor estimado (*VE*) mediante el algoritmo y el valor real del contrato convertido a valor presente mediante el Índice de Costos de Construcción Pesada-ICCP (*VF*). Adicionalmente, se presenta la relación *VF*/*VE* de manera ilustrativa para determinar el porcentaje de variación que presenta el modelo propuesto.

La Figura 5-46 presenta gráficamente la relación VF/VE donde se observa que los valores son cercanos a la unidad. Esto indica que la metodología propuesta presenta valores confiables para el análisis del riesgo. Las diferencias que se presentan se deben a las incertidumbres en los valores índice propuestos para las cantidades estructurales, los APUs definidos y el factor de variación precio final/precio acta inicial definido en el numeral 5.3.7.

Tabla 5-6. Validación del algoritmo de valoración económica de puentes

PKID	22151521	22153152	22154319	22149629	Ejemplo CD1
Nombre del puente	Avenida Chile por Avenida Boyacá	Avenida España por Avenida Paseo de los Libertadores (costado sur)	Avenida Ciudad de Cali por Avenida Jorge Eliecer Gaitán (costado oriental)	Avenida la Sirena por Avenida Paseo de los Libertadores	Calle 183 con Autopista Norte (Costado sur)
Longitud total del puente (m)	204	158	140.6	141	290.12
Luces $\{L_1,L_2,\ldots,L_n\}$(m)	{24, 24, 24, 30, 30, 24, 24, 24}	{29.25, 31.83, 32.8, 29.83, 31.25}	{17.7, 25.85, 25.85, 25.85, 25.85, 18.90}	-	-
Ancho total (m)	22.60	18.70	15.56	15	14.2
Gálibo (m)	3.25	5.12	5	-	5.5
Tipo superestructura	Cajón – Concreto	Viga placa – Concreto	Cajón – Concreto	Cajón – Concreto	Cajón – Concreto
Tipo subestructura	Pórtico	Pórtico	Pórtico	Pórtico	Pórtico
Tipo cimentación	Pilotes	Pilotes	Pilotes	Pilotes	Pilotes
Estimación del costo de estructura de acuerdo con valores índices propuestos (COP)	$9.448.481.078	$6.875.706.283	$4.710.776.209	$4.124.941.900	$5.999.130.294
Estimación del total del costo de construcción del puente (COP) *VE*	$21.473.820.632	$15.626.605.189	$10.706.309.565	$9.374.867.955	$16.361.264.438

Tabla 5-6. Validación del algoritmo de valoración económica de puentes

PKID	22151521	22153152	22154319	22149629	Ejemplo CD1
Costo inicial del puente de acuerdo el contrato (COP_{2018}) *VF*	$20.262.472.807	$13.840.096.578	$10.370.557.005	$9.047.269.274	$18.4205.000.000
Variación posible del valor de acuerdo con estadísticos [COP-COP]	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
Costo real del puente de acuerdo con acta de terminación del contrato (COP_{2018})	$24.260.926.914	$13.962.876.124	$10.996.800.289	$14.003.650.846	-
Relación *VF/VE*	1.20	1.01	1.06	1.04	0.89

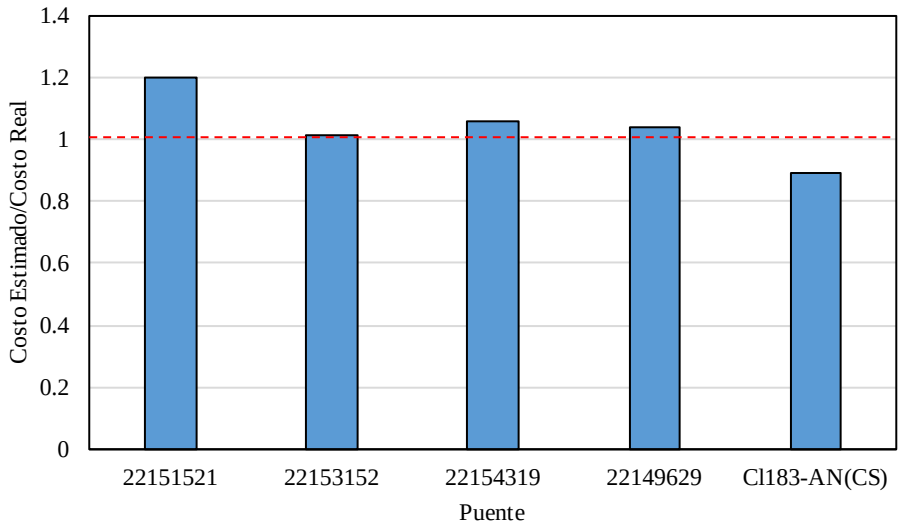


Figura 5-46. Relación costo estimado-costo real para puentes con información disponible de planos y contratos

Adicionalmente, se realizó la validación del modelo de valoración económica utilizando 18 puentes para los cuales se cuenta con la información del costo total real. La Figura 5-47 presenta gráficamente la relación VF/VE donde se encuentra que el modelo es conservador en la mayoría de los casos y que el valor modelado es muy cercano al valor verdadero. Las diferencias se deben a las limitaciones y al nivel de incertidumbre mencionada anteriormente sumado a la incertidumbre asociada las fuentes de donde se obtienen los parámetros base de cálculo de estos.

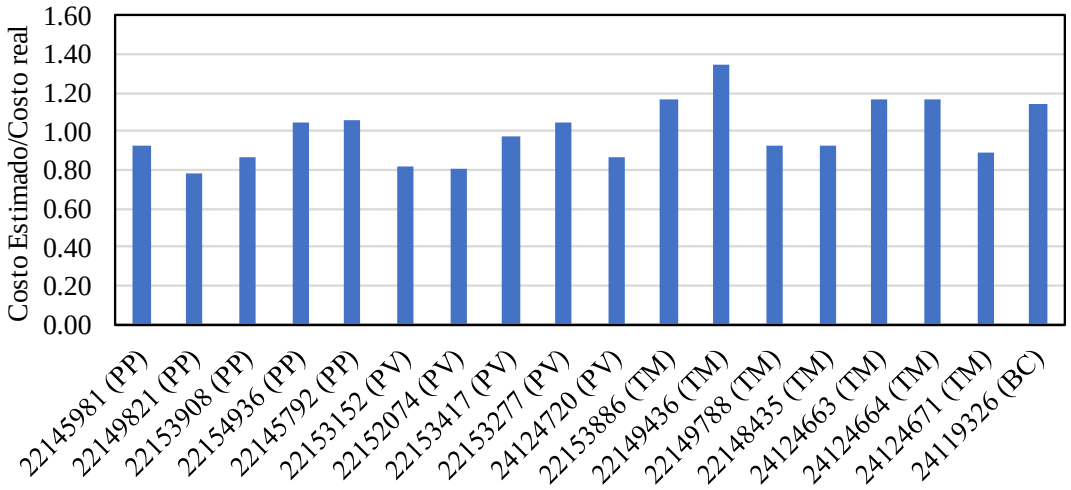


Figura 5-47. Relación costo estimado-costo real para puentes con información disponible de contratos

5.4 SOFTWARE PARA LA VALORACIÓN ECONÓMICA

5.4.1 Descripción general

Con los resultados obtenidos y explicados en el desarrollo del capítulo, se desarrolló un código simple basado en hojas de cálculo, para efectos de contar con un sistema automático para la valoración económica simplificada de los costos de construcción de los puentes en Bogotá. El software corresponde a VEPB V1.0 (Valoración Económica de Puentes de Bogotá) y está basado en el algoritmo que se presenta en la Figura 5-5.

Los datos de entrada al software para la valoración económica de puentes son los siguientes:

- Uso del puente (vehicular o peatonal)
- Definir si el puente es un box-culvert, puente de una luz o si es un paso a nivel.
- Longitud total del puente.
- Ancho total.
- Número de luces y longitud de cada luz.
- Galibo mínimo.
- Material predominante.
- Tipo de subestructura (pórtico, péndulo, pantalla).
- Tipo de superestructura (cajón, “I”, vigas rectangulares).
- Material predominante en superestructura.
- Ubicación del puente planteado.
- Datos adicionales como: espesor de rodadura, número de separadores y número total de barandas.

El sistema de cálculo desarrollado utiliza los resultados de funciones estimadoras de cantidades índices obtenidas en el presente informe como base para la valoración económica de puentes; adicionalmente, se

utiliza la información de contratos y APUs disponibles en el IDU. Todos estos tres insumos son susceptibles de modificaciones y actualizaciones a medida que se realicen más proyectos relacionados con la construcción de puentes, por lo tanto, se establece que sistema tengan como entrada las rutas de tres archivos:

1. Archivos de proxy de cantidades: Este archivo es una hoja de cálculo donde se ingresan las cantidades de obra utilizadas en nuevos proyectos de construcción de puentes. Se debe diligenciar un archivo para cada puente nuevo y debe estar dentro de la ruta especificada. El archivo está subdividido por componentes: superestructura, viga cabezal, estribos, columnas/pórticos/pantallas, pilotes, dados y zapatas, rampas, entre otros.
2. Archivos de contratos: a esta hoja de cálculo se debe ingresar la información de costos de cada capítulo de nuevos proyectos de construcción, el costo inicial estimado y el costo final del proyecto (en caso de ya haber terminado).
3. Archivos APU: este es el archivo de costos unitarios definido por el IDU. El sistema permite que este archivo sea actualizado debido a la necesidad constante de actualización de valores unitarios.

A partir de las opciones seleccionadas, el software procederá a realizar la estimación del rango de costos estimados para el puente bajo análisis. Los costos se estimarán como resultado de las cantidades obtenidas de superestructura, subestructura y cimentación por cada luz definitiva del puente y la aplicación de la metodología de valoración económica planteada. Además del valor esperado para la construcción del puente, el software permitirá al usuario conocer la variación del valor esperado del puente. La Figura 5-48 presenta la interfaz del software desarrollada. Adicionalmente, el anexo digital “Manual VEPB” incluye un manual detallado para el manejo de archivos base y del software desarrollado (ver Anexo A-7).

Figura 5-48. Interfaz del software para la valoración económica aproximada de puentes

5.4.2 Limitaciones básicas del software

1. El software de valoración económica tiene las mismas limitaciones que se indican en el numeral 5.1.

2. Las regresiones estadísticas de los índices de cantidades del software están limitadas para los rangos de las variables independientes registrados dentro de la muestra estadística levantada. Siendo las variables independientes la característica geométrica del puente con la que se relacionó el índice de cantidades correspondiente.

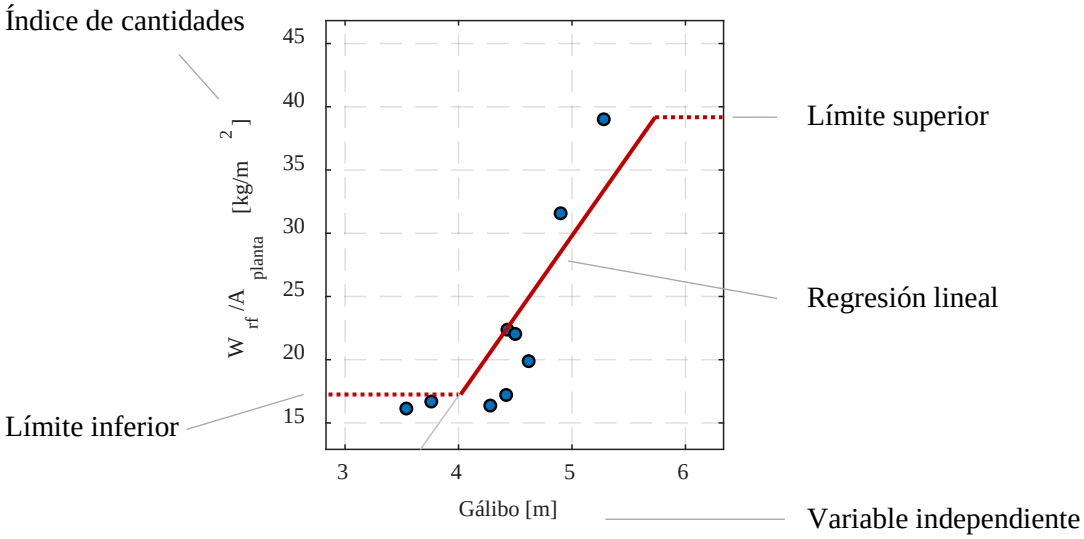


Figura 5-49. Esquema básico de regresiones de índices de cantidades de puentes.

Esto quiere decir, que para valores de la variable independiente fuera del rango obtenido se utilizará el índice límite inferior o superior según sea el caso. Es fundamental resaltar que estos índices posteriormente se multiplican por las dimensiones particulares del puente para obtener las cantidades totales. Consecuentemente, dos puentes distintos que se salgan del rango de las funciones por el mismo extremo tendrán el mismo índice, pero cantidades totales distintas.

Los rangos principales susceptibles a valores atípicos ingresados por el usuario son: la longitud de las luces para las cantidades de superestructura, el ancho del puente y el gálibo requerido del puente. Para ambos casos, si la hoja encuentra un valor atípico dará aviso al usuario antes de continuar.

Los rangos de las variables son:

- Luz: 5 a 45 m
- Gálibo: 2 a 7 m
- Ancho: 2 a 35 m

5.5 VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS PUENTES

5.5.1 Valoración económica de la base de datos de puentes de Bogotá

Con base en la metodología explicada anteriormente, se llevó a cabo la estimación de los valores de reposición de los puentes contenidos en la base de datos. La valoración económica se restringe a los puentes vehiculares y peatonales de las tipologías constructivas más representativas, omitiendo los casos particulares (puentes especiales); la valoración económica de los puentes especiales se realizará de forma individual usando los planos disponibles o los contratos específicos disponibles en el IDU. En las evaluaciones que se presentan enseguida se han discriminado los valores según la red vial y según la tipología estructural de cada puente. La descripción detallada de la distribución de puentes en la malla vial y la descripción detallada de las tipologías estructurales principales se presentan en el numeral 7.2.4.

La Figura 5-50 presenta el total de costos de reposición obtenidos para los 1006 puentes (vehiculares y peatonales) contenidos en la base de datos, procesados con respecto a su ubicación en la malla vial de la ciudad. En la gráfica se observa que un 85% del valor total expuesto está concentrado en la malla vial arterial, lo cual demuestra la importancia de estos puentes para la funcionalidad de la ciudad.

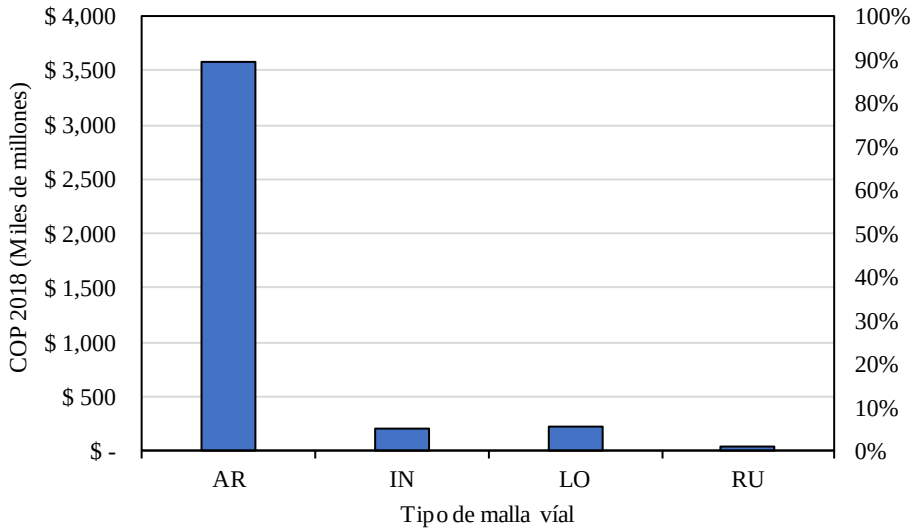


Figura 5-50. Costo total del portafolio según ubicación en la malla vial

La Figura 5-51 presenta el total de costos de reposición obtenidos para la totalidad de los puentes (vehiculares y peatonales) agrupados con respecto a su tipología estructural. En esta figura se puede observar que los puentes de tipo VNI_3, VBC_1 y PPB_1 controlan principalmente el valor expuesto pues suman aproximadamente el 50% del valor total expuesto, lo cual puede impactar de manera importante los resultados del análisis del riesgo en términos de pérdidas económicas esperadas. Estas tipologías son, en orden, las siguientes: puente vehicular no monolítico isostático de subestructura tipo pórtico, puentes vehiculares tipo box-culvert y puentes peatonales prototipo Bogotá (Transmilenio). La explicación detalla de las tipologías y sus características se presentan en el numeral 6.2.2.

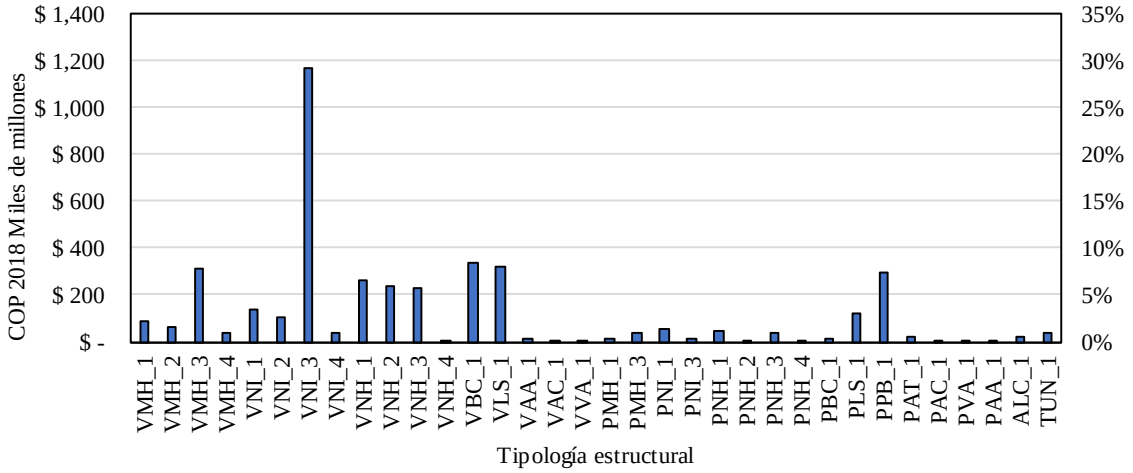


Figura 5-51. Costo total del portafolio según tipología constructiva

En resumen, la Tabla 5-7 presenta el valor expuesto total del portafolio de puentes de Bogotá. La tabla presenta el costo distribuido según el tipo de puente y según el tipo de malla vial al que pertenecen. Estos valores obtenidos mediante el modelo aquí propuesto se utilizan como el valor de reposición de puentes en evaluaciones posteriores del riesgo sísmico.

Tabla 5-7. Valor total del portafolio de la infraestructura de puentes de Bogotá

Tipo de malla vial	Tipo de puente	
	Vehicular (COP$ Mil Millones)	Peatonal (COP$ Mil Millones)
Arterial	$ 3,059	$ 526
Intermedia	$ 174	$ 35
Local	$ 116	$ 115
Rural	$ 38	$ 4
Total según tipo	$ 3,388	$ 679
Portafolio (COP$ Mil Millones)	$ 4,067	

Cabe aclarar que, de acuerdo a lo presentado posteriormente en el Capítulo 6, la definición y asignación de tipologías estructurales a todos los puentes del inventario, existen tres tipologías particulares (túneles, alcantarillas y puentes vernaculares/artesanales) que no son considerados en los posteriores análisis de riesgo debido a que no son estructuras que puedan clasificarse como puentes, por lo que no se encuentran dentro del alcance del presente proyecto. Al realizar la exclusión de las estructuras tipo túnel, alcantarilla, o puentes vernaculares/artesanales, se obtiene una valoración del portafolio definitivo, la cual se resume en el Capítulo 7.

Adicionalmente, se calcularon los valores de precio final por metro cuadrado en planta para cada uno de los puentes para cada una de las diferentes tipologías a modo de tener un estimado grueso de referencia, tal como el ejemplo mostrado en la Figura 5-1 para el caso de CALTRANS. La Figura 5-52 presenta la distribución de los índices de costo por m^2 para los resultados obtenidos.

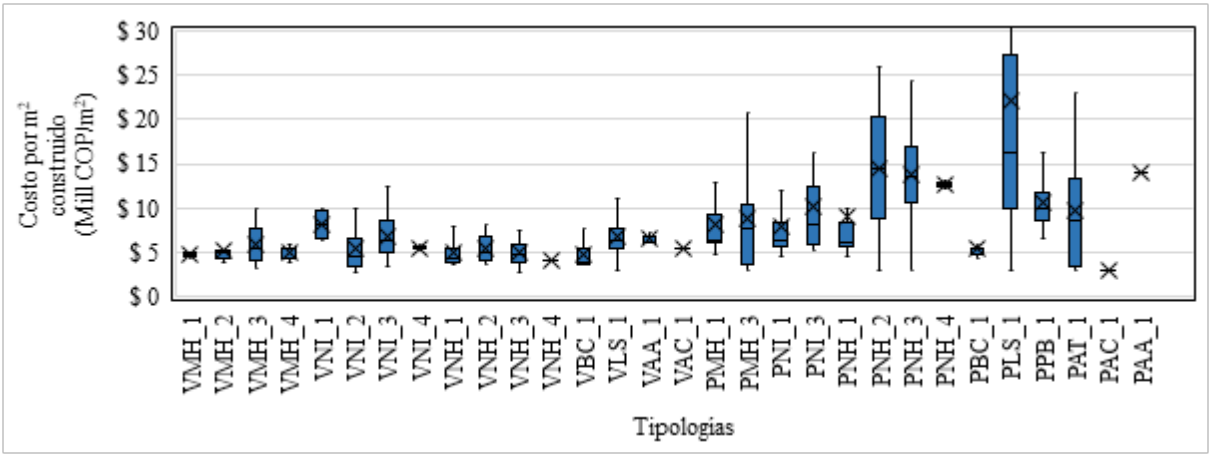


Figura 5-52. Distribución de los índices de costo por m2 para cada tipología de puente

5.5.2 Verificación del valor de reposición versus la valoración económica mediante el modelo propuesto

Debe destacarse que la valoración económica de puentes tiene dos propósitos:

1. La valoración del costo de construcción de proyectos nuevos de construcción donde se incluyan todos los capítulos que pertenecen típicamente a estos tipos de contratos, y
2. La valoración del costo de reposición de los puentes para los casos en que por eventos sísmicos estos presenten colapso total o necesidad de reemplazo por alto estado de daño en todos sus componentes.

El primero ya fue explicado con detalle mediante los numerales anteriores de este capítulo. Para el cálculo del segundo, los valores de reponer el puente tras pérdidas absolutas durante un evento sísmico deben considerar adicionalmente: demoliciones, retiro de escombros, costos de diagnóstico, evaluación y calificación del daño. Estos valores deben ser sumados al costo de construcción a nuevo, el cual puede en estos casos no incluir algunos capítulos como los relacionados con la construcción de espacios públicos y gestión ambiental, gestión social y diseño y gestión de tráfico. Tras realizar el estimado de los costos adicionales a incluir y quitar aquellos considerados no necesarios en la reposición de un puente, se obtuvo que lo valores de reposición y construcción son muy cercanos entre sí. Un desglose de estos resultados permite observar que los valores directos de costos de obra sobre el capítulo “estructurales” es más alto para el caso de reposición (ver Figura 5-53); sin embargo, la relación entre los resultados de costo total, es decir que incluyen los demás capítulos, permite ver que en algunos casos es mayor el valor de construcción nueva. En la Figura 5-53 es claro que la relación es muy cercana a uno para el caso de costos totales, por lo tanto es correcto afirmar que estos dos valores (valor de construcción y valor de reposición) son esencialmente iguales, y por lo tanto el valor de construcción se toma como el valor expuesto del puente.

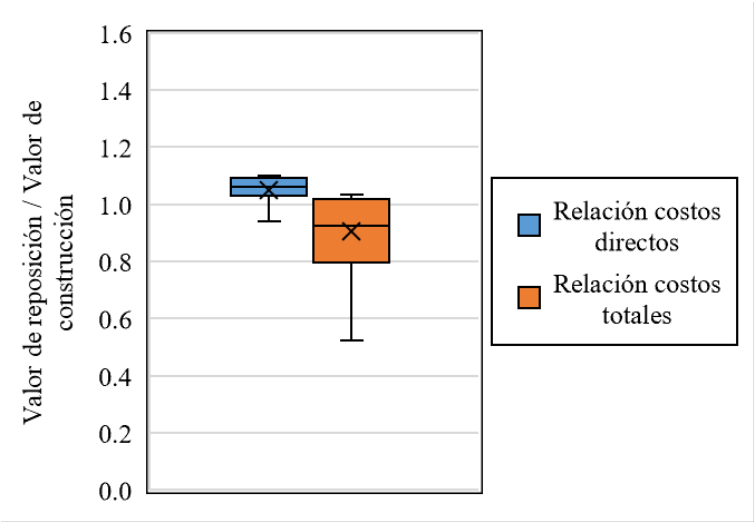


Figura 5-53. Relación entre el valor de reposición y el valor de construcción para los capítulos de costos directos y costos totales

5.6 COSTOS DE REPARACIÓN Y FUNCIONES DE FRAGILIDAD

5.6.1 Generalidades

Las pérdidas económicas tras la ocurrencia de un sismo se calculan a partir de la cuantificación de los costos de reparación y/o demolición y reemplazo de los puentes afectados en cada evento en particular. Para construir un modelo que permita estimar estos costos, se hace necesaria la estimación de las funciones de costos de reparación, las cuales están relacionadas con el estado de daño esperado de cada componente expuesto. Se debe entonces definir un número de estados de daño según el mecanismo de colapso de cada componente (frágil o dúctil) dado que el valor de reparación no puede ser calculado como una función continua. La información resultante de este análisis se integra en las funciones de fragilidad de cada componente tal como se explica a continuación.

A continuación, se presenta el modelo de valoración económica de la reparación de puentes considerando diferentes estados de daño en componentes individuales del puente, según las afectaciones típicas observadas en puentes de diferentes tipologías luego de la ocurrencia de sismos intensos.

5.6.2 Información disponible y estados de daño

En su gran mayoría, todos los modelos de reparación se obtienen a partir de las cantidades asociadas a las actividades de reparación recomendadas para cada uno de los posibles estados de daño de los elementos definidos junto con sus respectivos costos unitarios (Mackie K. R., 2008), (Mackie K. , 2008), (J. Ghosh, 2011). Para cada una de las actividades se encuentra su equivalente en la base de datos de precios de referencia del IDU (para el caso particular de Bogotá) y con esto se arman los esquemas de reparación de cada componente con costos y técnicas constructivas locales.

Los estados de daño y la probabilidad de que cada uno de estos ocurra para un cierto parámetro de demanda sísmica se definen a partir observaciones de ensayos experimentales y eventos históricos. Los diferentes componentes identificados como susceptibles a daño dentro de un puente son:

- Columnas
- Muros
- Estribos
- Neoprenos
- Llaves de cortante

En el numeral 6.9 se presentan detalles adicionales de los componentes susceptibles a daño para cada una de las tipologías representativas de Bogotá. Por otro lado, el número de estados de daño depende principalmente de las actividades de reparación requeridas, considerando entonces la posibilidad de tener componentes frágiles con un único estado de daño o componentes dúctiles con diversos estados de daño. Sin embargo, es común encontrar componentes que presentan estados de daño progresivos y que comúnmente se presentan como: leve (DS1), moderado (DS2), extensivo (DS3) y completo (DS4). En la Tabla 5-8 a Tabla 5-11 se presentan los componentes seleccionados como susceptibles a daño, los estados de daño de cada una y la descripción definida en el presente proyecto. Adicionalmente se presentan imágenes tomadas de literatura internacional las cuales son representativas del daño descrito. En la Tabla 5-12 se presentan las referencias a partir de las cuales se obtuvo información detallada para la definición de los estados de daño para cada componente.

(Espacio en blanco intencional)

Tabla 5-8. Descripción de estados de daño de columnas

Componente	Estado de daño	Descripción	Foto
Columna	DS1	Fisuras pequeñas y desprendimiento de concreto en la columna	(Williamson, Bayrak, Davis, & Williams, 2011)
	DS2	La columna presenta fisuras moderadas y desprendimiento de concreto	(Moehle & Eberhard, 2000)
	DS3	La columna se degrada sin colapsar, falla de cortante (columna estructuralmente insegura)	(Moehle & Eberhard, 2000)
	DS4	Colapso de columna	(Moehle & Eberhard, 2000)

Tabla 5-9. Descripción de estados de daño de neoprenos

Componente	Estado de daño	Descripción	Foto
Neoprenos	DS1	El grado de deformación puede ser notable, sin embargo, no genera daño a la vía	(Caterino, Maddaloni, & Occhiuzzi, 2014)
	DS2	Puede requerir que el tablero sea realineado y también implicaría posibles fracturas	(Bruneau, Anagnostopoulou, & Palermo, 2010)
	DS3	Fractura en la superestructura, requiere un determinado grado de reparación y realineación	(Moehle & Eberhard, 2000)
	DS4	Caída del tablero	(Federal Highway Administration, 2011)

Tabla 5-10. Descripción de estados de daño de estribos

Componente	Estado de daño	Descripción	Foto
Estribos	DS1	Fisuras pequeñas y desprendimiento de concreto en los estribos	(Moehle & Eberhard, 2000)
	DS2	Movimiento moderado de los estribos	(Bruneau, Anagnostopoulou, & Palermo, 2010)
	DS3	Desfase vertical de los estribos	(Federal Highway Administration, 2011)

Tabla 5-11. Descripción de estados de daño de llaves de cortante

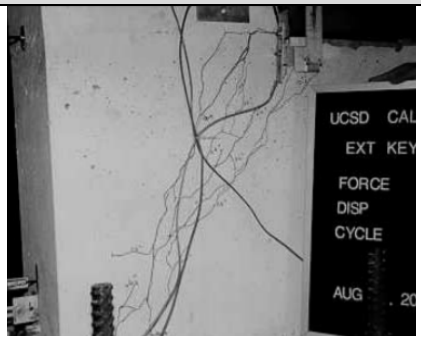
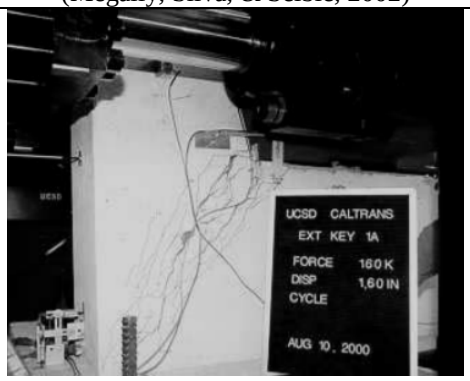
Componente	Estado de daño	Descripción	Foto
Llaves de cortante	DS1	Fisuras que ocurren en la pared del estribo	 (Megally, Silva, & Seible, 2002)
	DS2	Fisuras diagonales en el estribo reflejando la formación de puntales compresivos en el punto de aplicación de la carga y desprendimiento de concreto	 (Megally, Silva, & Seible, 2002)
	DS3	Las fisuras diagonales en los estribos incrementan su ancho y se evidencian desplazamientos de las llaves de cortante	(Megally, Silva, & Seible, 2002)
	DS4	Se presenta degradación de la llave de cortante por la exposición de refuerzo que se genera por el incremento del daño	(Megally, Silva, & Seible, 2002)

Tabla 5-12. Referencias internacionales de artículos académicos sobre estados de daño para diferentes tipos de componentes

Componente	Artículo Académico	Autor (Año)
Columnas	Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones	Nielson, B. (2005)
	Fragility Analysis of Skewed Single-Frame Concrete Box-Girder Bridges	Padgett, J., et al. (2013)
	Probabilistic seismic loss assessment of aging bridges using a component - level cost estimation approach	Ghosh, J. & Padgett, J (2011)
	Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced Concrete Bridges	Mackie, K. et al. (2008)
	Comparison of Post-Earthquake Highway Bridge Repair Costs	Mackie, K. et al. (2007)
Estribos	Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones	Nielson, B. (2005)
	Probabilistic seismic loss assessment of aging bridges using a component - level cost estimation approach	Ghosh, J. & Padgett, J (2011)
	Comparison of Post-Earthquake Highway Bridge Repair Costs	Mackie, K. et al. (2007)
Neoprenos	Fragility Analysis of Skewed Single-Frame Concrete Box-Girder Bridges	Padgett, J., et al. (2013)
	Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones	Nielson, B. (2005)
	Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced Concrete Bridges	Mackie, K. et al. (2008)
	Comparison of Post-Earthquake Highway Bridge Repair Costs	Mackie, K. et al. (2007)
Sillas de estribos	Fragility Analysis of Skewed Single-Frame Concrete Box-Girder Bridges	Padgett, J., et al. (2013)
Juntas	Probabilistic seismic loss assessment of aging bridges using a component - level cost estimation approach	Ghosh, J. & Padgett, J (2011)
	Comparison of Post-Earthquake Highway Bridge Repair Costs	Mackie, K. et al. (2007)
Llaves de cortante	Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced Concrete Bridges	Mackie, K. et al. (2008)
	Comparison of Post-Earthquake Highway Bridge Repair Costs	Mackie, K. et al. (2007)

5.6.3 Tipos de reparación por componente según el estado de daño

La evaluación de los costos de reparación se realiza para cada uno de los estados de daño descritos en el numeral anterior. Para esto, es necesario definir el proceso de reparación para cada estado de daño. Con base en la revisión bibliográfica y recopilación de datos de proyectos de reparación ejecutados por el IDU, se identificaron actividades de reparación detalladas, las cuales aplicarían para reparar los posibles daños presentados por los componentes de este tipo de infraestructura.

Dentro de la información recopilada, se encuentra en la referencia de Ghosh, J. (2011), la variación de actividades de reparación para cada uno de los estados de daño de determinados componentes. De la Figura 5-54 a la Figura 5-56 se resumen las diferentes técnicas de reparación utilizados en diferentes partes del mundo. A partir de esta información, se seleccionan las actividades predominantes para la generación del modelo de costos de reparación.

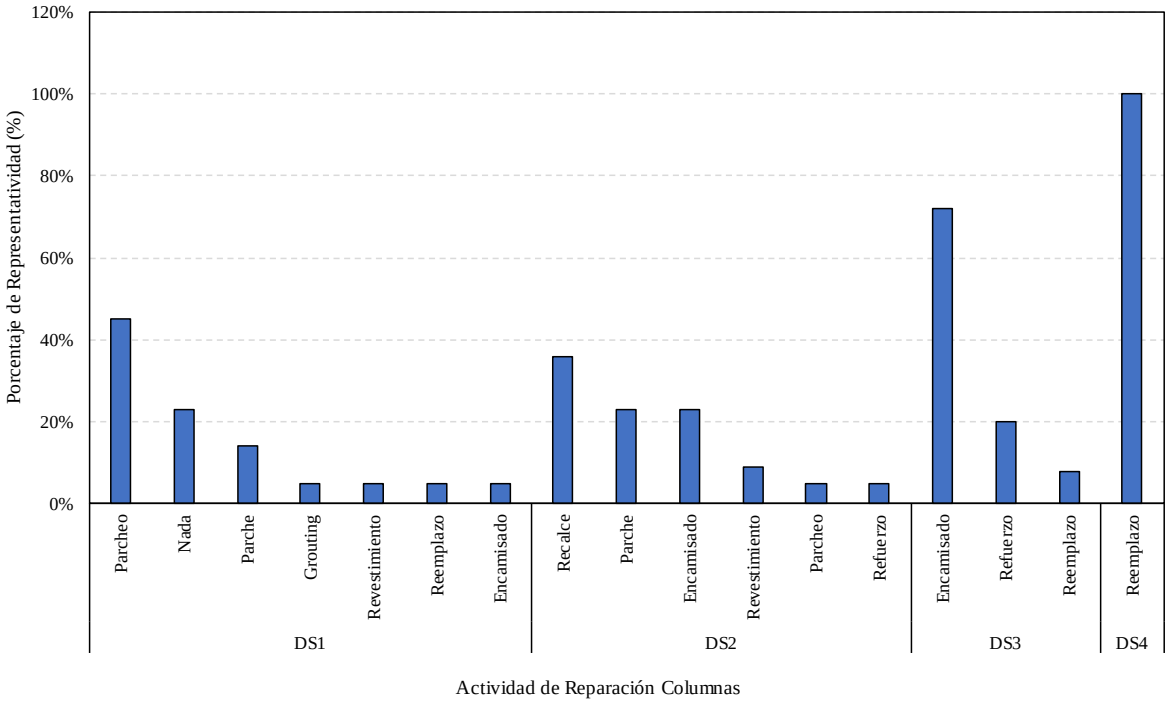


Figura 5-54. Esquemas de reparación encontrados para columnas por estados de daño

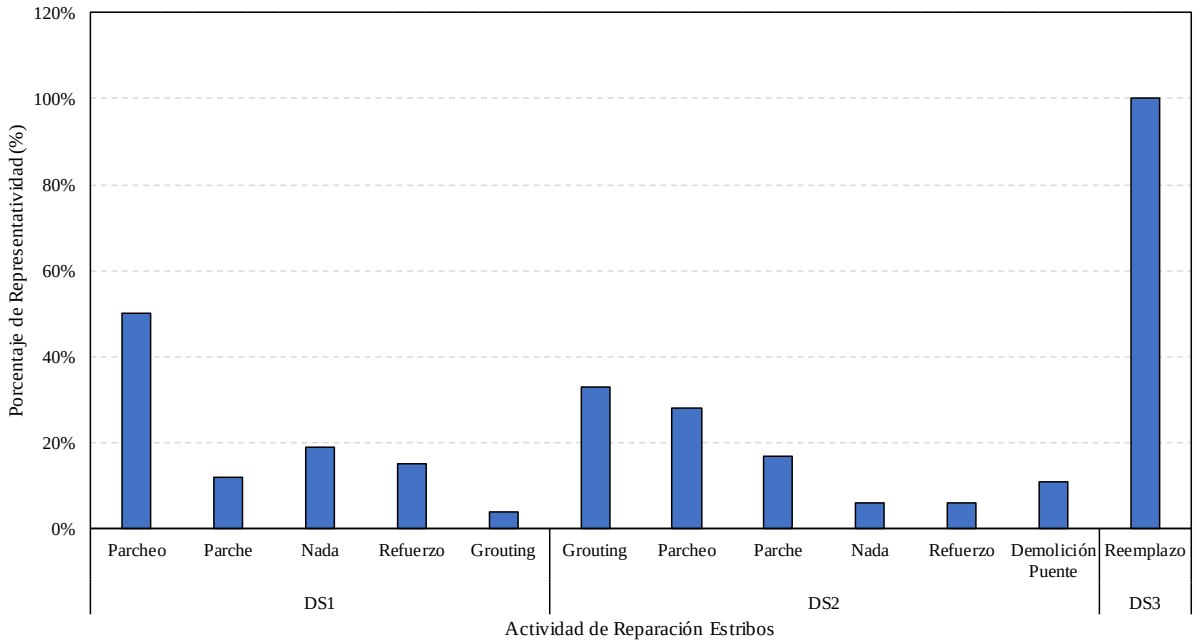


Figura 5-55. Esquemas de reparación encontrados para estribos por estados de daño

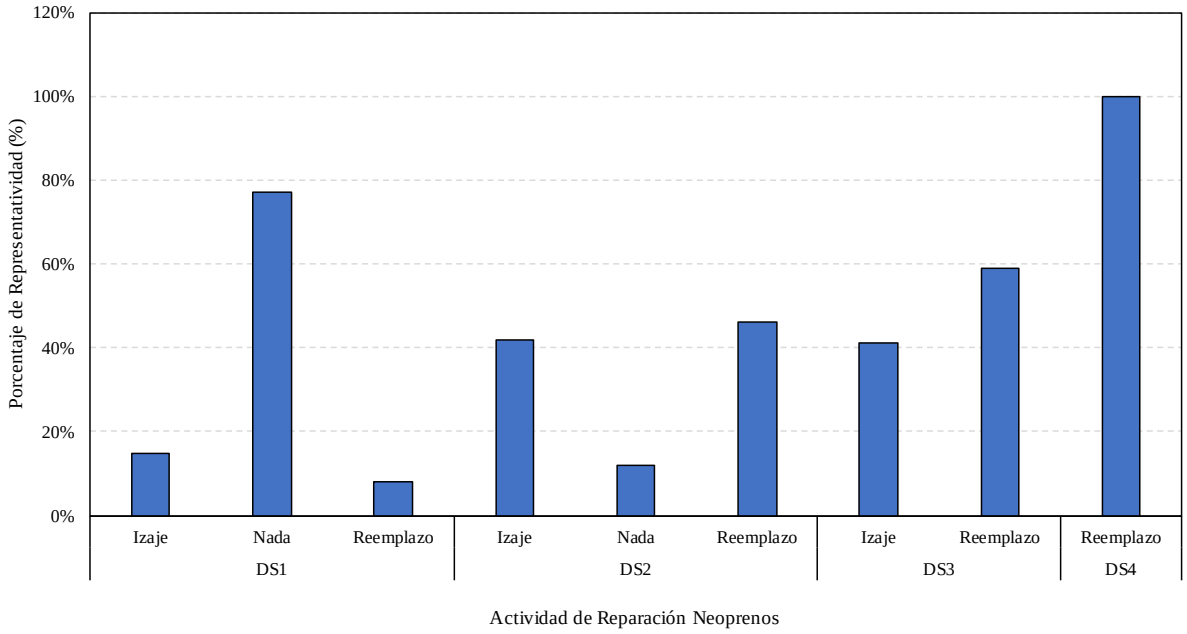


Figura 5-56. Esquemas de reparación encontrados para neoprenos por estados de daño

5.6.4 Formatos de costos de reparación

A partir de las técnicas de reparación más representativas y que se ajustan a las prácticas locales, se realiza la selección de los esquemas de reparación que se presentan de la Figura 5-58 a la Figura 5-74 acompañados de la función de fragilidad que los caracteriza. Estos se presentan para cada componente y según el estado de daño bajo análisis se especifican las actividades de reparación, las cantidades de obra y la relación de la actividad seleccionado con un código de APU desarrollado por el IDU. A partir de los precios unitarios de la base de datos de costos del IDU se calculan los costos de reparación, los cuales posteriormente son normalizados con respecto a una característica geométrica característica del componente; por ejemplo, la altura del componente, para el caso de los neoprenos, o el volumen de concreto para los demás componentes. Lo anterior con el fin de que dentro de la cuantificación de la vulnerabilidad se consideren los ajustes de los costos de reparación debidas a variaciones geométricas y de detallamiento. De esta manera, se ha desarrollado un modelo de costos de reparación dinámico que se adapta a las características de cada puente particular.

Se debe tener en cuenta que el valor indicado en el campo “Total de reparación” es, como se indicó anteriormente, un valor que está normalizado por una característica del componente. Esto permite que se pueda desarrollar de manera específica un paquete de funciones de fragilidad ajustadas en su costo de reparación para cada tipología particular.

(Espacio en blanco intencional)

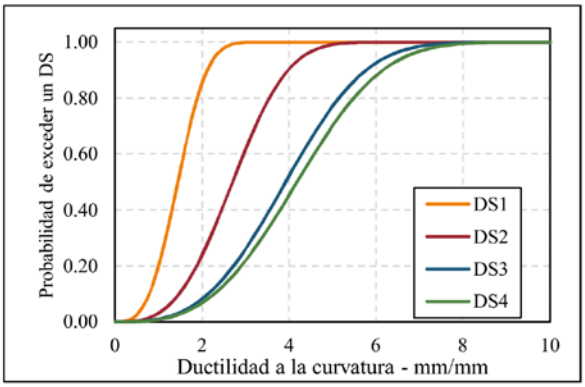
FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES

11/27/2018

Información general	
Nombre	columnas no diseñadas sísmicamente
ID	P.COL.08
Estados de daño	4

Información general de la fragilidad	
Referencia	Ramanathan et. Al (2010)

Estados de daño	μ	β
DS1	1.44	0.73
DS2	2.70	0.61
DS3	3.92	0.74
DS4	4.18	0.77



Descripción del componente			
Base - m	0.6	Área trans. - m2	1.13
Ancho - m	0.6	Área sup. - m2	18.85
Alto - m	5	Volumen - m3	5.65

Descripción de daño		
Estado de daño 1 DS1	Williamson, Bayrak, Davis, & Williams,2011	Fisuras pequeñas y desprendimiento de concreto en la columna

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA PRESIÓN 3200 PSI. INCLUYE IMPLEMENTOS DE ASEO (DETERGENTE INDUSTRIAL), AGUA,	4947	M2	19	$ 2,757.00	$ 51,968.23
SELLADO DE FISURAS ENTRE 0,1 Y 1,0 MM MEDIANTE INYECCIÓN DE RESINA EPÓXICA DE BAJA VISCOSIDAD, ALTA RESISTENCIA, INSENSIBLE A LA HUMEDAD Y ALTO MÓDULO ELÁSTICO SEGÚN NORMA ASTM C-88-1-90 TIPO IV.	6288	ML	38	$ 12,133.00	$ 457,403.32
SANEADO DE CONCRETO DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE ESCARIFICACIÓN DE CONCRETO PROFUNDIDAD ENTRE 2cm Y 7cm, LIMPIEZA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO PARA EL ACERO DE REFUERZO	5207	M2	3	$ 120,181.00	$ 339,803.77
Total reparación (COP /m^3 de volumen de columna)					**$ 150,167**

Figura 5-57. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 1

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **11/27/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 2 DS2	 Moehle & Eberhard, 2000	La columna presenta fisuras moderadas y desprendimiento de concreto

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
DEMOLICIÓN RECUBRIMIENTO COLUMNAS PARA ADICIÓN DE REFUERZO, HASTA DESCUBRIR EL REFUERZO EXISTENTE VERIFICANDO PH EN CONCRETO. Incluye todos los costos de suministro de materiales (colorante indicador de PH), equipos	6229	M2	7	$ 6,016.00	$ 39,689.62
LIMPIEZA MECÁNICA DE ACERO DE REFUERZO CON PULIDORA Y SUMINISTRO Y APLICACIÓN DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN. NIVEL DE TRABAJO +3.0m.	5208	ML	50	$ 53,552.00	$ 2,672,024.34
IMPRIMANTE Y PUENTE DE ADHERENCIA ENTRE CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO DE FRAGUADO LENTO. SUMINISTRO Y APLICACIÓN. EPÓXICO DE PEGA CONCRETO NUEVO A VIEJO QUE CUMPLA CON LA NORMA ASTM C-881 TIPO 5	5209	M2	7	$ 32,259.00	$ 212,823.74
RESTITUCIÓN RECUBRIMIENTO COLUMNAS, EN ZONAS DE ADICIÓN DE REFUERZO. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE MATERIALES (RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO SIKATOP 122 PLUS O EMACO S-88-C O	6282	M2	7	$ 52,485.00	$ 346,261.63
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA PRESIÓN 3200 PSI. INCLUYE IMPLEMENTOS DE ASEO (DETERGENTE INDUSTRIAL), AGUA,	4947	M2	19	$ 2,757.00	$ 51,968.23
Total reparación (COP /m^3 de volumen de columna)					**$ 587,594**

Figura 5-58. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 2

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **11/27/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 3 DS3	 Moehle & Eberhard, 2000	La columna se degrada sin colapsar, falla de cortante (columna estructuralmente insegura)

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
IZAJE Y MONTAJE DE VIGA EN CONCRETO L=30mt APROX INCLUYE DOS GRUAS TELESCOPICAS 50TON PERSONAL PARA IZAJE Y MONTAJE	5053	UN	1	$ 6,379,646.00	$ 6,379,646.00
DEMOLICIÓN DE CONCRETO: ESPESORES 16cm A 25cm. (Incluye retiro de material, transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado).	5197	M3	7	$ 62,512.00	$ 424,196.44
EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	3710	M3	5	$ 4,411.00	$ 19,954.89
ACERO DE REFUERZO (Incluye Suministro, Figurado y Fijación)	3708	KG	1357	$ 2,514.00	$ 3,411,920.42
CONCRETO 4000 PSI PARA MURO ESTRUCTURAL (Premezclado. Incl. Sumin, Formaleteo, bombeo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	5421	M3	7	$ 593,148.00	$ 4,025,007.50
RELLENO EN RECEBO COMUN (Suministro e instalación Extendido manual, Humedecimiento y Compactación TRANSPORTE A 28 KM).	4792	M3	5	$ 52,388.00	$ 284,397.27
Total reparación (COP /m^3 de volumen de columna)					**$ 2,572,142.39**

Figura 5-59. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 3

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **11/27/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 4 DS4	 Moehle & Eberhard, 2000	Colapso de columna

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
DEMOLICIÓN DE CONCRETO: ESPESORES 16cm A 25cm. (Incluye retiro de material, transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado).	5197	M3	7	$ 62,512.00	$ 424,196.44
EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	3710	M3	5	$ 4,411.00	$ 19,954.89
ACERO DE REFUERZO (Incluye Suministro, Figurado y Fijación)	3708	KG	1357	$ 2,514.00	$ 3,411,920.42
CONCRETO 4000 PSI PARA MURO ESTRUCTURAL (Premezclado. Incl. Sumin, Formaleteo, bombeo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	5421	M3	7	$ 593,148.00	$ 4,025,007.50
RELLENO EN RECEBO COMUN (Suministro e instalación Extendido manual, Humedecimiento y Compactación TRANSPORTE A 28 KM).	4792	M3	5	$ 52,388.00	$ 284,397.27
Total reparación (COP /m^3 de volumen de columna)					**$ 1,443,973**

Figura 5-60. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de una columna típica en el estado de daño 4

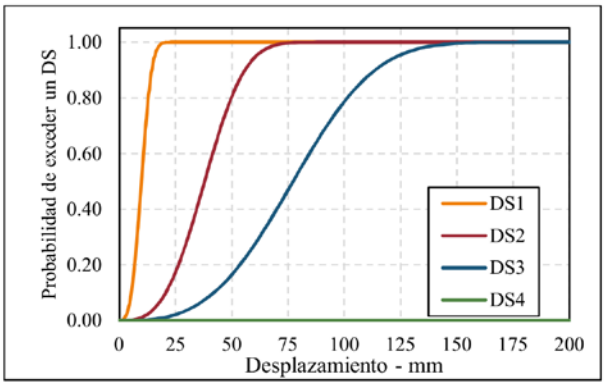
FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES

11/27/2018

Información general	
Nombre	estribo pasivo
ID	P.EST.03
Estados de daño	3

Información general de la fragilidad	
Referencia	Nielson (2005)

Estados de daño	μ	β
DS1	9.80	0.70
DS2	37.90	0.90
DS3	77.20	0.85
DS4		



Descripción del componente			
Base - m		Área sup. 2 - m2	30.86
Ancho - m		Área sup. - m2	46.90
Área sup. 1 - m2	8.0225	Volumen - m3	40.11

Descripción de daño		
Estado de daño 1 DS1	Moehle & Eberhard, 2000	Fisuras pequeñas y desprendimiento de concreto en los estribos

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA	4947	M2	47	$ 2,757.00	$ 129,305.42
SELLADO DE FISURAS ENTRE 0,1 Y 1,0 MM MEDIANTE INYECCIÓN DE RESINA EPÓXICA DE BAJA VISCOSIDAD, ALTA RESISTENCIA, INSENSIBLE	6288	ML	94	$ 12,133.00	$ 1,138,094.07
SANEADO DE CONCRETO DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE ESCARIFICACIÓN DE CONCRETO PROFUNDIDAD ENTRE 2cm Y 7cm, LIMPIEZA Y	5207	M2	7	$ 120,181.00	$ 845,487.20
RETIRO, DEMONTE DE MATERIAL DE JUNTA DE DILATACIÓN EXISTENTE Y DEMOLICIÓN DE CONCRETO ADYACENTE A LA JUNTA, ANCHO	5195	ML	5	$ 27,216.00	$ 136,080.00
JUNTA ELASTOMERICA TIPO AWGJ 70 DE 70mm DE RECORRIDO O SIMILAR. SUMINISTRO Y COLOCACIÓN. (Incluye pernos y soldadura).	5201	ML	5	$ 100,525.00	$ 502,625.00
LIMPIEZA PROFUNDA DE LA JUNTA PARA ANCHOS VARIABLES DE 5 A 30cm. (Retiro del material en la cavidad existente entre la superficie externa de la viga y el	5204	ML	5	$ 5,219.00	$ 26,095.00
Total reparación (COP /m^3 de volumen de estribo)					**$ 69,247**

Figura 5-61. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de un estribo típico en el estado de daño 1

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **11/27/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 2 DS2	 Bruneau, Anagnostopoulou, & Palermo,2010	Movimiento moderado de los estribos(< 2")

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA PRESIÓN 3200 PSI. INCLUYE IMPLEMENTOS DE ASEO (DETERGENTE INDUSTRIAL), AGUA, COMBUSTIBLE	4947	M2	47	$ 2,757.00	$ 129,305.42
SELLADO DE FISURAS ENTRE 0,1 Y 1,0 MM MEDIANTE INYECCIÓN DE RESINA EPÓXICA DE BAJA VISCOSIDAD, ALTA RESISTENCIA, INSENSIBLE A LA HUMEDAD Y ALTO MÓDULO ELÁSTICO SEGÚN NORMA ASTM C-88-1-90 TIPO IV. INCLUYE TODOS	6288	ML	94	$ 12,133.00	$ 1,138,094.07
SANEADO DE CONCRETO DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE ESCARIFICACIÓN DE CONCRETO PROFUNDIDAD ENTRE 2cm Y 7cm, LIMPIEZA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO PARA EL ACERO DE REFUERZO EXISTENTE Y	5207	M2	9	$ 120,181.00	$ 1,127,316.27
RETIRO, DEMONTE DE MATERIAL DE JUNTA DE DILATACIÓN EXISTENTE Y DEMOLICIÓN DE CONCRETO ADYACENTE A LA JUNTA, ANCHO VARIABLE DE 80 A 90cm. (Incluye cargue, transporte y retiro de escombros).	5195	ML	5	$ 27,216.00	$ 136,080.00
LIMPIEZA PROFUNDA DE LA JUNTA PARA ANCHOS VARIABLES DE 5 A 30cm. (Retiro del material en la cavidad existente entre la superficie externa de la viga y el espaldar del estribo mediante el uso de hidrolavado y taladro luego del vaciado de escombros).	5204	ML	5	$ 5,219.00	$ 26,095.00
JUNTA ELASTOMERICA TIPO AWGJ 70 DE 70mm DE RECORRIDO O SIMILAR. SUMINISTRO Y COLOCACIÓN. (Incluye pernos y soldadura).	5201	ML	5	$ 100,525.00	$ 502,625.00
Total reparación (COP /m^3 de volumen de estribo)					**$ 76,273**

Figura 5-62. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de un estribo típico en el estado de daño 2

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES 11/27/2018	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 3 DS3	 Federal Highway Administration, 2011	Desfase vertical de los estribos

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA PRESIÓN 3200 PSI. INCLUYE IMPLEMENTOS DE ASEO (DETERGENTE INDUSTRIAL), AGUA, COMBUSTIBLE	4947	M2	47	$ 2,757.00	$ 129,305.42
CONCRETO 4000 PSI PARA MURO ESTRUCTURAL (Premezclado. Incl. Sumin, Formaleteo, bombeo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado).	5421	M3	40	$ 593,148.00	$ 23,792,649.15
ACERO DE REFUERZO (Incluye Suministro, Figurado y Fijación)	3708	KG	7220	$ 2,514.00	$ 18,151,708.50
RETIRO, DEMONTE DE MATERIAL DE JUNTA DE DILATACIÓN EXISTENTE Y DEMOLICIÓN DE CONCRETO ADYACENTE A LA JUNTA, ANCHO VARIABLE DE 80 A 90cm. (Incluye cargue, transporte y retiro de escombros).	5195	ML	5	$ 27,216.00	$ 136,080.00
LIMPIEZA PROFUNDA DE LA JUNTA PARA ANCHOS VARIABLES DE 5 A 30cm. (Retiro del material en la cavidad existente entre la superficie externa de la viga y el espaldar del estribo mediante el uso de hidrolavado y taladro luego del vaciado de escombros).	5204	ML	5	$ 5,219.00	$ 26,095.00
JUNTA ELASTOMERICA TIPO AWGJ 70 DE 70mm DE RECORRIDO O SIMILAR. SUMINISTRO Y COLOCACIÓN. (Incluye pernos y soldadura).	5201	ML	5	$ 100,525.00	$ 502,625.00
RELLENO EN RECEBO COMUN (Suministro e instalación Extendido manual, Humedecimiento y Compactación TRANSPORTE A 28 KM).	4792	M3	40	$ 52,388.00	$ 2,101,413.65
Total reparación (COP /m^3 de volumen de estribo)					**$ 1,117,853**

Figura 5-63. Actividades y costos de reparación por unidad de volumen de un estribo típico en el estado de daño 3

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano

FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES

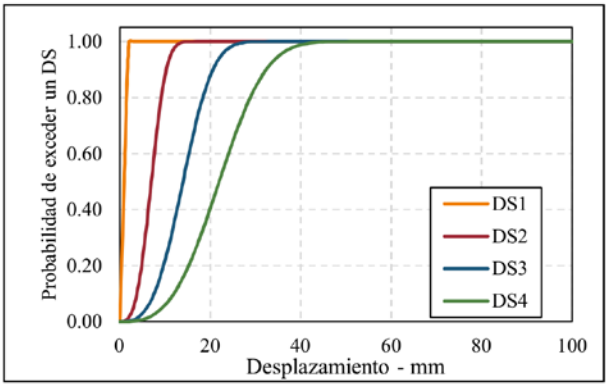
11/27/2018

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería

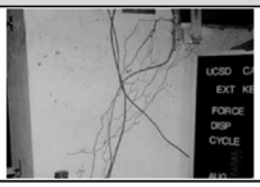
Información general	
Nombre	llaves de cortante
ID	P.LLA.02
Estados de daño	4

Información general de la fragilidad	
Referencia	Zakeri et. Al (2014)

Estados de daño	μ	β
DS1	1.00	0.25
DS2	7.00	0.25
DS3	14.00	0.46
DS4	22.00	0.46



Descripción del componente			
Base - m	0.8	Área trans. - m2	0.72
Ancho - m	0.9	Área sup. - m2	8.48
Alto - m	1.5	Volumen - m3	1.08

Descripción de daño		
Estado de daño 1 DS1	 Megally, Silva, & Seible, 2002	Fisuras que ocurren en la pared del estribo debido a llaves de cortante externas

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA PRESIÓN 3200 PSI. INCLUYE IMPLEMENTOS DE ASEO	4947	M2	4	$ 2,757.00	$ 11,608.58
SELLADO DE FISURAS ENTRE 0,1 Y 1,0 MM MEDIANTE INYECCIÓN DE RESINA EPÓXICA DE BAJA VISCOSIDAD, ALTA RESISTENCIA, INSENSIBLE A LA HUMEDAD Y ALTO MÓDULO ELÁSTICO SEGÚN	6288	ML	8	$ 12,133.00	$ 102,174.07
SANEADO DE CONCRETO DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE ESCARIFICACIÓN DE CONCRETO PROFUNDIDAD ENTRE 2cm Y 7cm, LIMPIEZA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO	5207	M2	1	$ 120,181.00	$ 75,904.86
Total reparación (COP /m^3 de volumen de llaves de cortante)					**$ 175,637**

Figura 5-64. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 1

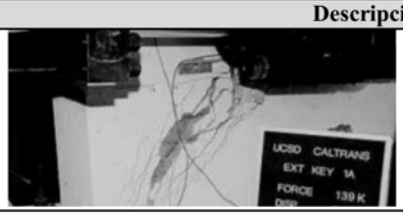
ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **11/27/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 2 DS2	 Megally, Silva, & Seible, 2002	Fisuras diagonales en el estribo reflejando la formación de puntales compresivos en el punto de aplicación de la carga y desprendimiento de concreto

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	3710	M3	2	$ 4,411.00	$ 9,527.76
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA PRESIÓN 3200 PSI. INCLUYE IMPLEMENTOS DE ASEO (DETERGENTE INDUSTRIAL), AGUA, COMBUSTIBLE	4947	M2	4	$ 2,757.00	$ 11,608.58
SELLADO DE FISURAS ENTRE 0,1 Y 1,0 MM MEDIANTE INYECCIÓN DE RESINA EPÓXICA DE BAJA VISCOSIDAD, ALTA RESISTENCIA, INSENSIBLE A LA HUMEDAD Y ALTO MÓDULO ELÁSTICO SEGÚN NORMA ASTM C-88-1-90 TIPO IV. INCLUYE TODOS	6288	ML	25	$ 12,133.00	$ 306,522.21
SANEADO DE CONCRETO DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE ESCARIFICACIÓN DE CONCRETO PROFUNDIDAD ENTRE 2cm Y 7cm, LIMPIEZA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO PARA EL ACERO DE REFUERZO EXISTENTE Y	5207	M2	2	$ 120,181.00	$ 253,016.19
Total reparación (COP /m^3 de volumen de llaves de cortante)					**$ 537,662**

Figura 5-65. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 2

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **11/27/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 3 DS3	 Megally, Silva, & Seible, 2002	Las fisuras diagonales en los estribos incrementan su ancho y se evidencian desplazamientos de las llaves de cortante externas

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	3710	M3	2	$ 4,411.00	$ 9,527.76
LAVADO DE ESTRUCTURA EN CONCRETO Y/O METÁLICAS. INCLUYE ALQUILER DE HIDROLAVADORA 1300W MOTOR A GASOLINA PRESIÓN 3200 PSI. INCLUYE IMPLEMENTOS DE ASEO (DETERGENTE INDUSTRIAL), AGUA, COMBUSTIBLE	4947	M2	4	$ 2,757.00	$ 11,608.58
SANEADO DE CONCRETO DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE ESCARIFICACIÓN DE CONCRETO PROFUNDIDAD ENTRE 2cm Y 7cm, LIMPIEZA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO PARA EL ACERO DE REFUERZO EXISTENTE Y	5207	M2	3	$ 120,181.00	$ 379,524.29
RETIRO, DEMONTE DE MATERIAL DE JUNTA DE DILATACIÓN EXISTENTE Y DEMOLICIÓN DE CONCRETO ADYACENTE A LA JUNTA, ANCHO VARIABLE DE 80 A 90cm. (Incluye cargue, transporte y retiro de escombros).	5195	ML	3	$ 27,216.00	$ 83,769.67
LIMPIEZA PROFUNDA DE LA JUNTA PARA ANCHOS VARIABLES DE 5 A 30cm. (Retiro del material en la cavidad existente entre la superficie externa de la viga y el espaldar del estribo mediante el uso de hidrolavado y taladro luego del vaciado de escombros).	5204	ML	3	$ 5,219.00	$ 16,063.86
JUNTA ELASTOMERICA TIPO AWGJ 70 DE 70mm DE RECORRIDO O SIMILAR. SUMINISTRO Y COLOCACIÓN. (Incluye pernos y soldadura).	5201	ML	3	$ 100,525.00	$ 309,411.60
Total reparación (COP /m^3 de volumen de llaves de cortante)					**$ 749,913**

Figura 5-66. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 3

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES 11/27/2018	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 4 DS4	 Megally, Silva, & Seible, 2002	Se presenta degradación de la llave de cortante por la exposición de refuerzo que se genera por el incremento del daño

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	3710	M3	2	$ 4,411.00	$ 9,527.76
DEMOLICIÓN CONCRETO ESTRUCTURAL (Incluye Cargue manual). No incluye transporte y disposición final de sobrantes.	3486	M3	1	$ 111,566.00	$ 150,614.10
RESTITUCIÓN CONCRETO DE TOPES SÍSMICOS. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE MATERIALES (RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO SIKATOP 122 PLUS O EMACO S-88-C O EQUIVALENTE EN DOS MANOS), EQUIPOS (HERRAMIENTA MENOR,	6285	M3	1	$ 458,610.00	$ 619,123.50
ACERO DE REFUERZO DE FY=60000 PSI. SUMINISTRO E INSTALACIÓN. ACERO SEGÚN ESPECIFICACIONES PARTICULARES Y DE ACUERDO A LO ESTIPULADO POR LA NSR-10, NORMA ASTM A-706, ICONTEC 2289 PARA EL ACERO PDR-60. INCLUYE TODOS LOS	6293	KG	162	$ 2,605.00	$ 422,010.00
IMPRIMANTE Y PUENTE DE ADHERENCIA ENTRE CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO DE FRAGUADO LENTO. SUMINISTRO Y APLICACIÓN. EPÓXICO DE PEGA CONCRETO NUEVO A VIEJO QUE CUMPLA CON LA NORMA ASTM C-881 TIPO 5 GRADO II	5209	M2	2	$ 32,259.00	$ 67,914.64
ANCLAJE EPÓXICO DE VARILLA DE 3/4" SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE LA DETECCIÓN DE REFUERZO PARA PERFORACIÓN, LA PERFORACIÓN, LIMPIEZA DE LA PERFORACIÓN CON CHORRO DE AIRE, SUMINISTRO DE MATERIALES (RELLENO	6353	CM.PER	139	$ 1,786.00	$ 248,242.93
RELLENO EN RECEBO COMUN (Suministro e instalación Extendido manual, Humedecimiento y Compactación TRANSPORTE A 28 KM).	4792	M3	3	$ 52,388.00	$ 141,447.60
SANEADO DE CONCRETO DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE ESCARIFICACIÓN DE CONCRETO PROFUNDIDAD ENTRE 2cm Y 7cm, LIMPIEZA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO PARA EL ACERO DE REFUERZO EXISTENTE Y	5207	M2	4	$ 120,181.00	$ 506,032.38
Total reparación (COP /m³ de volumen de llaves de cortante)					**$ 2,004,549**

Figura 5-67. Actividades y costos por unidad de volumen de reparación de una llave de cortante típica en el estado de daño 4

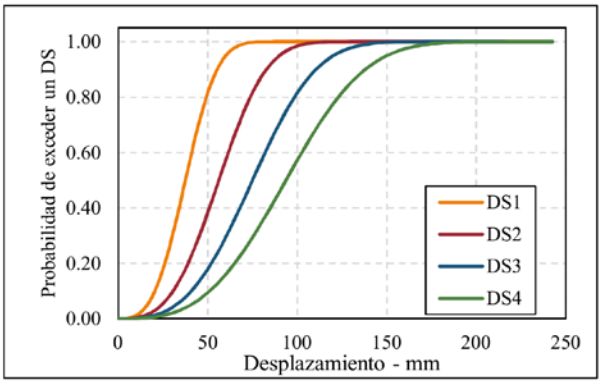
FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES

11/27/2018

Información general	
Nombre	neoprenos long y trans
ID	P.NEO.01
Estados de daño	4

Información general de la fragilidad	
Referencia	Zakeri et. Al (2014)

Estados de daño	μ	β
DS1	37.50	0.25
DS2	56.20	0.25
DS3	75.00	0.46
DS4	93.70	0.46



Descripción del componente			
Espesor - m	0.1	Área trans. - m2	
Ancho - m		Área sup. - m2	
Alto - m		Volumen - m3	

Descripción de daño		
Estado de daño 1 DS1	Caterino, Maddaloni, & Occhiuzzi, 2014	El grado de deformación puede ser notable, sin embargo, no genera daño a la vía

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
IZAJE DE VIGA PARA REEMPLAZO DE APOYOS DE NEOPRENO.	6267	UN	1	$ 1,580,114.00	$ 1,580,114.00
ANCLAJE EPÓXICO DE VARILLA DE 7/8" SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE LA DETECCIÓN DE REFUERZO PARA PERFORACIÓN, LA PERFORACIÓN, LIMPIEZA DE LA PERFORACIÓN CON CHORRO DE	6251	CM.PER	120	$ 1,972.00	$ 236,640.00
MÉNSULAS METÁLICAS EN ACERO A-36 CALIBRE DE 1/2" SEGÚN PLANOS DE DISEÑO. SUMINISTRO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN. INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIALES, EQUIPOS,	6264	UN	2	$ 8,067.00	$ 16,134.00
NEOPRENO REFORZADO 0.50 x 0.50 x 2" DOBLE REFUERZO. SUMINISTRO E INSTALACION. (INCLUYE LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE CON CHORRO DE AIRE A PRESIÓN, HERRAMIENTA MENOR Y COMPRESOR).	5705	UN	2	$ 457,218.00	$ 914,436.00
Total reparación (COP /altura en metros de neopreno)					**$ 27,473,240**

Figura 5-68. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 1

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES 11/27/2018	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 2 DS2	 Bruneau, Anagnostopoulou, & Palermo, 2010	Puede requerir que el tablero sea realineado y también implicaría posibles fracturas

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
IZAJE DE VIGA PARA REEMPLAZO DE APOYOS DE NEOPRENO.	6267	UN	2	$ 1,580,114.00	$ 3,160,228.00
ANCLAJE EPÓXICO DE VARILLA DE 7/8" SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE LA DETECCIÓN DE REFUERZO PARA PERFORACIÓN, LA PERFORACIÓN, LIMPIEZA DE LA PERFORACIÓN CON CHORRO DE AIRE, SUMINISTRO DE MATERIALES (RELLENO	6251	CM.PER	120	$ 1,972.00	$ 236,640.00
NEOPRENO REFORZADO 0.50 x 0.50 x 2" DOBLE REFUERZO. SUMINISTRO E INSTALACION. (INCLUYE LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE CON CHORRO DE AIRE A PRESIÓN, HERRAMIENTA MENOR Y COMPRESOR).	5705	UN	2	$ 457,218.00	$ 914,436.00
RESTITUCIÓN RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE MATERIALES (RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO	6284	M2	1	$ 47,263.00	$ 47,263.00
MÉNSULAS METÁLICAS EN ACERO A-36 CALIBRE DE 1/2" SEGÚN PLANOS DE DISEÑO. SUMINISTRO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN. INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIALES, EQUIPOS, TRANSPORTES, MANEJO, ALMACENAMIENTO,	6264	UN	2	$ 8,067.00	$ 16,134.00
Total reparación (COP /altura en metros de neopreno)					**$ 43,747,010**

Figura 5-69. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 2

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES 11/27/2018	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 3 DS3	 Moehle & Eberhard, 2000	Fractura en la superestructura, requiere un determinado grado de reparación y realineación

Actividad	IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
IZAJE DE VIGA PARA REEMPLAZO DE APOYOS DE NEOPRENO.	6267	UN	2	$ 1,580,114.00	$ 3,160,228.00
DEMOLICIÓN DE CONCRETO: ESPESORES 16cm A 25cm.	5197	M3	1	$ 62,512.00	$ 50,009.60
NEOPRENO REFORZADO 0.50 x 0.50 x 2" DOBLE REFUERZO. SUMINISTRO E INSTALACION. (INCLUYE LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE CON CHORRO DE AIRE A	5705	UN	2	$ 457,218.00	$ 914,436.00
DEMOLICIÓN RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL PARA SANEADO DE REFUERZO, HASTA DESCUBRIR EL REFUERZO EXISTENTE VERIFICANDO PH EN CONCRETO.	6230	M2	1	$ 4,740.00	$ 4,740.00
RESTITUCIÓN RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE MATERIALES	6284	M2	1	$ 47,263.00	$ 47,263.00
DEMOLICIÓN DE CONCRETO REFORZADO DE TABLERO. Incluye demolición del concreto existente empleando martillos neumáticos o hidráulicos, retiro y manejo de escombros, suministro de equipos, personal, transporte, energía y mano de	6227	M3	2	$ 38,354.00	$ 61,366.40
RESTITUCIÓN RECUBRIMIENTO DE TABLERO O VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE MATERIALES	6281	M2	8	$ 47,139.00	$ 377,112.00
ACERO DE REFUERZO (Incluye Suministro, Figurado y Fijación)	3708	KG	80	$ 2,514.00	$ 201,120.00
MÉNSULAS METÁLICAS EN ACERO A-36 CALIBRE DE 1/2" SEGÚN PLANOS DE DISEÑO. SUMINISTRO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN. INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIALES, EQUIPOS, TRANSPORTES, MANEJO, ALMACENAMIENTO.	6264	UN	2	$ 8,067.00	$ 16,134.00
DEMOLICIÓN PAVIMENTO ASFÁLTICO DE ESPESOR 10 cm. Incluye todos los costos de suministro de equipos (herramienta menor, martillo neumático, compresor, provisional de energía), transporte, manejo, almacenamiento, desperdicios,	6226	M2	8	$ 7,608.00	$ 60,864.00
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO DENSO MD12 ASFALTO CONVENCIONAL 80-100 (cemento asfáltico 80-100) (Suministro, Extendido, Nivelación y Compactación con Vibrocompactador y compactador de llantas)	4203	M3	0.4	$ 543,076.00	$ 217,230.40
ANCLAJE EPÓXICO DE VARILLA DE 7/8" SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE LA DETECCIÓN DE REFUERZO PARA PERFORACIÓN, LA PERFORACIÓN, LIMPIEZA DE LA PERFORACIÓN CON CHORRO DE AIRE, SUMINISTRO DE	6251	CM.PER	120	$ 1,972.00	$ 236,640.00
Total reparación (COP /altura en metros de neopreno)					**$ 53,471,434**

Figura 5-70. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 3

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD PARA COMPONENTES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **11/27/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño 4 DS4	 Federal Highway Administration, 2011	Caída del tablero

Actividad	**Código IDU**	**Unidad**	**Cantidad**	**Precio Unitario**	**Precio Total**
ANCLAJE EPÓXICO DE VARILLA DE 3/8" SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE LA DETECCIÓN DE REFUERZO PARA PERFORACIÓN, LA PERFORACIÓN, LIMPIEZA DE LA PERFORACIÓN CON CHORRO DE AIRE, SUMINISTRO DE MATERIALES (RELLENO	6249	CM.PER	120	$ 1,390.00	$ 166,800.00
NEOPRENO REFORZADO 0.50 x 0.50 x 2" DOBLE REFUERZO. SUMINISTRO E INSTALACION. (INCLUYE LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE CON CHORRO DE AIRE A PRESIÓN, HERRAMIENTA MENOR Y COMPRESOR).	5705	UN	2	$ 457,218.00	$ 914,436.00
MÉNSULAS METÁLICAS EN ACERO A-36 CALIBRE DE 1/2" SEGÚN PLANOS DE DISEÑO. SUMINISTRO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN. INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIALES, EQUIPOS, TRANSPORTES, MANEJO, ALMACENAMIENTO,	6264	UN	2	$ 8,067.00	$ 16,134.00
Total reparación (COP /altura en metros de neopreno)					**$ 10,973,700**

Figura 5-71. Actividades y costos de reparación respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 4

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE COSTOS DE REPARACIÓN PARA COMPONENTES INDIVIDUALES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **29/11/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño		Pérdidad del apoyo/colapso de una luz de un puente vehicular

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
DEMOLICION DE CONCRETO: ESPESORES 16cm A 25cm. (Incluye retiro de material, transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado).	5197	M3	0.55	$ 62,512.00	$ 34,382
CONCRETO 5000 PSI PARA SUPER ESTRUCTURA (Premezclado. Incluye Sumin, Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	3636	M3	0.55	$ 669,292.00	$ 368,111
ACERO DE REFUERZO (Incluye Suministro, Figurado y Fijación)	3708	KG	71.5	$ 2,514.00	$ 179,751
IZAJE Y MONTAJE DE VIGA EN CONCRETO L=30mt APROX INCLUYE DOS GRUAS TELESCOPICAS 50TON PERSONAL PARA IZAJE Y MONTAJE	5053	UN	0.5	$ 6,379,646.00	$ 3,189,823
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO DENSO MD12 ASFALTO CONVENCIONAL 80-100 (cemento asfáltico 80-100) (Suministro, Extendido, Nivelación y Compactación con	4203	M3	0.05	$ 543,076.00	$ 27,154
JUNTA ELASTOMERICA ANCLADA APROXIMADAMENTE 30MM DE LONGITUD. SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE	6253	ML	2	$ 472,449.00	$ 944,898
LIMPIEZA PROFUNDA DE LA JUNTA. INCLUYE RETIRO DE MATERIAL EN LA CAVIDAD EXISTENTE ENTRE LA SUPERFICIE EXTERNA DE LA VIGA Y EL ESPALDAR DEL	6306	ML	2	$ 6,462.00	$ 12,924
DEMOLICION RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL PARA SANEADO DE REFUERZO, HASTA DESCUBRIR EL REFUERZO EXISTENTE VERIFICANDO PH EN	6230	M2	3.2	$ 4,740.00	$ 15,168
RESTITUCION RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE TODOS LOS	6284	M2	2	$ 47,263.00	$ 94,526
RESTITUCION RECUBRIMIENTO DE TABLERO O VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE	6281	M2	1.2	$ 47,139.00	$ 56,567
Total costo directo reparación					**$ 4,923,303**
Sobrecostos por diseños					**$ 541,563**
Sobrecostos por actividades preliminares					**$ 147,699**
Sobrecostos por AIU					**$ 2,018,554**
Sobrecostos por gestión tráfico/gestión ambiental					**$ 196,932**
Total Reparación					**$ 7,828,051**

Figura 5-72. Actividades y costos de reparación respecto al evento de pérdida del apoyo de una luz de puentes con superestructura de concreto.

5.6.5 Formatos alternativos para puentes de superestructura metálica

Los elementos metálicos en puentes, para las tipologías más representativas de la ciudad, hacen parte principalmente de la superestructura. La superestructura como se encontró bibliográficamente y se plantea en el Capítulo 6 se consideró con comportamiento elástico ante eventos sísmicos.

Por esta razón, en la modelación no lineal no se incluyeron elementos metálicos como elementos susceptibles a daños. No obstante, este tipo de puentes fueron considerados en las funciones de costos de reparación para estados severos que representaran daños sobre la superestructura. Tal es el caso, de los desplazamientos mayores al ancho de silla del puente y el estado de daño severo de los neoprenos que conllevan al colapso total de la luz y a daños parciales debido al impacto con otros elementos.

Para el caso particular de los puentes de tipología Prototipo Bogotá descrito en el numeral 6.10.2.1, no se encontraron daños en los distintos elementos considerados, por lo cual se le asignó a esta tipología una función de vulnerabilidad de no daño y no fue requerido generar funciones de costos de reparaciones por elementos.

(Espacio en blanco intencional)

Descripción de daño		
Estado de daño 3 DS3	Moehle & Eberhard, 2000	Fractura en la superestructura, requiere un determinado grado de reparación y realineación (Puentes metálicos)

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
IZAJE DE VIGA PARA REEMPLAZO DE APOYOS DE NEOPRENO.	6267	UN	2	$ 1,580,114.00	$ 3,160,228.00
DEMOLICIÓN DE CONCRETO: ESPESORES 16cm A 25cm. (Incluye retiro de material, transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado).	5197	M3	0	$ 62,512.00	$ 25,004.80
NEOPRENO REFORZADO 0.50 x 0.50 x 2" DOBLE REFUERZO. SUMINISTRO E INSTALACION. (INCLUYE LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE CON CHORRO DE AIRE A PRESIÓN, HERRAMIENTA MENOR Y COMPRESOR).	5705	UN	2	$ 457,218.00	$ 914,436.00
DEMOLICIÓN RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL PARA SANEADO DE REFUERZO, HASTA DESCUBRIR EL REFUERZO EXISTENTE VERIFICANDO PH EN CONCRETO. Incluye todos los costos de suministro de	6230	M2	1	$ 4,740.00	$ 4,740.00
RESTITUCIÓN RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE	6284	M2	1	$ 47,263.00	$ 47,263.00
DEMOLICIÓN DE CONCRETO REFORZADO DE TABLERO. Incluye demolición del concreto existente empleando martillos neumáticos o hidráulicos, retiro y manejo de escombros, suministro de equipos, personal,	6227	M3	1	$ 38,354.00	$ 30,683.20
RESTITUCIÓN RECUBRIMIENTO DE TABLERO O VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE	6281	M2	5	$ 47,139.00	$ 251,408.00
ACERO ESTRUCTURAL A-709 TIPO CORTEN GRADO 50 DE ALTA RESISTENCIA. Incluye suministro, fabricación, transporte e instalación.	6334	KG	250	$ 10,316.00	$ 2,579,000.00
ACERO DE REFUERZO (Incluye Suministro, Figurado y Fijación)	3708	KG	80	$ 2,514.00	$ 201,120.00
MÉNSULAS METÁLICAS EN ACERO A-36 CALIBRE DE 1/2" SEGÚN PLANOS DE DISEÑO. SUMINISTRO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN. INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIALES, EQUIPOS,	6264	UN	2	$ 8,067.00	$ 16,134.00
DEMOLICIÓN PAVIMENTO ASFÁLTICO DE ESPESOR 10 cm. Incluye todos los costos de suministro de equipos (herramienta menor, martillo neumático, compresor, provisional de energía), transporte, manejo,	6226	M2	5.3333333	$ 7,608.00	$ 40,576.00
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO DENSO MD12 ASFALTO CONVENCIONAL 80-100 (cemento asfáltico 80-100) (Suministro, Extendido, Nivelación y Compactación con Vibrocompactador y compactador de	4203	M3	0.2666667	$ 543,076.00	$ 144,820.27
ANCLAJE EPÓXICO DE VARILLA DE 7/8" SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE LA DETECCIÓN DE REFUERZO PARA PERFORACIÓN, LA PERFORACIÓN, LIMPIEZA DE LA PERFORACIÓN CON CHORRO DE AIRE, SUMINISTRO DE MATERIALES (RELLENO EPÓXICO ET O EQUIVALENTE, BROCAS), EQUIPOS, TRANSPORTES, MANEJO, ALMACENAMIENTO, MANEJO DE	6251	CM.PER	120	$ 1,972.00	$ 236,640.00
Total Reparación					**$ 76,520,533**

Figura 5-73. Actividades y costos de reparación alternativas respecto a la altura de un neopreno típico en el estado de daño 4

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Instituto Desarrollo Urbano	**FORMATO DE COSTOS DE REPARACIÓN PARA COMPONENTES INDIVIDUALES DE PUENTES VEHICULARES Y PEATONALES** **29/11/2018**	Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería

Descripción de daño		
Estado de daño		Pérdidad del apoyo/colapso de una luz de un puente vehicular

Actividad	Código IDU	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
DEMOLICION DE CONCRETO: ESPESORES 16cm A 25cm. (Incluye retiro de material, transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado)	5197	M3	0.15	$ 62,512.00	$ 9,377
CONCRETO 5000 PSI PARA SUPER ESTRUCTURA (Premezclado. Incluye Sumin, Formaleteo y Colocación. No incl. Refuerzo, Curado)	3636	M3	0.15	$ 669,292.00	$ 100,394
ACERO ESTRUCTURAL A-709 TIPO CORTEN GRADO 50 DE ALTA RESISTENCIA. Incluye suministro, fabricación, transporte e instalación.	6334	KG	125	$ 10,316.00	$ 1,289,500
ACERO DE REFUERZO (Incluye Suministro, Figurado y Fijación)	3708	KG	19.5	$ 2,514.00	$ 49,023
IZAJE Y MONTAJE DE VIGA EN CONCRETO L=30mt APROX INCLUYE DOS GRUAS TELESCOPICAS 50TON PERSONAL PARA IZAJE Y MONTAJE	5053	UN	0.5	$ 6,379,646.00	$ 3,189,823
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO DENSO MD12 ASFALTO CONVENCIONAL 80-100 (cemento asfáltico 80-100) (Suministro, Extendido, Nivelación y Compactación con	4203	M3	0.05	$ 543,076.00	$ 27,154
JUNTA ELASTOMERICA ANCLADA APROXIMADAMENTE 30MM DE LONGITUD. SUMINISTRO E INSTALACIÓN. INCLUYE TODOS LOS COSTOS DE SUMINISTRO DE	6253	ML	2	$ 472,449.00	$ 944,898
LIMPIEZA PROFUNDA DE LA JUNTA. INCLUYE RETIRO DE MATERIAL EN LA CAVIDAD EXISTENTE ENTRE LA SUPERFICIE EXTERNA DE LA VIGA Y EL ESPALDAR DEL	6306	ML	2	$ 6,462.00	$ 12,924
DEMOLICION RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL PARA SANEADO DE REFUERZO, HASTA DESCUBRIR EL REFUERZO EXISTENTE VERIFICANDO PH EN	6230	M2	2.4	$ 4,740.00	$ 11,376
RESTITUCION RECUBRIMIENTO VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE TODOS LOS	6284	M2	2	$ 47,263.00	$ 94,526
RESTITUCION RECUBRIMIENTO DE TABLERO O VIGAS CABEZAL, EN ZONAS DE SANEADO DE REFUERZO O DONDE EXISTA PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO. INCLUYE	6281	M2	0.4	$ 47,139.00	$ 18,856
Total costo directo reparación					**$ 5,747,850**
Sobrecostos por diseños					**$ 632,264**
Sobrecostos por actividades preliminares					**$ 172,436**
Sobrecostos por AIU					**$ 2,356,619**
Sobrecostos por gestión tráfico/gestión ambiental					**$ 229,914**
Total Reparación					**$ 9,139,082**

Figura 5-74. Actividades y costos de reparación alternativas respecto al evento de pérdida del apoyo de una luz de puentes con superestructura de metálica.

CAPITULO
6

6 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES

6.1 INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad sísmica de los puentes se representa mediante una función que relaciona una medida de intensidad sísmica con los costos esperados de reparación y su correspondiente nivel de incertidumbre. La medida de intensidad en el caso particular de los puentes se representa como la aceleración espectral para un periodo estructural fijo (por ejemplo 0.5 segundos) y para la aceleración máxima del terreno en superficie (PGS). Los costos estimados de reparación de los diferentes componentes afectados para diferentes niveles de intensidad sísmica se expresan como porcentaje del valor total de reposición de la estructura del puente. A partir de estas curvas es posible cuantificar los costos de reparación y el nivel de daño medio que puede alcanzarse en una estructura específica o en un portafolio de puentes mediante un análisis probabilista del riesgo sísmico.

El procedimiento para la calificación de la vulnerabilidad sísmica de los puentes que componen la base de datos de exposición requiere llevar a cabo una serie de actividades analíticas para entender y cuantificar el comportamiento esperado de cada estructura ante intensidades sísmicas crecientes. Las actividades principales incluyen la identificación de las tipologías constructivas representativas o predominantes de puentes en la base de datos de exposición, la elaboración de modelos que permitan comprender y predecir el comportamiento estructural para señales sísmicas específicas y la evaluación de los estados de daño esperados en elementos críticos del puente y su valoración económica.

A continuación, se presenta el desarrollo de la metodología adoptada en el presente proyecto. Se incluye en la explicación el concepto básico de la evaluación del riesgo sísmico que es el marco en el cual se contextualiza la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad. Seguido a esto se presenta la asignación de tipologías estructurales, la identificación de elementos críticos, los modelos de comportamiento no lineal de componentes, la conformación de modelos no lineales paramétricos, los parámetros de demanda sísmica, los modelos de componentes susceptibles a daño y finalmente el catálogo de funciones de vulnerabilidad obtenidas para las tipologías representativas de puentes de la ciudad.

6.2 METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

6.2.1 Vulnerabilidad sísmica estructural

En el marco del presente estudio, la vulnerabilidad sísmica estructural de cada una de las tipologías identificadas de puentes se representa mediante una función que relaciona el valor medio estimado de reparación y su varianza (expresado como porcentaje del valor de reposición total del puente) con una medida de intensidad sísmica (ver Figura 6-1). Asociada a cada nivel de intensidad es posible igualmente establecer el nivel de daño global del puente, en términos de la posible afectación a los diferentes componentes críticos de la estructura.

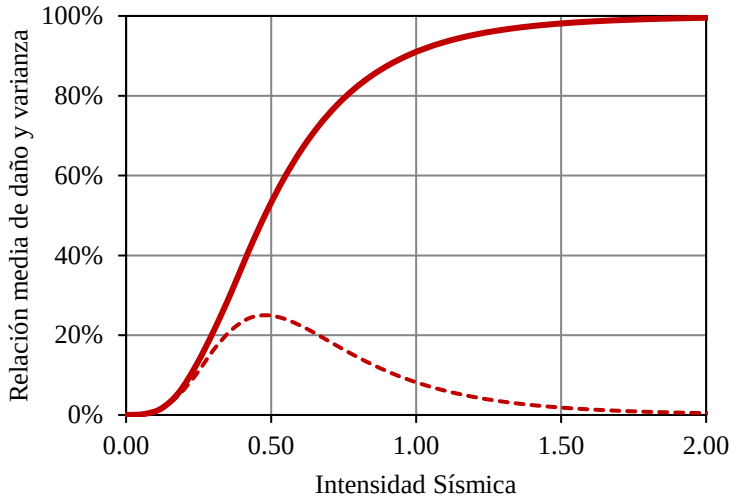


Figura 6-1. Función de vulnerabilidad típica

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una tipología dada de puente incluye las siguientes actividades específicas:

1. Definición de un conjunto de puentes arquetipo que representen cada una de estas tipologías constructivas predominantes.
2. Selección de una serie de señales de análisis que representen adecuadamente la sismicidad local en la zona de estudio incluyendo la proporción de sismos esperados en las fuentes sísmicas dominantes, los rangos de contenidos frecuenciales y duraciones de señales características de la zona y las posibles variaciones con respectos la respuesta sísmica esperada de los depósitos de suelo de la zona de estudio.
3. Elaboración de modelos computacionales que permitan estimar parámetros de demanda sísmica en componentes específicos de cada modelo de puente ante intensidades sísmicas crecientes. El análisis de respuesta debe realizarse mediante modelación del comportamiento no lineal de la estructura. La respuesta dinámica se calcula mediante análisis incremental dinámico (Vamvatsikos & Cornell, 2002).

4. Asignación a cada tipología de puente de un modelo de componentes susceptibles a sufrir daño, calificación de la fragilidad, costos y tiempos de reparación para diferentes niveles de daño en cada uno de dichos componentes.
5. Análisis del comportamiento de los modelos computacionales para determinación de los estados de daño de los componentes susceptibles para cada nivel de intensidad y valoración económica de los costos de reparación correspondientes. Este procedimiento se lleva cabo en el presente estudio mediante el software FUNVUL-BRIDGES V.1.0 disponible en www.ecapra.org.
6. Integración de costos de reparación de componentes individuales o costos de reposición de luces completas de acuerdo con lo explicado en el numeral 5.6.
7. Evaluación y definición de las funciones de vulnerabilidad consistentes con los costos de reparación a diferentes niveles de intensidad sísmicas.

La metodología explicada se presenta en forma resumida en la Figura 6-2.

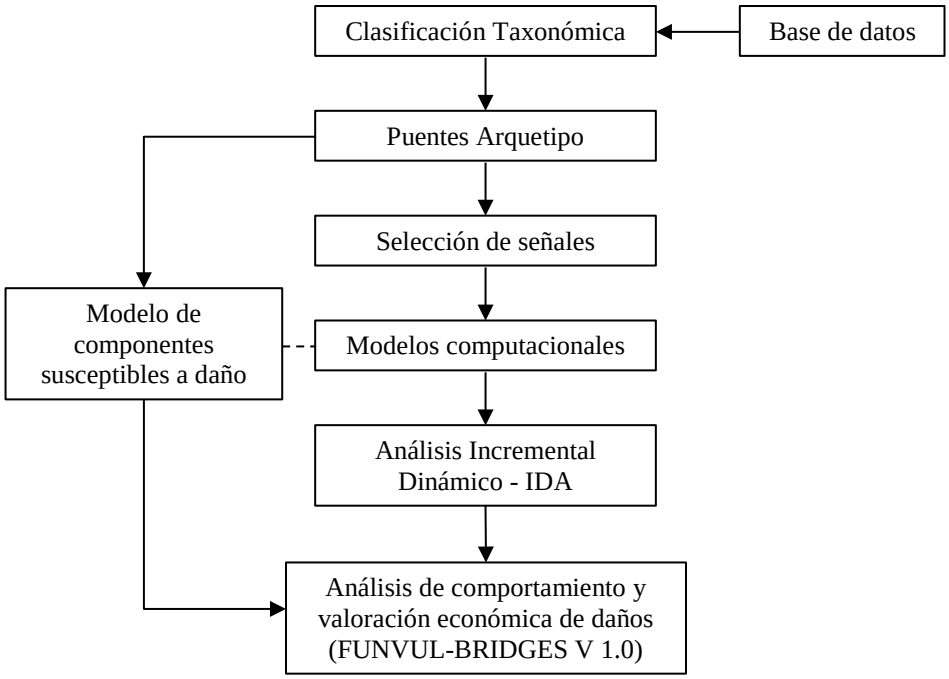


Figura 6-2. Metodología de evaluación de vulnerabilidad de puentes

6.2.2 Taxonomía

6.2.2.1 Clasificación taxonómica de los puentes

La taxonomía es el sistema de clasificación de puentes a partir de los atributos de la base de datos. La asignación de una determinada taxonomía a cada uno de los puentes permite obtener un catálogo completo y consistente de los puentes con los parámetros que afectan de manera general su vulnerabilidad sísmica. Esta clasificación permite identificar las tipologías recurrentes para definir a partir de ésta los puentes arquetipo. Estos puentes arquetipo corresponden a modelos representativos que agrupan puentes con

comportamiento estructural similar. El sistema de clasificación taxonómica propuesto para los puentes se presenta en la Tabla 6-1. En los siguientes numerales se explica en detalle cada uno de los atributos de la taxonomía que es necesario asignar a cada puente de la base de datos.

Tabla 6-1. Taxonomía propuesta para los puentes de Bogotá

No.	Parámetro de vulnerabilidad sísmica	Descripción	Variable
1	**Sistema estructural principal**	Tipologías estructurales definidas a partir de la subestructura, superestructura, conexiones y uso principal.	(Ver Tabla 6-2)* *Nota: en caso que el puente haya sido reforzado se debe clasificar el sistema estructural actual luego de reforzado.
2	**Nivel de diseño sísmico**	Nivel de diseño y consideraciones sísmicas	Diseño Sísmico (DS), Diseño gravitacional (DG)
3	**Tipo de suelo**	Tipo de suelo según la ubicación del puente	Duro $\left[\overline{V_s} \geq 760\frac{m}{s}\right]$ (SD), Intermedios $\left[180\frac{m}{s} \leq \overline{V_s} < 760\frac{m}{s}\right]$ (SI) o Blandos $\left[\overline{V_s} < 180\frac{m}{s}\right]$ (SB)
4	**Número de luces**	Número de luces medidas desde el estribo o terraplén.	Entero de 1 en adelante
5	**No. de elementos verticales en el eje**	Número de elementos verticales, ejemplo: columnas	Entero de 1 en adelante
6	**Tipo de cimentación**	Tipo de la cimentación actual de la estructura	Profunda (CP), Superficial (CS)
7	**Ángulo de Esviaje**	Indicar si el puente presenta esviaje (mayor a 10°) o si no presenta (menor de 10°)	Con esviaje (CE), Sin esviaje (SE)
8	**Estado estructural**	Estado actual de la estructura en términos del comportamiento estructural esperado	Bueno (EB), Aceptable (EA), Regular (ER), Malo (EM)
9	**Curvatura horizontal**	Indicar si tiene curvatura horizontal	Curvatura horizontal (CH), Sin curvatura horizontal (SH)
10	**Curvatura vertical**	Indicar si tiene curvatura vertical	Curvatura vertical (CV), Sin curvatura vertical (SV)
11	**Reforzamiento sísmico**	Indicar si el puente ha tenido algún tipo de reforzamiento o intervención estructural sísmica.	Sin reforzamiento (SR) , Puente reforzado (CR)
12	**No. de elementos horizontales**	Número de elementos horizontales tipo vigas, ejemplo: viga cajón	Entero de 1 en adelante

La clasificación taxonómica estructural del puente se identifica mediante la secuencia de variables de los parámetros taxonómicos. A continuación se presenta un ejemplo de un código taxonómico de un puente vehicular con sistema estructural monolítico hiperestático de una columna (VMH-1), con diseño sísmico (DS), en suelo duro (SD), de siete luces (07), un elemento vertical (01), con cimentación rígida (CR), sin ángulo de esviaje (00), con buena condición estructural (CB), sin curvatura horizontal (SH), con curvatura

vertical (CV), sin reforzamiento estructural (SR) y con cinco elementos horizontales (05). Los parámetros resaltados en negrilla corresponden a los parámetros principales de la clasificación.

VMH-1/DS/SD/07/01/CR/00/CB/SH/CV/SR/05

Los valores que pueden tomar cada uno de los parámetros de la taxonomía se explican en los numerales que siguen.

6.2.2.2 Sistema estructural principal

El sistema estructural de los puentes está definido por el tipo de conexión entre la subestructura y la superestructura (monolítica o no monolítica), la condición de la superestructura (luces continuas o luces simples), la conformación de los elementos verticales (una columna, varias columnas, pórticos o pantallas) y el uso predominante (vehicular o peatonal). En esta clasificación no se incluye el material pues este puede variar entre los diferentes componentes del puente. Por otro lado, existen tipologías particulares como son los Box Culvert, los puentes de una sola luz y los puentes Prototipo Bogotá (tipo Transmilenio). En la Tabla 6-2 se puede ver el resumen de los sistemas estructurales principales identificados en el portafolio de puentes de Bogotá.

Tabla 6-2. Sistemas estructurales principales

Conexión entre subestructura y superestructura	Condición superestructura	Elementos verticales	Código puentes Vehiculares	Código puentes Peatonales
Monolítico	Hiperestático (Luces continuas)	Una columna	VMH_1	PMH_1
		Varias columnas	VMH_2	-
		Pórtico	VMH_3	PMH_3
		Pantalla	VMH_4	PMH_4
No Monolítico	Isostático (Luces simples)	Una columna	VNI_1	PNI_1
		Varias columnas	VNI_2	-
		Pórtico	VNI_3	PNI_3
		Pantalla	VNI_4	-
	Hiperestático (Luces continuas)	Una columna	VNH_1	PNH_1
		Varias columnas	VNH_2	PNH_2
		Pórtico	VNH_3	PNH_3
		Pantalla	VNH_4	PNH_4
Box Culvert			VBC_1	PBC_1
Una Luz – Simple			VLS_1	PLS_1
Puente Prototipo Bogotá (Transmilenio)			-	PPB_1
Atirantado			-	PAT_1
Arco en acero			VAA_1	PAA_1
Arco en concreto			VAC_1	PAC_1
Vernacular – Artesanal			VVA_1	PVA_1

Las estructuras clasificadas como túneles o alcantarillas se encuentran por fuera del alcance de este estudio, debido a que no son consideradas propiamente puentes, pues por definición, un puente es una estructura que permite salvar un obstáculo natural o artificial para conectar dos caminos, y que provee una capacidad de tránsito por encima de su estructura. Como aclaración particular, la principal diferencia entre puentes clasificados como box culvert y estructuras tipo túnel o alcantarilla es que los primeros permiten el tránsito de vehículos o peatones sobre su losa superior, salvando un obstáculo, mientras los segundos son una estructura enterrada, donde el tránsito de vehículos o peatones no ocurre directamente sobre su superficie. Por ende, existen puentes para los cuales se mantiene su consideración como puentes, y no son agrupados bajo la clasificación de túneles, manteniéndose en la base de datos para análisis de riesgo por la anterior definición, como es el caso de los pasos deprimidos de ciclorruta en la Troncal El Dorado.

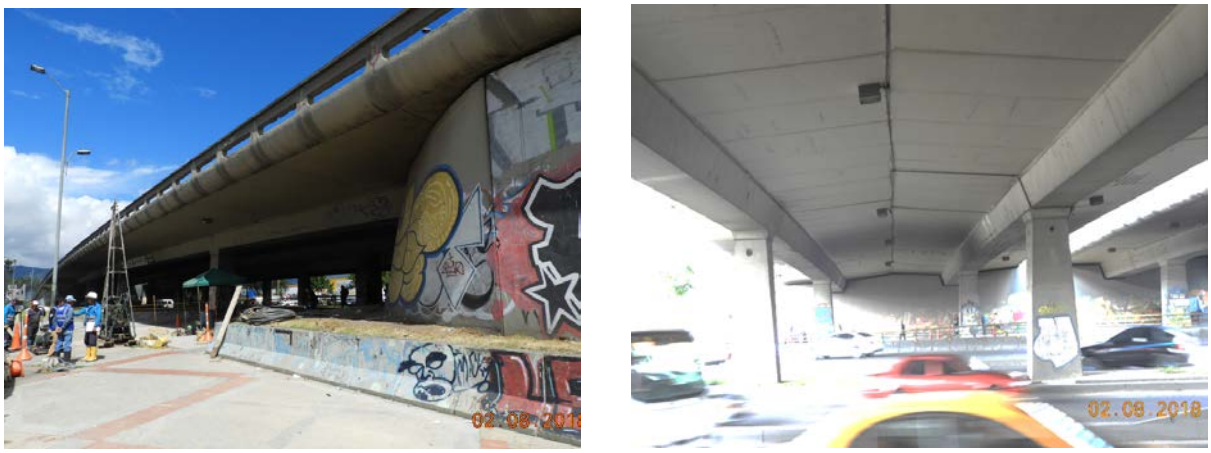
Adicionalmente, los puentes vernaculares o artesanales, aun cuando cumplen con esta definición, son puentes que no cuentan con las mínimas características de diseño, materiales de construcción, o nivel de seguridad para desempeñar su función, no han sido concebidos bajo el Código Colombiano de Construcción de Puentes, o han sido construidos por la comunidad como estructuras temporales de paso de obstáculos. Por lo anterior, la evaluación de su comportamiento estructural, tanto para solicitaciones de servicio como para solicitaciones sísmicas, no es posible de cuantificar o evaluar, y se encuentran por fuera del alcance del presente estudio.

De acuerdo con lo anterior, las estructuras clasificadas como túneles, alcantarillas, o puentes vernaculares/artesanales, se identifican bajo estas tipologías, pero son excluidas del inventario de puentes del Distrito para la evaluación de su vulnerabilidad y posterior evaluación del riesgo, así como son recomendadas para retirarse o eliminarse de la base de datos geográfica de puentes de la Entidad, de acuerdo a lo presentado en el Anexo A-3.

Debe aclararse que la clasificación del sistema estructural de un puente que haya tenido una intervención o reforzamiento en el pasado debe corresponder al sistema estructural actual luego del reforzamiento, y no al sistema original que tenía el puente antes de dicha intervención (ver nota complementaria en el numeral 6.2.2.12). En la Figura 6-3 se pueden identificar algunos ejemplos de sistemas estructurales en puentes del portafolio.

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

VMH_1



VMH_2

VMH_3

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

VMH_4

VNI_1

VNI_2

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

VNI_3

VNI_4

VNH_1

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

VNH_2

VNH_3

VNH_4

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

VBC_1

VLS_1

PNI_1

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

PNI_3

PNH_1

PNH_3

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

PBC_1

PLS_1

PPB_1

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

PAT_1

VAA_1

VAC_1

Figura 6-3. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal

PVA_1

6.2.2.3 Nivel de diseño sísmico

El nivel de diseño sísmico de un puente es el segundo parámetro de mayor importancia después del sistema estructural principal. Este parámetro define el nivel de resistencia y seguridad del puente y determina hasta cierto grado si el mecanismo de colapso del puente es de tipo frágil o dúctil. Para efectos de este estudio se clasifican los niveles de diseño sísmico en dos categorías:

- Diseño para cargas gravitacionales únicamente (DG).
- Diseños que se han realizado considerando las especificaciones sísmicas modernas (DS)

Cada uno de los puentes se debe clasificar en uno de estos niveles de diseño. Este parámetro se asigna a partir de diferentes variables como lo son el año de construcción (disponible sólo en algunos puentes), presencia de llaves de cortante externas e internas, dimensiones mínimas de elementos estructurales de la subestructura, y tipo de corredor vial, entre otros.

Diseño gravitacional (DG) **Diseño Sísmico (DS)**

Figura 6-4. Parámetro taxonómico: Nivel de diseño sísmico

6.2.2.4 Tipo de suelo

El tipo de suelo o perfil de suelo en el que se ubica cada puente determina la condición de interacción suelo-estructura y afecta el comportamiento estructural en dos factores: el tipo de condición de apoyo de elementos verticales (empotrado, articulado o con rigidez traslacional o rotacional) para la modelación y el tipo de señales sísmicas a utilizar en el análisis de vulnerabilidad (señales representativas de suelo duro, medio o blando). Este parámetro se usa en combinación con el parámetro relacionado con la cimentación para establecer las condiciones finales de apoyo del puente. Por ejemplo, si se tiene un sistema de cimentación masivo en una zona de suelo rocoso o duro se puede considerar una cimentación empotrada para la modelación. Por el contrario, una cimentación superficial en suelo blando correspondería a un apoyo articulado y flexible. Finalmente, una cimentación profunda en un suelo blando puede en algunos casos proporcionar la rigidez suficiente para considerarse empotrado o con apoyos flexibles traslacionales o rotacionales. Con respecto al tipo de señales, se tiene que, si el puente está ubicado en suelos blandos, el contenido frecuencial y el nivel de amplitudes se va a ver afectado por amplificaciones de los depósitos, evento que no ocurre en suelos duros.

El tipo de suelo (TS) se puede clasificar en las siguientes categorías:
Suelo Duro $\left[\overline{V_s} \geq 760\frac{m}{s}\right]$ (SD)
Suelos Intermedios $\left[180\frac{m}{s} \leq \overline{V_s} < 760\frac{m}{s}\right]$ (SI) o
Suelo Blandos $\left[\overline{V_s} < 180\frac{m}{s}\right]$ (SB)

6.2.2.5 Número de luces

El número de luces de un puente influencia el comportamiento sísmico pues es un indicador del tamaño del puente y de la capacidad longitudinal y transversal de resistencia a cargas laterales. Una luz se considera como la distancia entre los centroides de los ejes, como se puede ver en la Figura 6-5.

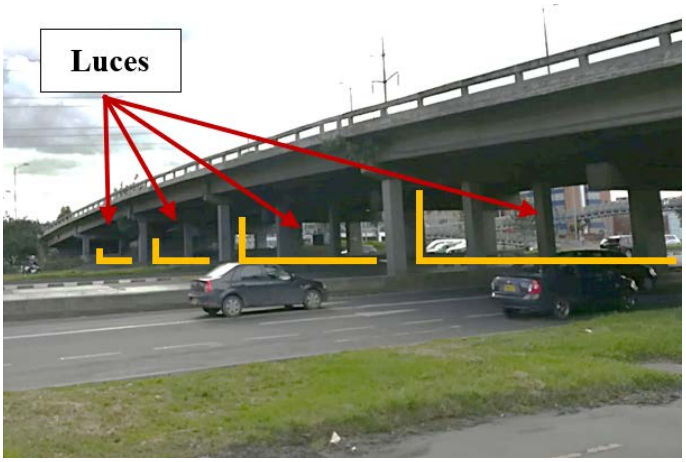


Figura 6-5. Parámetro taxonómico: Número de luces

El número de luces (NL) se representa mediante un número entero igual o superior a 1.

6.2.2.6 Número de elementos verticales eje

Este parámetro se refiere al número de pilas o muros que se encuentran alineados sobre un eje, entendiendo por eje un grupo o pilas alineadas de forma perpendicular al tablero del puente o paralela al esviaje que pueda presentar el mismo. En la Figura 6-6 se puede observar un ejemplo en el cual se tiene cuatro elementos verticales por eje.

Figura 6-6. Parámetro taxonómico: Número de elementos verticales eje

El número de elementos verticales (NV) se representa mediante un número entero igual o superior a 1.

6.2.2.7 Tipo de cimentación

El tipo de cimentación se refiere al sistema estructural con el cual está cimentado el puente. En la mayoría de los casos se tienen cimentaciones profundas con sistemas de pilotes, aunque es posible encontrar sistemas superficiales tipo zapatas en puentes pequeños. Este parámetro tiene una gran incertidumbre asociada pues la única manera de determinarlo con un buen nivel de confiabilidad es a partir de los planos estructurales, sin embargo, esta información no se tiene para la totalidad de los puentes.

El tipo de cimentación (TC) se puede clasificar como: Superficial (CS) o Profunda (CP).

6.2.2.8 Esviaje

El ángulo de esviaje corresponde al ángulo de inclinación de la junta inicial del puente con la vía o rampa de acceso. Cuando la junta es perpendicular a la vía de acceso, se indica que tiene esviaje cero o no tiene. En la Figura 6-7 se puede observar un ejemplo de un puente cuyo esviaje es diferente de cero.

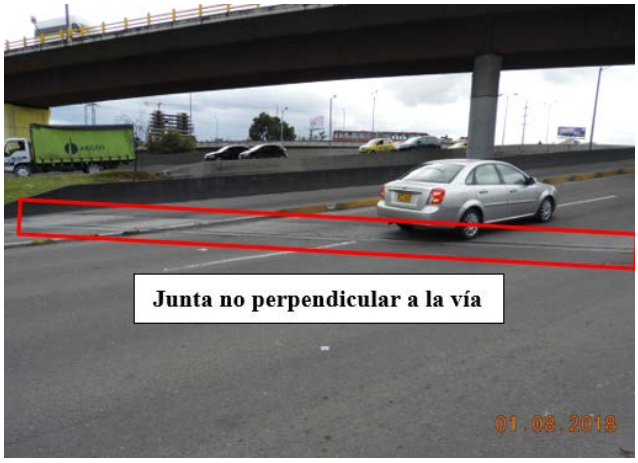


Figura 6-7. Parámetro taxonómico: Esviaje

El Esviaje (ES) se puede clasificar como: Sin Esviaje (SE) Con Esviaje (CE).

6.2.2.9 Estado estructural

El estado estructural de un puente se refiere a la condición de daño o presencia de patologías en los componentes estructurales, y hace referencia principalmente a aquellos elementos estructurales principales que puedan afectar el comportamiento sísmico esperado del puente (no a elementos no estructurales, estado del asfalto, barandas y otros elementos no vitales para la estabilidad general de la estructura). Una mala condición estructural está caracterizada generalmente por desprendimiento del concreto de recubrimiento, refuerzo expuesto o fisuras visibles entre otros indicadores. Este parámetro se obtiene para cada uno de los puentes a partir de la inspección básica realizada como parte del presente proyecto. Un ejemplo de un puente calificado con estado estructural malo (EM) se puede identificar en la Figura 6-8.

Figura 6-8. Parámetro taxonómico: Estado estructural

El estado estructural del puente (EE) se puede clasificar como: Estado Bueno (EB), Estado Aceptable (EA), Estado Regular (ER) o Estado Malo (EM).

6.2.2.10 Curvatura horizontal

La curvatura horizontal de un puente se refiere al cambio de dirección del tablero en el sentido longitudinal, como se puede ver en la Figura 6-9. Un puente con este tipo de curvatura puede tener una afectación en el comportamiento sísmico en su sentido longitudinal.

Figura 6-9. Parámetro taxonómico: Curvatura horizontal.

La curvatura horizontal (CH) se puede clasificar como: Con Curvatura Horizontal (CH), Sin Curvatura Horizontal (SH).

6.2.2.11 Curvatura vertical

La curvatura vertical se refiere al cambio de pendiente en el superestructura como se puede ver en la Figura 6-10. Esta curvatura hace variable la altura de los elementos verticales de la subestructura, generando posibles sobre esfuerzos de corte en los elementos de menor altura. Es común que exista en puentes de varias luces sobre vía.

Figura 6-10. Parámetro taxonómico: Curvatura vertical

La curvatura vertical (CV) se puede clasificar como: Con Curvatura vertical (CV), Sin Curvatura Vertical (SV).

6.2.2.12 Reforzamiento sísmico previo

El reforzamiento sísmico indica si el puente ha sido objeto de algún tipo de intervención estructural. Este parámetro es fundamental, pues en caso de que un puente haya sido reforzado, su comportamiento sísmico no será el mismo que una estructura con el mismo sistema estructural que haya sido diseñada originalmente cumpliendo los requerimientos del código. Considerando que la clasificación del sistema estructural del puente (ver numeral 6.2.2) incluye todos los componentes originales y construidos como parte de un reforzamiento previo, la indicación que un puente determinado ha tenido un reforzamiento afectará negativamente la vulnerabilidad final del puente, en comparación con un puente equivalente nuevo. La mejor forma de identificar si un puente ha sido reforzado es a partir de planos estructurales o registro de los contratos de reforzamiento. Sin embargo, en algunos casos es posible identificarlo a partir de fotografías, como se puede identificar en la Figura 6-11.

Figura 6-11. Parámetro taxonómico: Reforzamiento sísmico

El reforzamiento sísmico previo se puede clasificar como: Sin Reforzamiento (SR), Con Reforzamiento (CR).

6.2.2.13 Número de elementos horizontales

El número de elementos horizontales (NH) se refiere al número de vigas que se encuentran entre ejes. Estos elementos distribuyen tanto las cargas verticales como las cargas horizontales a la subestructura. Usualmente su comportamiento en caso de sismo se mantiene en el rango lineal, aunque resulta importante considerar la rigidez que aportan al sistema. En el caso particular de los puentes vehiculares Prototipo Bogotá se define que la cercha forma una única viga.

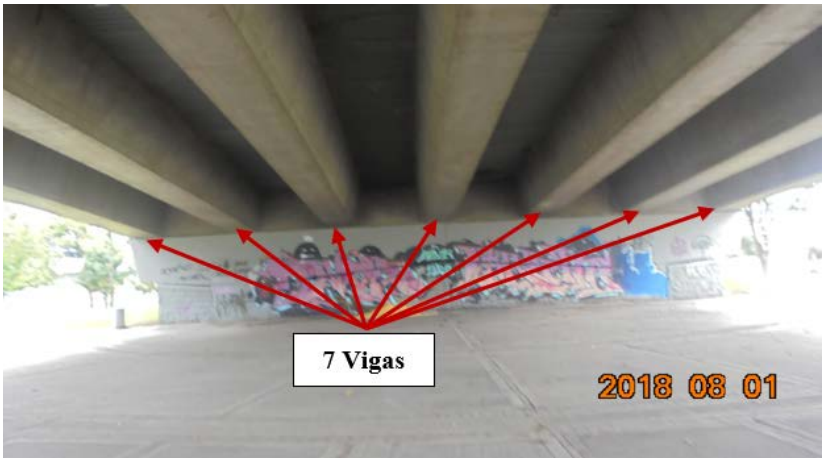


Figura 6-12. Parámetro taxonómico: Número de elementos horizontales

El número de elementos horizontales (NH) se representa mediante un número entero igual o superior a 1.

6.2.3 Puentes arquetipo

A partir de la calificación taxonómica se establecen grupos de puentes con características estructurales similares (mismo código taxonómico). Estos grupos pueden ser representados estructuralmente por un puente existente con características específicas, al cual se le llama puente arquetipo. Este puente representa en geometría, cargas gravitacionales, cargas sísmicas y comportamiento estático y dinámico al grupo de puentes correspondiente. El puente arquetipo se utiliza para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad con la metodología descrita en el numeral 6.2.1. Para los grupos de puentes más representativos se realizan análisis más detallados teniendo en cuenta posibles variaciones geométricas y de diseño con el objetivo de lograr una mejor representación del grupo de puentes y cuantificar de mejor manera la incertidumbre general de la vulnerabilidad correspondiente. El concepto de puente arquetipo se puede asociar al concepto de edificación índice descrito por D'Ayala (2015).

En el presente caso de estudio se definieron los primeros dos parámetros de la taxonomía como los parámetros principales y los siguientes 10 como parámetros secundarios, como se puede identificar en la Figura 6-13. Los parámetros principales son aquellos que se varían inicialmente para encontrar un espectro adecuado de funciones de vulnerabilidad mientras que los parámetros secundarios se asignan de acuerdo con los valores más probables que resulten del análisis de la información de la base de datos.

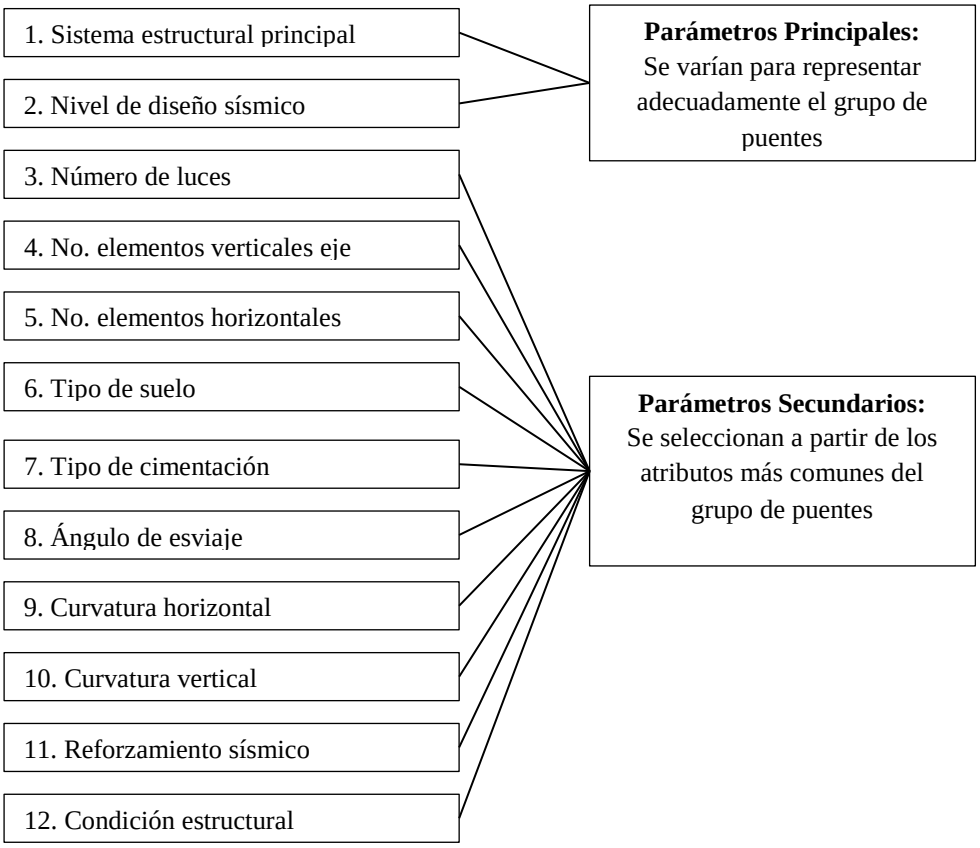


Figura 6-13. Tipos de parámetros en taxonomía

6.2.4 Señales sísmicas para el análisis dinámico

Con el fin de seleccionar las señales adecuadas para el análisis se realiza un proceso de desagregación sísmica en la ciudad de Bogotá. Para esto se escoge como punto de análisis la Plaza de Bolívar y se obtiene los resultados tanto para la aceleración en el terreno (PGA) como para un periodo estructural de 0.5 segundos (Sa, T=0.5seg), ambos para un periodo de retorno de 1000 años. En la Figura 6-14 se pueden observar los valores de la desagregación realizada. Se puede identificar que el tipo de fuente más importante para Bogotá es de tipo cortical, la cual concentra alrededor del 85% de contribución mientras que fuentes de subducción lejanas representan cerca del 15% de contribución.

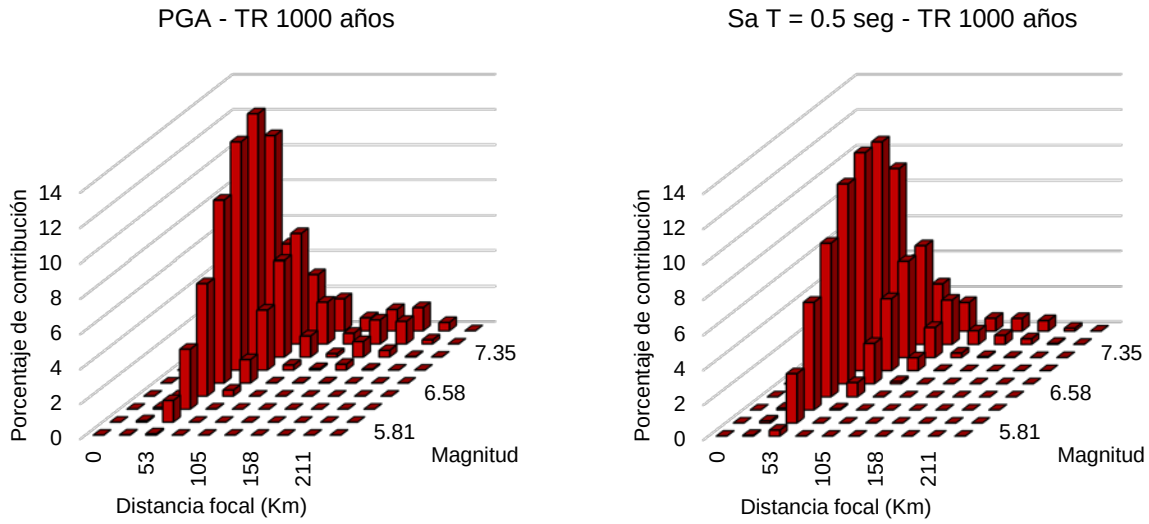


Figura 6-14. Desagregación Sísmica para Bogotá

Teniendo en cuenta estos datos se eligieron un total de 33 señales, de las cuales 27 provienen de fuentes corticales y 6 de fuentes de subducción. Estas señales representa la sismicidad de la zona de estudio, las señales corticales y sus características se presentan en la Tabla 6-3 y las señales de subducción se presentan en la Tabla 6-4.

Tabla 6-3. Señales corticales

Nombre	Evento	Tipo de Falla	Red	PGA	Distancia Focal	Magnitud
C01-1	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.100	54.3	7.6
C01-2	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.092	54.3	7.6
C02-1	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.079	58.4	7.6
C02-2	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.079	58.4	7.6
C03-1	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.106	50.6	7.6
C03-2	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.095	50.6	7.6
C04-1	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.137	54.3	7.6
C04-2	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.126	54.3	7.6
C05-1	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.127	55.6	7.6
C05-2	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.139	55.6	7.6
C06-1	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.062	72.6	7.6
C06-2	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.090	72.6	7.6
C07-1	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.107	54.3	7.6
C07-2	Chi-Chi_ Taiwan	Cortical	PEER	0.114	54.3	7.6
C08-1	El Mayor-Cucapah_ Mexico	Cortical	PEER	0.092	55.0	7.2
C08-2	El Mayor-Cucapah_ Mexico	Cortical	PEER	0.079	55.0	7.2
C09-1	Hector Mine	Cortical	PEER	0.121	74.0	7.1
C09-2	Hector Mine	Cortical	PEER	0.088	74.0	7.1
C10-1	Kocaeli_ Turkey	Cortical	PEER	0.253	69.6	7.5
C10-2	Kocaeli_ Turkey	Cortical	PEER	0.188	69.6	7.5
C11-1	Kocaeli_ Turkey	Cortical	PEER	0.098	60.4	7.5
C11-2	Kocaeli_ Turkey	Cortical	PEER	0.108	60.4	7.5
C12-1	Landers	Cortical	PEER	0.120	69.2	7.3

Tabla 6-3. Señales corticales

Nombre	Evento	Tipo de Falla	Red	PGA	Distancia Focal	Magnitud
C12-2	Landers	Cortical	PEER	0.146	69.2	7.3
C13-1	Landers	Cortical	PEER	0.079	79.8	7.3
C13-2	Landers	Cortical	PEER	0.096	79.8	7.3
C14-1	Manjil_ Iran	Cortical	PEER	0.141	75.6	7.4
C14-2	Manjil_ Iran	Cortical	PEER	0.219	75.6	7.4
C15-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.147	56.1	7.3
C15-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.165	56.1	7.3
C16-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.152	56.0	7.3
C16-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.146	56.0	7.3
C17-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.134	55.9	7.3
C17-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.145	55.9	7.3
C18-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.119	55.8	7.3
C18-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.135	55.8	7.3
C19-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.111	55.8	7.3
C19-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.122	55.8	7.3
C20-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.111	55.9	7.3
C20-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.125	55.9	7.3
C21-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.111	56.0	7.3
C21-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.118	56.0	7.3
C22-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.124	56.2	7.3
C22-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.141	56.2	7.3
C23-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.162	56.7	7.3
C23-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.178	56.7	7.3
C24-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.128	55.6	7.3
C24-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.188	55.6	7.3
C25-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.134	56.2	7.3
C25-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.150	56.2	7.3
C26-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.147	57.1	7.3
C26-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.234	57.1	7.3
C27-1	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.163	54.0	7.3
C27-2	Taiwan SMART1(45)	Cortical	PEER	0.175	54.0	7.3

Tabla 6-4. Señales subducción

Nombre	Evento	Tipo de Falla	Red	PGA	Distancia Focal	Magnitud
S01_1	1442AFRA	Subducción	CostaRica	0.284	156.7	7.60
S01_2	1442AFRA	Subducción	CostaRica	0.372	156.7	7.60
S02_1	T10A	Subducción	Chile1	0.626	103.2	7.70
S03_2	PB11	Subducción	Chile1	0.233	128.8	7.70
S04_1	Constitución	Subducción	Chile2	0.526	145.7	8.80
S04_2	Constitución	Subducción	Chile2	0.346	145.7	8.80
S05_1	Curicó	Subducción	Chile2	0.477	197.5	8.80
S05_2	Curicó	Subducción	Chile2	0.192	197.5	8.80
S06_1	Hualane	Subducción	Chile2	0.379	163.0	8.80
S06_2	Hualane	Subducción	Chile2	0.379	163.0	8.80
S07_1	Mejillones	Subducción	Chile2	0.418	118.0	7.70
S07_2	Mejillones	Subducción	Chile2	0.454	118.0	7.70

Estas señales fueron divididas en tres grupos con el objetivo de caracterizar los diferentes tipos de suelos presentes en la ciudad de Bogotá. Dado que todas las señales presentadas anteriormente fueron registradas en roca firme, es necesario obtener la respuesta en superficie luego de procesarlas mediante un análisis unidimensional de respuesta dinámica en perfiles de suelo representativos. Por esta razón se eligen cinco perfiles en suelos blandos y cinco perfiles en suelos intermedios seleccionadas entre las 104 perforaciones que se obtuvieron del estudio de microzonificación sísmica llevado a cabo por la Universidad de los Andes (2006). La velocidad de onda cortante y profundidad para cada uno de estos se presentan en la Figura 6-15 y Figura 6-16 respectivamente.

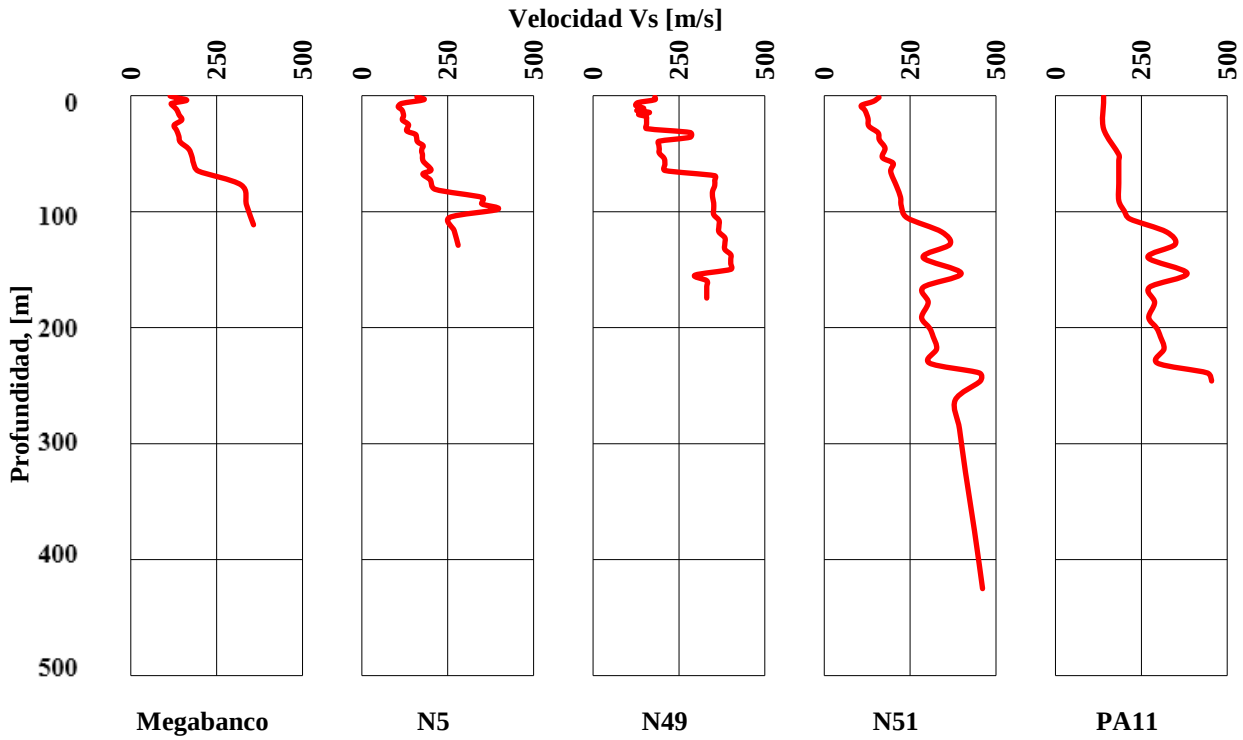


Figura 6-15. Perfiles Bogotá suelos blandos

Velocidad Vs [m/s]

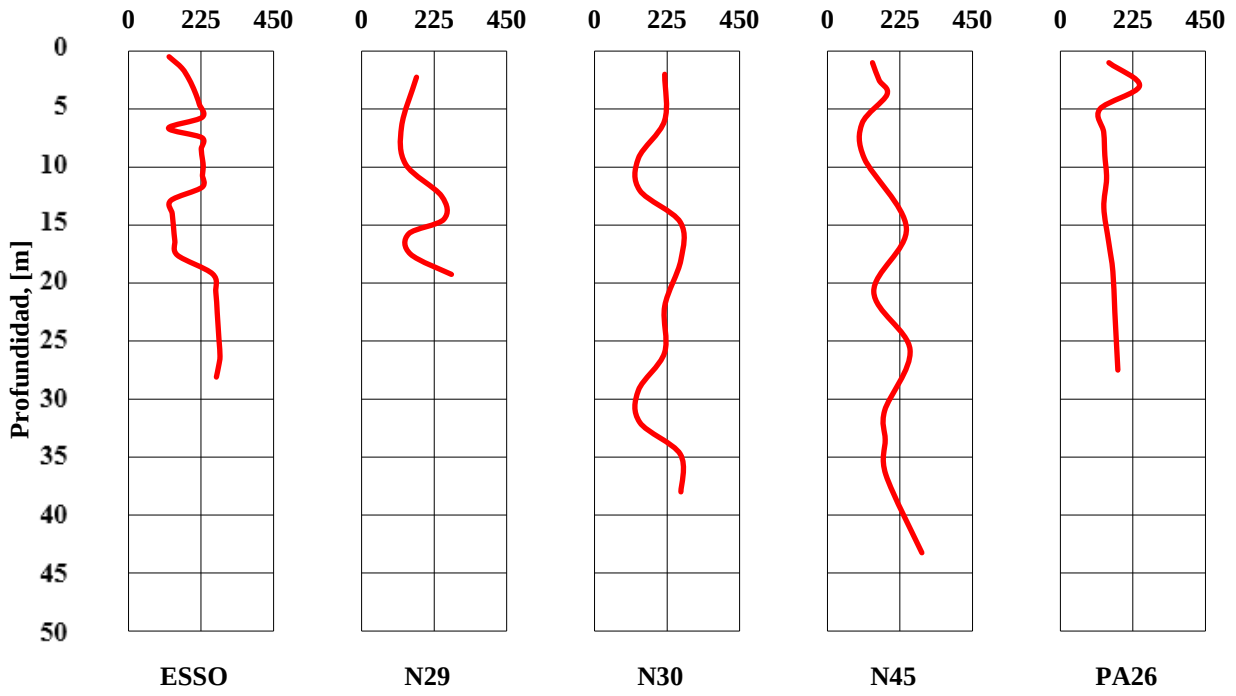
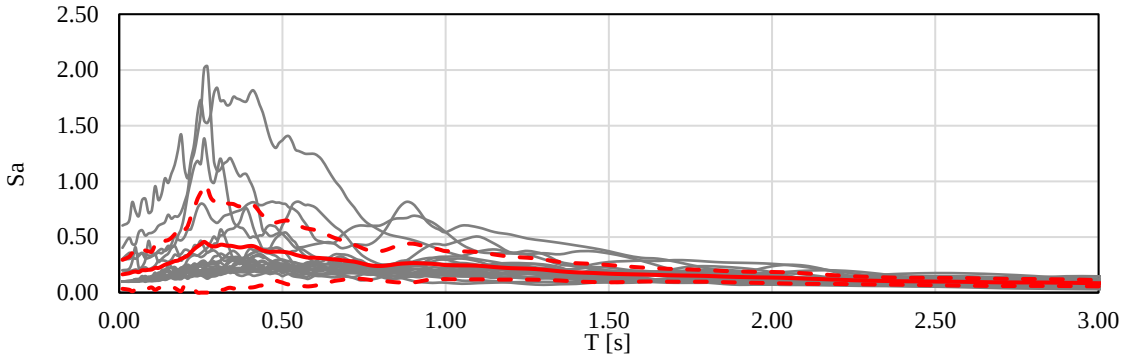


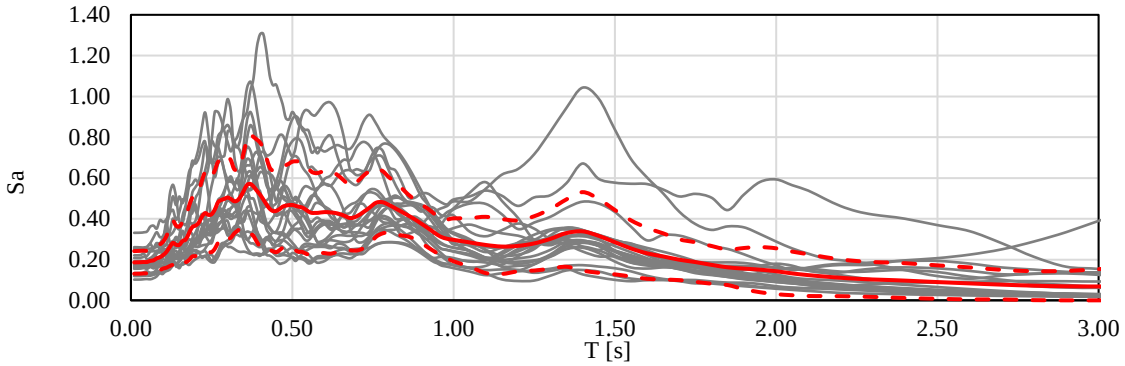
Figura 6-16. Perfiles Bogotá suelos intermedios

A partir de los perfiles mencionados anteriormente se analiza la respuesta en cada uno de estos para obtener las señales en superficie. Como resultado se tiene un grupo en roca, un grupo en suelos intermedios y un grupo en suelos blandos, cada uno compuesto por 11 señales diferentes. Los espectros de estos grupos se pueden observar en la Figura 6-17.

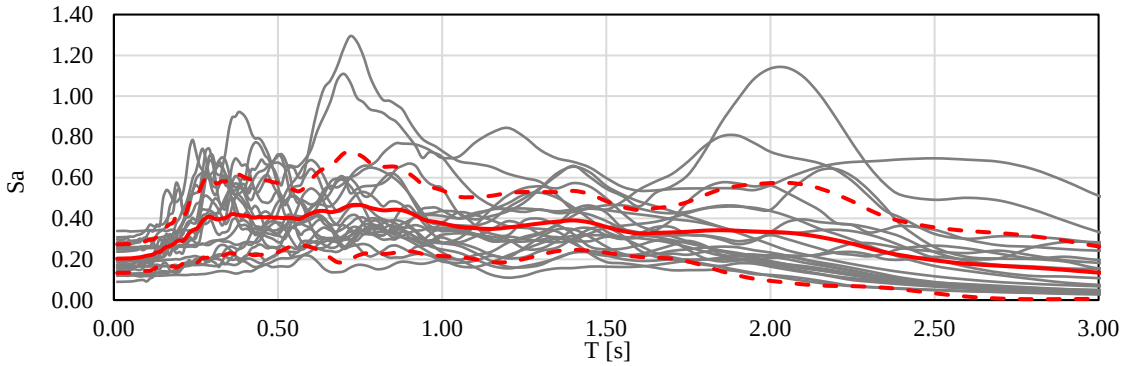
(Espacio en blanco intencional)



a) Señales en roca



b) Señales en suelos intermedios



c) Señales en suelos blandos

Figura 6-17. Espectros señales de análisis

6.2.5 Modelación no lineal

La modelación de cada uno de los puentes arquetipo se realiza con componentes no lineales con el objetivo de tener una representación adecuada del comportamiento de los puentes en condiciones reales. Los modelos realizados son tridimensionales y los componentes no lineales están modelados tanto en la dirección transversal como en la longitudinal.

La modelación computacional se lleva a cabo con el software libre OpenSees, producido por la Universidad de California, Berkeley. Este programa actualmente es considerado uno de los paquetes de software más potentes a nivel computacional por la cantidad de modelos disponibles para representar diferentes componentes con comportamiento no lineal particular.

En general, la realización del modelo analítico involucra las siguientes componentes:

- Modelo geométrico general del puente.
- Propiedades geométricas de las secciones de elementos principales.
- Tipos de apoyos en pilas, en estribos y conexiones especiales internas (juntas, apoyo del tablero en las pilas, neoprenos y otros detalles).
- Propiedades de materiales en particular del concreto, del acero, de los apoyos o conexiones internas y de los apoyos elásticos equivalentes del suelo.
- Evaluación de cargas incluyendo cargas muertas debidas a peso propio y a sobrecargas permanentes (carpeta de rodadura, barandas de contención, etc.), y cargas sísmicas.

Por otra parte, el análisis de resultados del modelo incluye los siguientes análisis:

- Análisis de modos de vibración.
- Efectos internos en los elementos para carga muerta con carga viva de servicio.
- Análisis no lineal estático.
- Análisis no lineal dinámico.
- Obtención de parámetros de demanda sísmica.

La descripción detallada de los parámetros para la modelación de los diferentes componentes estructurales y el comportamiento característico de cada uno de estos se presenta más adelante en el numeral 6.5.

6.2.6 Obtención de parámetros de demanda sísmica

A partir del análisis no lineal dinámico de cada uno de los modelos es posible obtener los Parámetros de Demanda Sísmica (PDS). Estos parámetros se refieren a las diferentes medidas del comportamiento observado en el modelo matemático, por ejemplo: derivas, desplazamientos relativos, aceleraciones absolutas, rotaciones, demanda de curvatura, etc. Los PDS se utilizan para correlacionar el nivel de daño de los elementos críticos del puente. Por ejemplo, para los neoprenos y llaves de cortante internas y externas usualmente se utiliza como parámetro de demanda sísmica el desplazamiento relativo de apoyos mientras que para las columnas o muros se utiliza la demanda de ductilidad a la curvatura. Para obtener estos parámetros se realiza un Análisis Incremental Dinámico (IDA) (Vamvatsikos & Cornell, 2002) que consiste en escalar progresivamente cada señal según un parámetro de medida de intensidad determinado. Los diferentes parámetros y consideraciones utilizados en este proyecto se especifican en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Parámetros análisis incremental dinámico

Número de señales	21
Parámetro de escalamiento	Sa(T=0.5 seg)
$\Delta_{escalada}$	0.2 g
Mínimo valor de escala	0.2 g
Máximo valor de escala	2.00 g

6.2.7 Modelo de componentes

Para cada uno de los puentes arquetipo se realiza un modelo de componentes el cual incluye la totalidad de componentes susceptibles a daño. Cada uno de estos componentes se asocia con una función de fragilidad la cual incluye la siguiente información básica:

- Tipo, descripción del componente y unidad de medida o tamaño de referencia
- Curvas de fragilidad para diferentes estados de daño
- Funciones de probabilidad de costos y tiempos de reparación para cada estado de daño.

En la Tabla 6-6 se presenta una lista típica de componentes de un puente característico en Bogotá. Cada uno de los campos hace referencia a:

- Luz: identifica la luz en la que se encuentra el componente y que se vería afectada si éste falla. Este parámetro permite incluir el costo del tablero en caso de que colapse.
- ID Eje: hace referencia al eje del puente en el que se encuentra ubicado el componente.
- Tipo: corresponde al grupo al que pertenece el componente de análisis (C son columnas o muros, BT son neoprenos, SK llaves de cortante y BF estribos).
- Componente: describe el componente del modelo, específicamente en su calidad de diseño.
- Tamaño: para los neoprenos corresponde a su altura y para los demás componentes, a su volumen. Este parámetro debe ser consistente con la unidad en que se encuentren las fragilidades asociadas, dado que los precios son unitarios.
- Cantidad: está asociado con el número de componentes presentes en el modelo. Debido a que cada componente en el caso mostrado tiene parámetros de demanda sísmica específicos, se deben tomar siempre como independientes y no como un grupo, y por lo tanto se define este valor como 1.
- Función de fragilidad: especifica la función que describe la probabilidad de daño de cada componente dada una demanda sísmica. En la Tabla 6-6 se incluyen todas las funciones de fragilidad utilizadas en el marco del presente proyecto.
- PDS: es el parámetro de demanda sísmica asociado con el daño del elemento.

Tabla 6-6. Ejemplo modelo de componentes

Luz	ID Eje	Tipo	Componente	Tamaño	Cantidad	Función Fragilidad	PDS
1_2	E2	C	Columna diseñada sísmicamente	3.906 m^3	1	P.COL.07_3	DuctCurvature
3_4	E4	C	Columna diseñada sísmicamente	6.398 m^3	1	P.COL.07_6	DuctCurvature
1	E2	BT	Neopreno de baja calidad	0.105 m	1	P.NEO.02_2	Displacement
4	E4	BT	Neopreno de baja calidad	0.105 m	1	P.NEO.02_2	Displacement
1	E1	SK	Tope sísmico	0.56 m^3	1	P.LLA.03_1	Displacement
2	E2	SK	Tope sísmico	0.135 m^3	1	P.LLA.03_2	Displacement
1	E1	BF	Estribo	13.2912 m^3	1	P.EST.03_1	Displacement
4	E8	BF	Estribo	13.2912 m^3	1	P.EST.03_1	Displacement

6.2.8 Procedimiento de integración de costos de reparación para evaluación de la vulnerabilidad

Una vez definidos cada uno de los esquemas de reparación y sus costos unitarios asociados como se presenta en el numeral 6.2.7, se procede a hacer la integración con el modelo de componentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los puentes. Para esto, se sigue el procedimiento que se describe a continuación:

1. Definición del modelo de componentes: se define un modelo base que incluye los diferentes componentes susceptibles a daño para cada tipología y se definen los parámetros característicos de cada componente. El modelo base debe ser organizado por grupos de componentes cuyo daño está relacionado con un parámetro de demanda sísmica definido y estos deben organizarse a su vez por ejes o luces para evaluar la posibilidad de colapso de varios elementos a la vez.
2. Asignación de fragilidades a componentes: a cada componente del modelo se le asocia una función de fragilidad determinada y los correspondientes costos unitarios asociados a la unidad de medida.
3. Evaluación del nivel de daño y costos de reparación por componentes: para diferentes niveles de intensidad sísmica se evalúa el nivel de daño de cada componente utilizando para el efecto los parámetros de demanda sísmica y las funciones de fragilidad definidas. La integración de costos de reparación para los diferentes niveles de daño se lleva a cabo mediante el software FUNVUL-BRIDGES V1.0 siguiendo la metodología descrita en el numeral 6.2.9.
4. Verificación de colapso en cada luz: el estado de daño de colapso en alguno de los componentes susceptibles a daño (columna, neopreno o estribo) puede generar el colapso de una luz completa del tablero en la superestructura. Las pérdidas económicas asociadas dependen entonces del número de luces colapsadas y el valor de reposición de una luz en máximo daño. El costo de reposición de luz se calcula teniendo en cuenta las actividades de reposición mencionadas en el numeral 5.6 utilizando para el efecto valores de reconstrucción.
5. Cálculo de costos de reparación del puente de elementos en luces no colapsadas: se debe calcular el costo de reparación de los elementos dañados y que pertenecen a grupos de elementos que no hayan presentado el colapso de alguna de las luces adyacentes.
6. Costo final de reparación: el costo final de reparación se calcula como la sumatoria de los siguientes valores:
    a. Todos los costos relacionados con el cálculo de colapso de luces individuales.
    b. El valor de reparación directa de componentes que quedaron afectados pero que aún tienen posibilidad de ser reparados.

c. "Actividades adicionales de reparación", las cuales incluyen la evaluación y diagnóstico para definición de estado de daño, diseño de reforzamiento/reparación de elementos, entre otros.

Este procedimiento permite obtener el valor de reparación de un puente tras un evento sísmico particular que corresponden a las pérdidas económicas esperadas. Las evaluaciones para cada tipología y caso de análisis se llevan a cabo con el software FUNVUL-BRIDGE V1.0 (www.ecapra.org). Este procedimiento se integra al procedimiento más general que se explica en 6.2.9.

6.2.9 Cálculo de funciones de vulnerabilidad

De acuerdo con Yamin et al (2017) y el documento FEMA P-58 (2012) la función de distribución de probabilidad (PDF por sus siglas en inglés) de pérdidas para una intensidad sísmica dada se representa por la siguiente ecuación:

$$\Pr(P > p_i | IP = ip_i) = \int_{EDP} \int_{DS} \Pr(P > p_i | DS = ds_i)\, f_{DS}(DS|EDP = edp_i) f_{EDP}(EDP|IP = ip_i) dDS dEDP$$

En donde $\Pr(P > p_i | IP = ip_i)$ representa la probabilidad de que una pérdida P sea mayor a un valor p_i, dado un parámetro de intensidad IP que toma un valor igual a ip_i. El término $\Pr(P > p_i | DS = ds_i)$ es la probabilidad que una pérdida P sea mayor a un valor p_i considerando que un estado de daño ds_i sea alcanzado. El término $f_{DS}(DS|EDP = edp_i)$ es la función de densidad de probabilidad (PDF por sus siglas en inglés) del estado de daño ds_i dado un parámetro de demanda sísmico (EPD por sus siglas en inglés) que toma un valor edp_i. Por último $f_{EDP}(EDP|IP = ip_i)$ es el PDF del EDP dado que el parámetro de intensidad IP toma un valor ip_i. Este análisis se debe realizar para cada una de las diferentes señales y escaladas analizadas.

En la ecuación anterior la probabilidad que un componente k excede un estado de daño ds_i se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Pr(DS_i = ds_i | EDP_j = edp_j) = \Pr(DS_i > ds_i | EDP_j = edp_j) - \Pr(DS_{i+1} > ds_{i+1} | EDP_{j+1} = edp_{j+1})$$

En donde $\Pr(DS_i > ds_i | EDP_j = edp_j)$ correpsonde a la probabilidad de que un compnente k esté en un estado de daño mayor a ds_i dado que el EDP_i tome un valor edp_i y $\Pr(DS_{i+1} > ds_{i+1} | EDP_{j+1} = edp_{j+1})$ es la probabilidad de que un componente k esté en un estado de daño mayor a ds_{i+1} dado que EDP_j tome un valor igual a edp_j. Entonces, $\Pr(DS_i > ds_i | EDP_j = edp_j)$ corresponde a la función de fragilidad para el estado de daño ds_i para el componente k como función del EDP. Se asume que las variables consideradas son independientes entre sí.

Teniendo en cuenta lo anterior, la integración de los costos de reparación se realiza a partir de simulaciones de Monte Carlo considerando todas las posibles fuentes de incertidumbre (para más detalles ver Yamin et

al (2017)). Se consideran incertidumbres asociadas al modelo analítico, a los parámetros de demanda sísmica obtenidos en el análisis, a los niveles de daño y a los costos de reparación. La incertidumbre asociada a las señales sísmicas se considera de manera explícita mediante el análisis del conjunto de señales presentado en el numeral 6.2.4. Esta metodología permite integrar los resultados de los análisis dinámicos no lineales del modelo computacional con el modelo de componentes susceptibles a daños de cada tipología. La metodología utilizada se resume en los diagramas de la Figura 6-18.

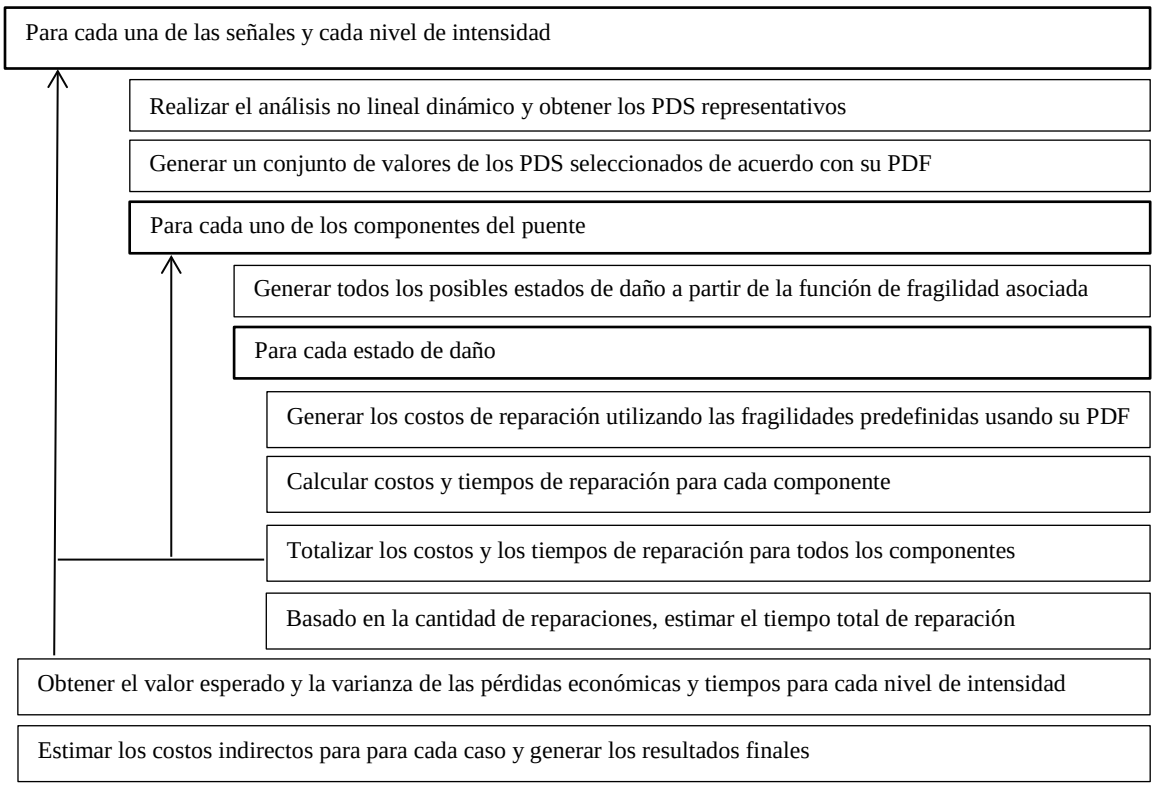


Figura 6-18. Procedimiento para la generación de curvas de vulnerabilidad a partir de simulaciones de Monte Carlo. Adaptado de Yamin et al (2017)

Una vez los resultados estén integrados, se pueden considerar las siguientes limitaciones, en relación al estado del puente para diferentes niveles de intensidad:

- Intensidad sísmica umbral de 0.2g por debajo de la cual no se esperan daños significativos en el puente.
- Derivas residuales máximas de 1.5% para considerar la necesidad de demoler la estructura y calificarla como de reposición total para ese nivel de intensidad
- Costos de reparación excesivos con respecto al costo de reposición total del puente (60%), caso en el cual se prefiere una sustitución integral de la estructura del puente.

El procedimiento descrito anteriormente está implementado en un software de cálculo llamado FUNVUL BRIDGES V1.0 disponible actualmente en www.ecapra.org. En la Figura 6-19 se puede observar una función de vulnerabilidad típica generada con este software. Vale la pena aclarar que las funciones

generadas son normalizadas con respecto al costo total de reposición del puente en estudio, con el fin de tener una función que relacione el porcentaje de daño con una intensidad sísmica para un rango consistente con el modelo de amenaza. En este caso las funciones se presentarán para un rango de aceleraciones entre 0 a 2.0 g.

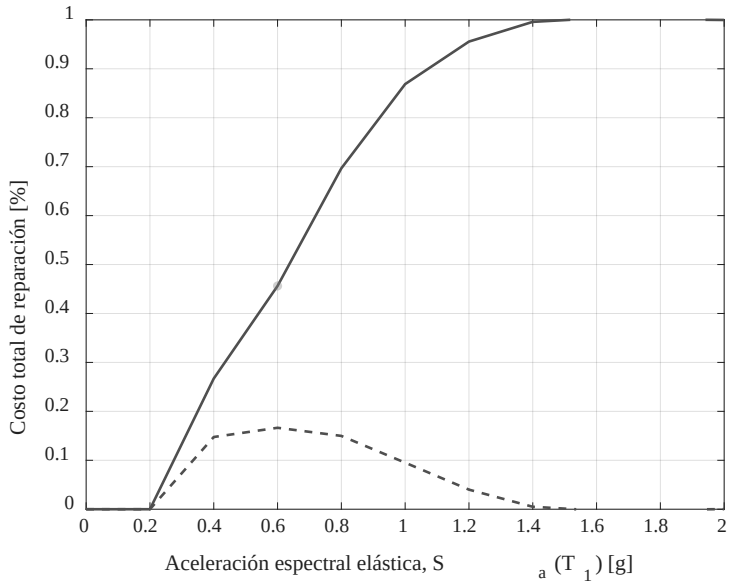


Figura 6-19. Ejemplo de curva de vulnerabilidad desarrollada con Funvul Bridges

6.3 REVISIÓN, DEFINICIÓN Y ASIGNACIÓN DE TIPOLOGÍAS

La asignación de tipologías se lleva a cabo a partir de varios levantamientos digitales realizados y la información existente en la base de datos. El sistema estructural se asignó a partir de una revisión puente a puente utilizando el registro fotográfico mediante la metodología que se resume en la Figura 6-20. La tipología estructural se asigna a partir de la caracterización de los 12 parámetros de la taxonomía. En la Figura 6-21 se pueden identificar las tipologías principales filtradas por el número de puentes y por el área construida, parámetros que controlan la acumulación de la exposición en determinadas tipologías. La definición de los atributos de la taxonomía se puede revisar en el numeral 6.2.2.

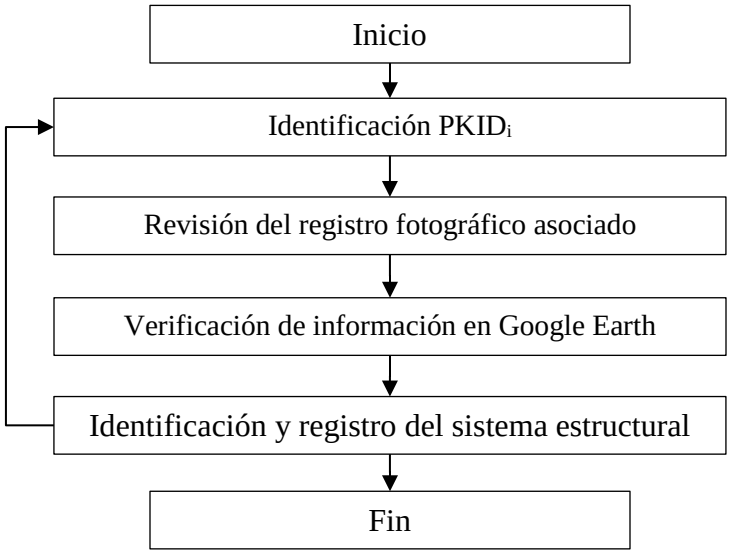


Figura 6-20. Metodología para la asignación del sistema estructural

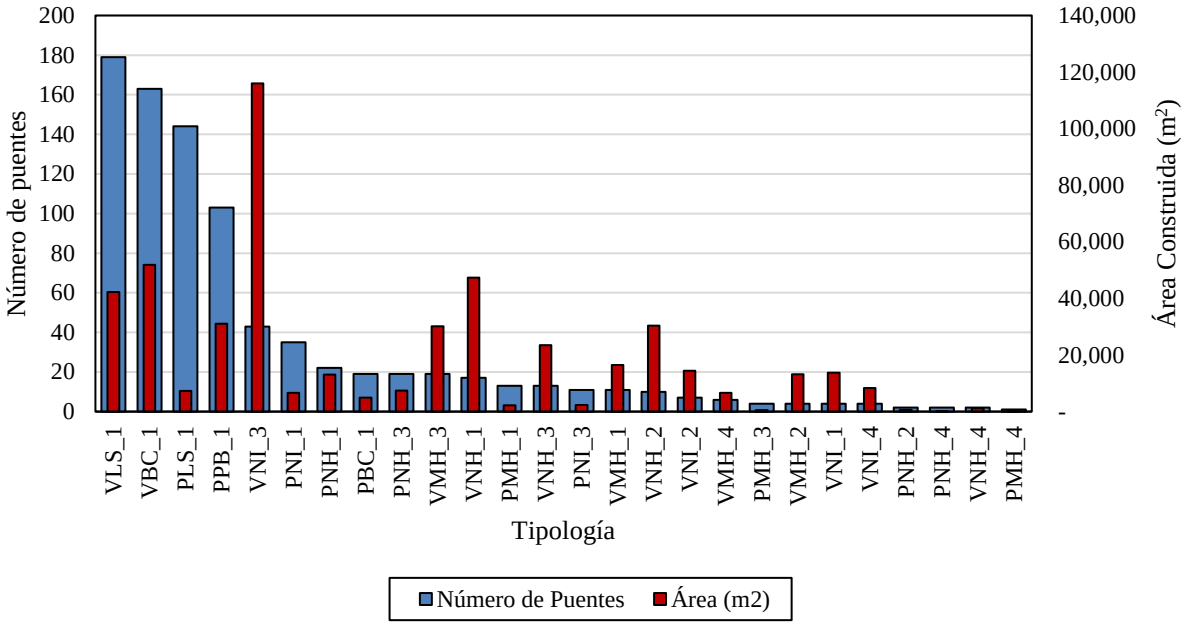


Figura 6-21. Caracterización del portafolio total

Adicionalmente se verifican por separado los resultados obtenidos para las tipologías de puentes vehiculares y peatonales. Esto permite identificar las tipologías predominantes y verificar la variación propia de cada sistema según se utilice como parámetro de medida el número de puentes o el área construida en planta. En la Figura 6-22 se pueden ver las distribuciones de tipologías de puentes vehiculares y en la Figura 6-23 las tipologías de puentes peatonales. Las figuras indican que la distribución relativa de tipologías predominantes difiere para los puentes vehiculares y peatonales según se utilice el criterio de número de puentes o área construida.

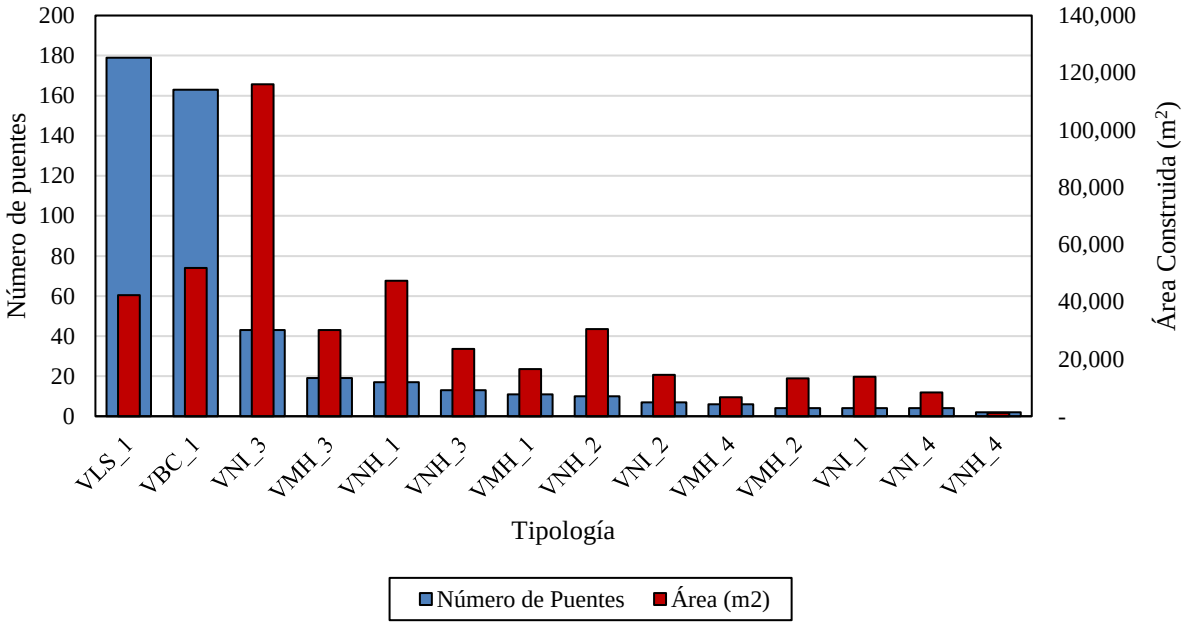


Figura 6-22. Caracterización del portafolio de puentes vehiculares

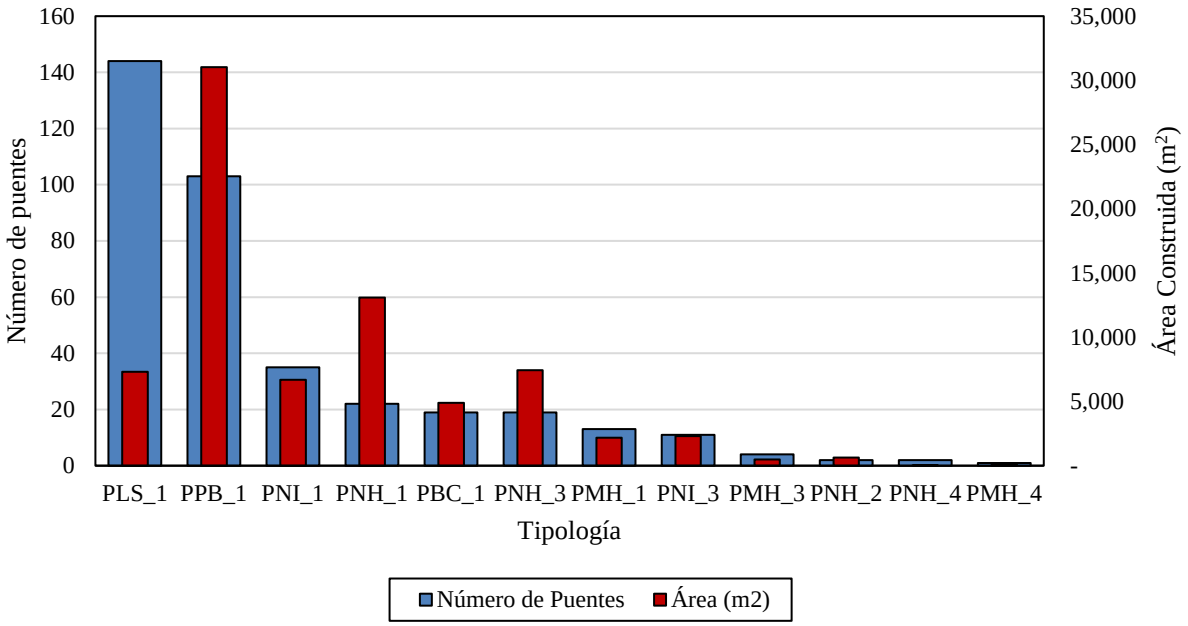


Figura 6-23. Caracterización del portafolio de puentes peatonales

6.4 IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES CRÍTICOS POR TIPOLOGÍA

La Tabla 6-7 resume los elementos identificados como susceptibles a daño para cada una de las tipologías del proyecto. Cada componente se incluye dentro de los modelos no lineales que se presentan en el numeral 6.6, a partir de los cuales se obtienen los parámetros de demanda sísmica para la obtención de las funciones de vulnerabilidad. Para las tipologías peatonales se consideran los mismos elementos susceptibles de daño que en las vehiculares.

Tabla 6-7. Tipologías representativas de puentes

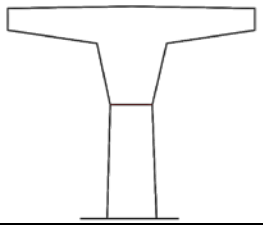
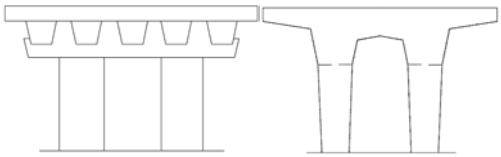
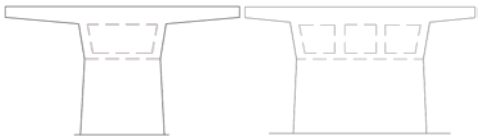
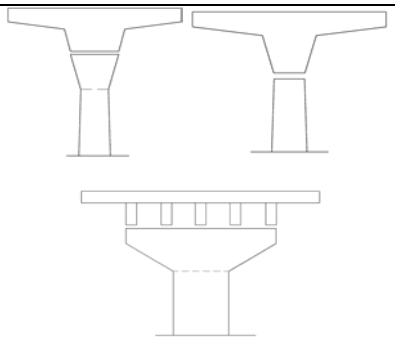
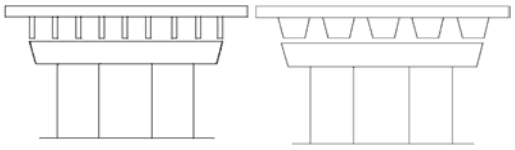
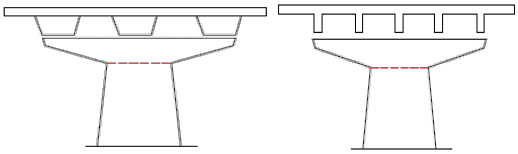
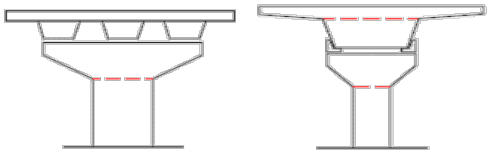
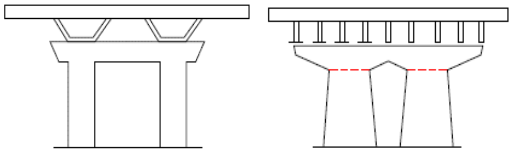
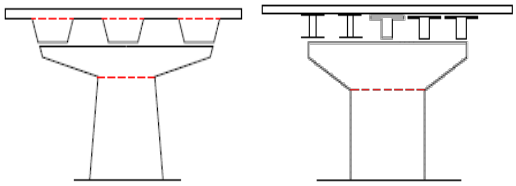
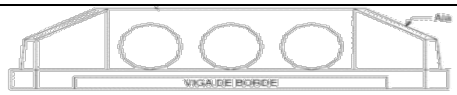
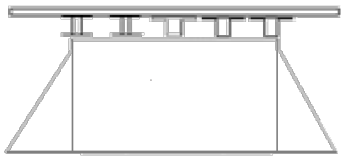
Tipología	Sección transversal	Elemento	PDS
VMH-1, VMH-2 y PMH-1		Columna longitudinal Columna transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal Neopreno Llave de cortante interna	μf_L μf_T δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VMH-3 y PMH-3		Columna longitudinal Columna transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal Neoprenos Llave de cortante interna	μfL μfT δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VMH-4 y PMH-4		Pantalla longitudinal Pantalla transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	D_L D_T δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VNI-1, VNI-2 y PNI-1		Tope sísmico Neopreno longitudinal Neopreno transversal Neopreno rotacional Pantalla longitudinal Pantalla transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) D_L D_T δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VNI-3 y PNI-3		Tope sísmico Neopreno longitudinal Neopreno transversal Neopreno rotacional Columna longitudinal Columna transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) μfL μfT δ (mm) δ (mm) δ (mm)

Tabla 6-7. Tipologías representativas de puentes

Tipología	Sección transversal	Elemento	PDS
VNI_4		Tope sísmico Neopreno longitudinal Neopreno transversal Neopreno rotacional Pantalla longitudinal Pantalla transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) D_L D_T δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VNH_1, VNH_2, PNH_1 y PNH_2		Tope sísmico Neopreno longitudinal Neopreno transversal Neopreno rotacional Pantalla longitudinal Pantalla transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) D_L D_T δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VNH_3 y PNH_3		Tope sísmico Neopreno longitudinal Neopreno transversal Neopreno rotacional Columna longitudinal Columna transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) µfL µfT δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VNH_4 y PNH_4		Tope sísmico Neopreno longitudinal Neopreno transversal Neopreno rotacional Pantalla longitudinal Pantalla transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) D_L D_T δ (mm) δ (mm) δ (mm)
VBC_1 y PBC_1		Pantalla longitudinal Pantalla transversal	D_L D_T
VLS_1 y PLS_1		Neopreno longitudinal Neopreno transversal Neopreno rotacional Estribo pasivo Estribo transversal	δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm) δ (mm)

6.5 DEFINICIÓN DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO NO LINEAL

6.5.1 Componentes susceptibles a daño

A partir de la información anterior se definen los elementos susceptibles a daño. Cada uno de ellos debe caracterizarse adecuadamente con el fin de conformar los modelos de análisis. En la Figura 6-24 se pueden identificar algunos de los componentes principales susceptibles a daños por eventos sísmicos y que hacen parte de los modelos de análisis. En los numerales que siguen se incluyen formatos específicos que resumen las propiedades y el comportamiento considerado en cada caso, con las referencias y demás información pertinente. Los elementos considerados en los modelos son los siguientes:

- Espaldar de estribos y rellenos compactos
- Llave de cortante externa
- Llave de cortante interna
- Columnas
- Pantallas
- Neoprenos

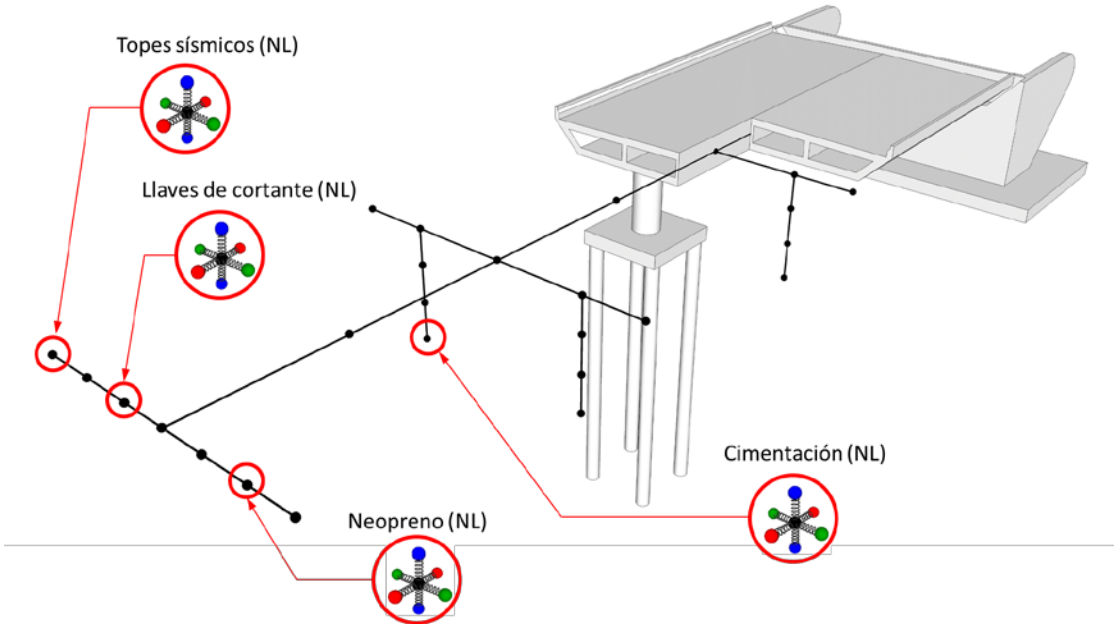


Figura 6-24. Componentes susceptibles a daño

6.5.2 Espaldar de estribos y rellenos compactados

El espaldar de los estribos y el relleno o "back-fill" se modeló teniendo en cuenta las propiedades del material de relleno y las propiedades geométricas del estribo. Para la validación del modelo se analizaron los resultados de experimentos realizados por Khalili-Tehrani et al (2016) obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 6-25. Como se puede observar los resultados obtenidos a partir del análisis contra el tiempo son cercanos al comportamiento obtenido en el ensayo. En la Figura 6-26 se presenta la curva envolvente utilizada en el modelo, el formato de caracterización del modelo utilizado se puede identificar en la Figura 6-27.

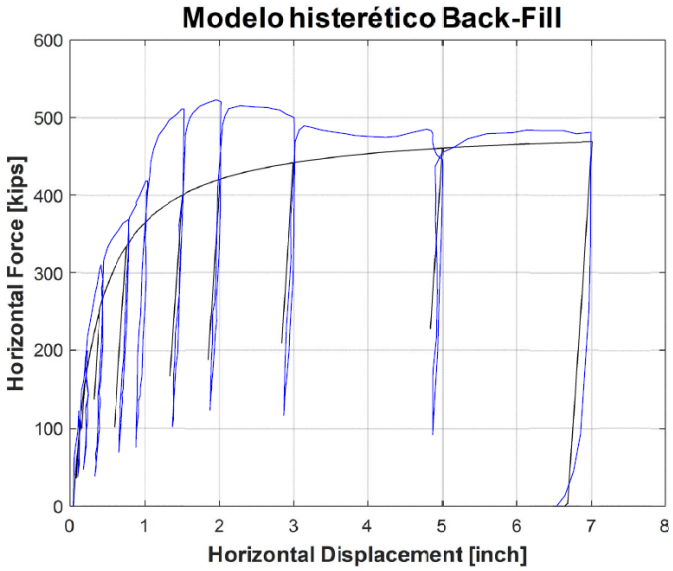


Figura 6-25. Validación modelo Relleno del estribo. Adaptado de Khalili-Tehrani et al (2016)

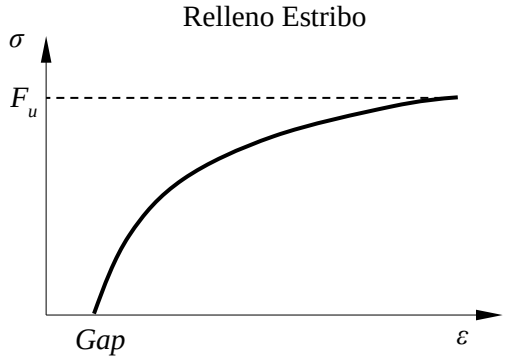
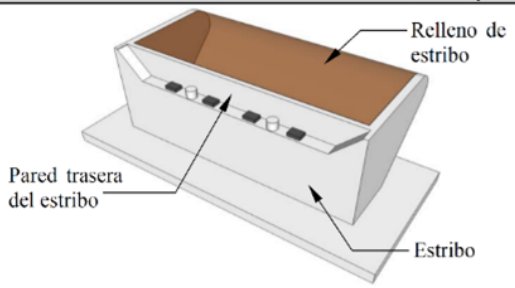


Figura 6-26. Envolvente modelo Relleno del estribo

Modelación de componentes de puentes en OpenSees



Nombre de Componente:	Relleno de estribo
Material:	Suelos competentes
Ubicación:	Detrás de los estribos externos del puente
Comportamiento:	No lineal

Parámetros de entrada

Parámetro	Descripción	Unidades	Observaciones
Name	Nombre del elemento para identificación en OpenSees	-	-
b	Ancho del estribo	m	-
H	Altura del muro de contención	m	Solo incluir altura a partir del Stemwall
c	Cohesión del material de relleno	kPa	-
nResortes	Números de resortes para representar el muro	Un	Mínimo considerar 5 resortes
fi	Ángulo de fricción del material de relleno	°	-
e50	Deformación del material de relleno a media capacidad	mm/mm	-
gamma	Peso específico del material de relleno	kN/m^3	-
gap	Ancho de la junta de dilatación	m	-

Estimación de la capacidad

Referencias:	Khalili-Tehrani, et al (2016). Backbone curves with physical parameters for passive lateral response of homogeneous abutment backfills. Bull Earthquake Eng.
	Mosalam, et al (2015). Guidelines for nonlinear seismic analysis of ordinary bridges: Version 2.0. CALTRANS.
	Aviram, A., Mackie, K. y Stojadinovic, B. (2008). Guidelines for nonliner analysis of bridge structures in california. PEER 2008/03.
Expresiones para estimación:	$\beta = [1703 - 683.4(\tan\phi)^{1.23}]\varepsilon_{50}$ $\qquad R_f = 0.98$
	$\alpha = \begin{cases} [5.62(\tan\phi)^2 + 0.53]\gamma + [10.58(\tan\phi)^{1.79} + 2.86]c & si \quad \phi \neq 0, c \neq 0 \\ 1.06\gamma[5.62(\tan\phi)^2 + 0.53] & si \quad c = 0 \\ 0.50\gamma + 2.63c & si \quad \phi = 0 \end{cases}$
	$n = \begin{cases} 2 & si \quad c = 0 \\ \dfrac{0.91(\tan\phi)^2 + 1.49}{\sqrt{c}} + 0.90 & si \quad c \neq 0 \end{cases}$ $\qquad \eta = \begin{cases} 15.47 & si \quad \phi < 5°, c \neq 0 \\ 18.10 - 9.38\sqrt{\tan\phi} & si \quad \phi \geq 5°, c \neq 0 \\ 16.36 - 7.49\sqrt{\tan\phi} & si \quad c = 0 \end{cases}$
	$K_{max} = H^{n-1}\dfrac{(\eta - 1)\alpha}{\beta}$ $\qquad F_{ult} = H^{n-1}\dfrac{(\eta - 1)\alpha}{\eta - 2}R_f$

Materiales generados

Nombre material	Tipo de material	Parámetros material
matBackfill	Hyperbolic Gap Material	K_{max}, F_{ult}

Elemento generado

Nombre elemento	Tipo de elemento	Material del elemento
eleBackfill	Zero Length Element	matBackfill

Figura 6-27. Formato de caracterización del relleno del estribo

6.5.3 Llave de cortante externa

Para la modelación de la llave de cortante externa se realizó un modelo no lineal que depende de las propiedades geométricas y mecánicas del concreto y del acero de refuerzo. Para la validación del modelo se analizaron los resultados del experimento realizado por Megally et al (2001). A partir de este análisis se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 6-28. Como se puede observar los resultados obtenidos a partir del análisis son cercanos al comportamiento obtenido en el ensayo. En la Figura 6-29 se puede identificar las curvas envolventes utilizadas en el modelo, el formato de caracterización del modelo utilizado se puede identificar en la Figura 6-30.

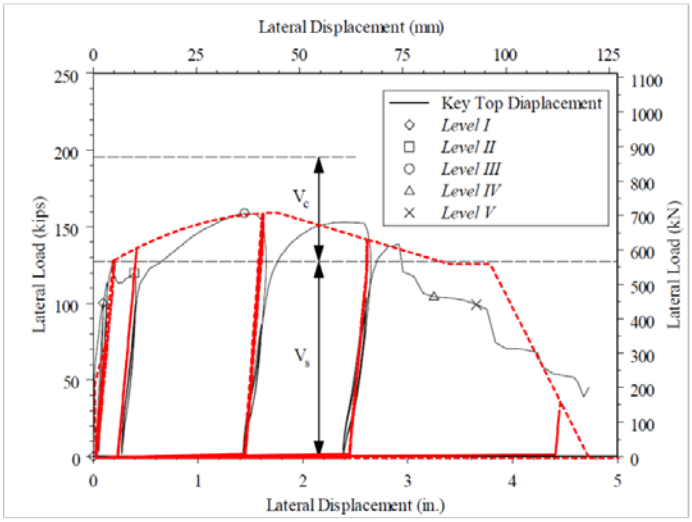


Figura 6-28. Validación modelo llave de cortante externa. Adaptado de Megally et al (2001)

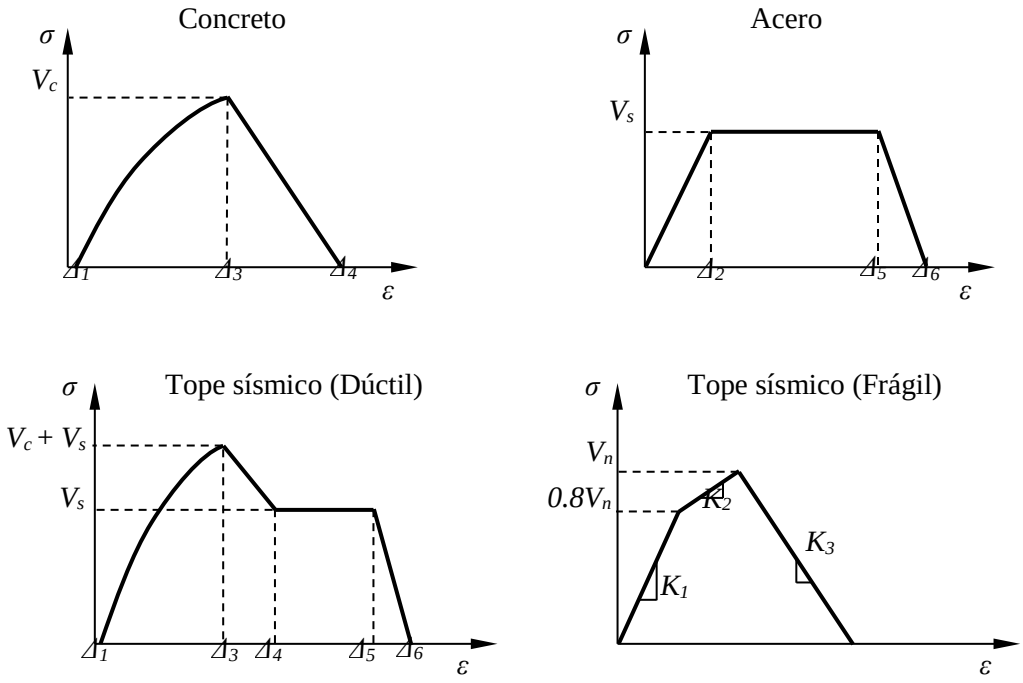
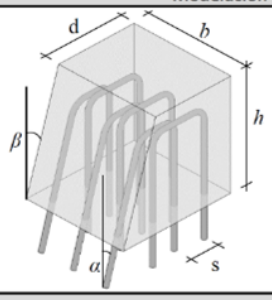


Figura 6-29. Envolvente modelo llave de cortante externa

Modelación de componentes de puentes en OpenSees



Nombre de Componente:	Topes Sismicos
Material:	Concreto y acero
Ubicación:	Extremos transversales del tablero sobre estribos y vigas cabezales
Comportamiento:	No lineal

Parámetros de entrada

Parámetro	Descripción	Unidades	Observaciones
Nom	Nombre del elemento para identificación en OpenSees	-	-
alpha	Angulo de inclinacion del refuerzo vertical	°	Vertical corresponde a un angulo de 0°
beta	Angulo de inclinacion de la cara interna del tope	°	Vertical corresponde a un angulo de 0°
miuf	Coeficiente de friccion entre el tope y la viga cabeza o estribo	-	1.4 si la llave fundio monoliticamente
fsu	Esfuerzo ultimo a tension del acero de refuerzo	kPa	Mínimo considerar 5 resortes
fpc	Capacidad de compresion del concreto a los 28 dias	kPa	-
fy	Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo	kPa	-
be	Dimension longitudinal del concreto del tope	m	-
de	Dimension transversal del concreto del tope	m	-
he	Altura del tope sismico	m	
a	Altura a la que golpea la viga al tope	m	Usualmente la alruta de los neopreno
ese	Separacion tipica entre barras de refuerzo	m	
NoBarra	Diametro de las barras verticales en octavos de pulgada	1/8 in	
CantBarras	Cantidad de barras verticales que unen el tope al estribo	-	

Estimación de la capacidad

Referencias:

Megally, et al (2001). Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments.Report No. SSRP-2001/23 FINAL.

Mosalam, et al (2015). Guidelines for nonlinear seismic analysis of ordinary bridges: Version 2.0. CALTRANS.

Aviram, A., Mackie, K. y Stojadinovic, B. (2008). Guidelines for nonliner analysis of bridge structures in california. PEER 2008/03.

Expresiones para estimación:

$$Vn = min\left(\mu\, A_{vf}\, f_y\, , 0.2\sqrt{f_c'}\, b\, d + \frac{A_{vf}\, f_y\, d}{d+a}\right)$$

$$V_c = 0.17\sqrt{f_c'}\, b\, d \qquad V_s = \frac{A_{vf}\, f_y\, d}{d+a}$$

$$d_b = \frac{NoBarra}{8}\, 0.0254$$

$$L_d = d_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} \qquad L_a = 0.85\, l_d$$

$$K_{ini} = \left(\frac{h}{AG} + \frac{h^3}{3EI}\right)^{-1}$$

$$K_2 = 0.5K_{ini}$$

$$K_3 = 2K_{ini}$$

$$V_1 = 0.8V_n$$

$$U_1 = \frac{V_1}{K_{ini}}$$

$$U_2 = \frac{(V_n - V_1)}{K_2}$$

$$U_3 = \frac{V_n}{K_3}$$

$$\Delta_1 = 0.0025$$

$$\Delta_2 = \sqrt{2}\, \varepsilon_y\, (L_a + L_d) \frac{2\, d}{\sqrt{2d^2}}$$

$$\Delta_3 = \sqrt{2}\, \varepsilon_y\, (L_a + L_d) \frac{2\, d}{S}$$

$$\Delta_4 = 2\Delta_3$$

$$\Delta_5 = 0.12 l_d$$

$$\Delta_6 = 0.15 l_d$$

Materiales generados

Nombre material	Tipo de material	Parámetros material
matESK_A_EPPG	Elastic perfectly plastic gap Material	E, f_y, gap
matESK_A_Conc01	Concrete01 Material	f'_c, ε_{c0}, f'_{cu}, ε_U
matESK_Az_ConcMaxMin	Minmax Material	matESK_A_Conc01 , -Δ_4, Δ_4
matESK_B_SerGapConc01	SeriesMaterial	matESK_Az_ConcMaxMin , matESK_A_EPPG
matESK_A_RefHyst	Hysteretic Material	Δ_2 V_5 Δ_5 Δ_6
matESK_B_RefMaxMin	Minmax Material	matESK_A_RefHyst, -Δ_6, Δ_6
matESK_C_ConcRefor	Parallel Material	matESK_B_RefMaxMin , matESK_B_SerGapConc01
matESK_A_ENT	Elastic no tension Material	E
matESK_D_SerConcRefNT	SeriesMaterial	matESK_C_ConcRefor , 'matESK_A_ENT

Elemento generado

Nombre elemento	Tipo de elemento	Material del elemento
elemESK	Zero Length Element	matESK_D_SerConcRefNT

Figura 6-30. Formato de caracterización de la llave de cortante externa

6.5.4 Llave de cortante interna

Para la modelación de la llave de cortante interna se realizó un modelo no lineal que depende de las propiedades geométricas y mecánicas del concreto y del acero de refuerzo. Para la validación del modelo se analizaron los resultados del experimento realizado por Megally et al (2001). A partir de este análisis se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 6-31. Adicionalmente, se verificó el caso en el cual la llave de cortante esté compuesta únicamente por una barra de acero, para lo cual se verificaron los resultados experimentales obtenidos por Mosalam et al (2015). Los resultados de la comparación se pueden observar en la Figura 6-32. Como se puede observar, los resultados obtenidos a partir del análisis son cercanos al comportamiento obtenido en el ensayo. En la Figura 6-33 se puede identificar la curva envolvente del modelo realizado, el formato de caracterización del modelo utilizado se puede identificar en la Figura 6-34.

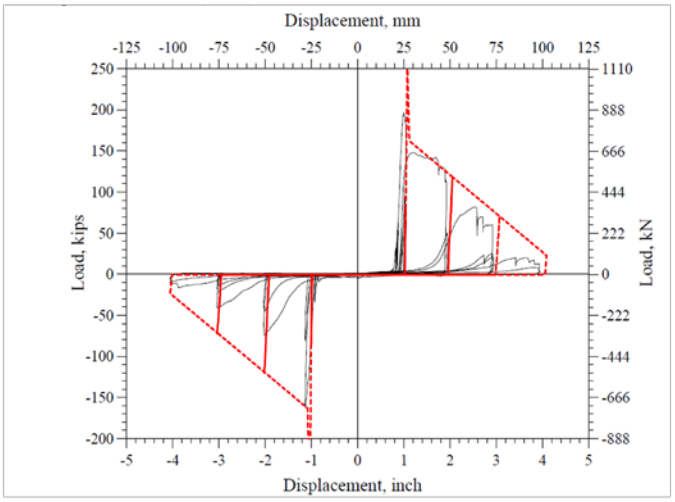


Figura 6-31. Validación modelo llave de cortante interna. Adaptado de Megally et al (2001)

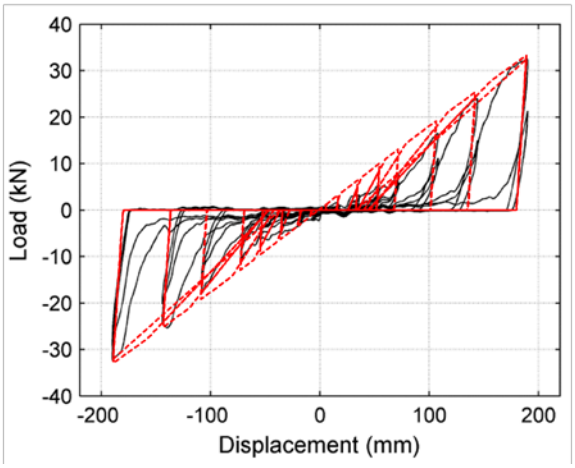


Figura 6-32. Validación modelo llave de cortante interna alternativa. Adaptado de Mosalam et al (2015)

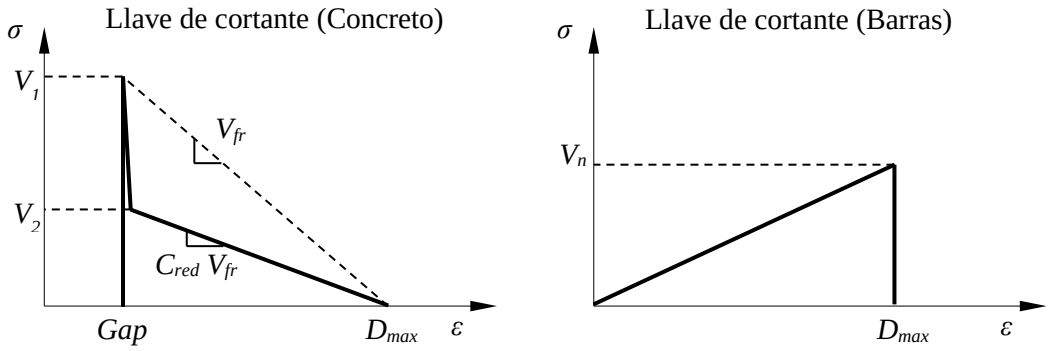
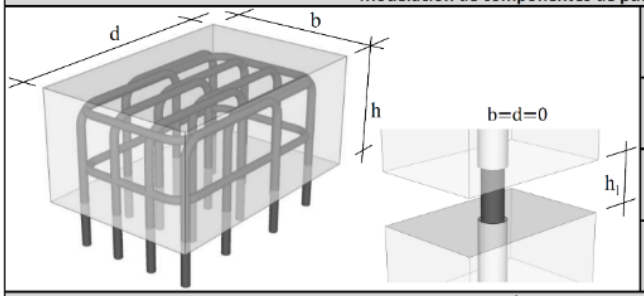


Figura 6-33. Envolvente modelo llave de cortante interna

(Espacio en blanco intencional)

Modelación de componentes de puentes en OpenSees



Nombre de Componente:	Llaves interas de cortante
Material:	Concreto y/o acero
Ubicación:	Zonas medias del tablero sobre estribos y vigas cabezales
Comportamiento:	No lineal

Parámetros de entrada

Parámetro	Descripción	Unidades	Observaciones
Nom	Nombre del elemento para identificación en OpenSees	-	-
be	Dimension de la llave de cortante en sentido transversal	m	Si son solo barras debe ser 0
de	Dimension de la llave de cortante en sentido Longitudinal	m	Si son solo barras debe ser 0
NoBarra	Numero de la barra en octavos de pulgada	kPa	-
CantBarras	Cantidad de barras que cruzan la cara inferior de la llave	-	-
fpc	Capacidad de compresion del concreto a los 28 dias	kPa	-
fy	Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo	kpa	-
gapx	Separacion longitudinal previa al funcionamiento de la llave	m	-
gapy	Separacion transversal previa al funcionamiento de la llave	m	-
hl	Altura libre de las barras de cortante	m	Solo se usa en el caso de que sean solo barras

Estimación de la capacidad

Referencias:

Megally, et al (2001). Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments.Report No. SSRP-2001/23 FINAL.

Mosalam, et al (2015). Guidelines for nonlinear seismic analysis of ordinary bridges: Version 2.0. CALTRANS.

Aviram, A., Mackie, K. y Stojadinovic, B. (2008). Guidelines for nonliner analysis of bridge structures in california. PEER 2008/03.

Expresiones para estimación:

$$d_b = \frac{NoBarra}{8}\ 0.0254 \qquad \alpha = \min\left(\frac{d}{b}, \frac{b}{d}\right) \qquad d_{max} = \frac{0.35}{620}\ (h_l - 100) + h_l$$

$$A_b = \pi\frac{d_b^2}{4} \qquad C_{red} = 1.5\ \alpha\ - 0.25 \qquad \theta = tan^{-1}\left(\frac{d_{max}}{h_l}\right)$$

$$A_{ts} = CantBarras\ A_b \qquad V_{fr_{red}} = C_{red}\ V_{fric} \qquad \gamma = sen(\theta)$$

$$\rho = \frac{A_{ts}}{d\ b} \qquad V_2 = d_{max}\ V_{fr_{red}} \qquad F_{max} = \frac{0.172}{620}\ (h_l - 100) + 0.1$$

$$V_{1_{op1}} = 0.94\sqrt{f_c'}\ b\ d \qquad d_{max} = 4.5in \qquad d_u = 1.2\ \gamma\ f_y\ A_b$$

$$V_{1_{op2}} = si(\rho < 0.006; 5.52\ b\ d; 0.2\ b\ d\ f_c')$$

$$V_1 = 1.3 \min\left(V_{1_{op1}}, V_{1_{op2}}\right)$$

$$V_{fric} = \frac{V_1}{1.3\ d_{max}}$$

Materiales generados

Nombre material	Tipo de material	Parámetros material
matISK_A_GapPos	Elastic perfectly plastic gap Material	E, f_y, gap
matISK_A_GapNeg	Elastic perfectly plastic gap Material	E, f_y, gap
matISK_A_HystISK	Hysteretic Material	V_1, V_2, gap_x, gap_y
matISK_B_SerGapHystePos	Series Material	matISK_B_SerGapHystePos , matISK_A_GapPos
matISK_B_SerGapHysteNeg	Series Material	matISK_B_SerGapHystePos , matISK_A_GapNeg
matISK_C_ParGapHystPosNeg	Parallel Material	matISK_B_SerGapHystePos , matISK_B_SerGapHysteNeg
matISK_D_MaxMinFinal	Minmax Material	matISK_C_ParGapHystPosNeg , $-d_{max}$, d_{max}

Elemento generado

Nombre elemento	Tipo de elemento	Material del elemento
elemISK	Zero Length Element	matISK_D_MaxMinFinal

Figura 6-34. Formato de caracterización de la llave de cortante interna

6.5.5 Columnas

Para la modelación de las columnas se realizó un modelo no lineal que depende de las propiedades geométricas y mecánicas del concreto y del acero de refuerzo. Para la validación del modelo se analizaron los resultados experimentales obtenidos por Lynn et al (1998) espécimen 3SLH18. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6-35. Como se puede observar los resultados obtenidos a partir del análisis contra el tiempo son cercanos al comportamiento obtenido en el ensayo. El formato de caracterización del modelo utilizado se puede identificar en la Figura 6-36.

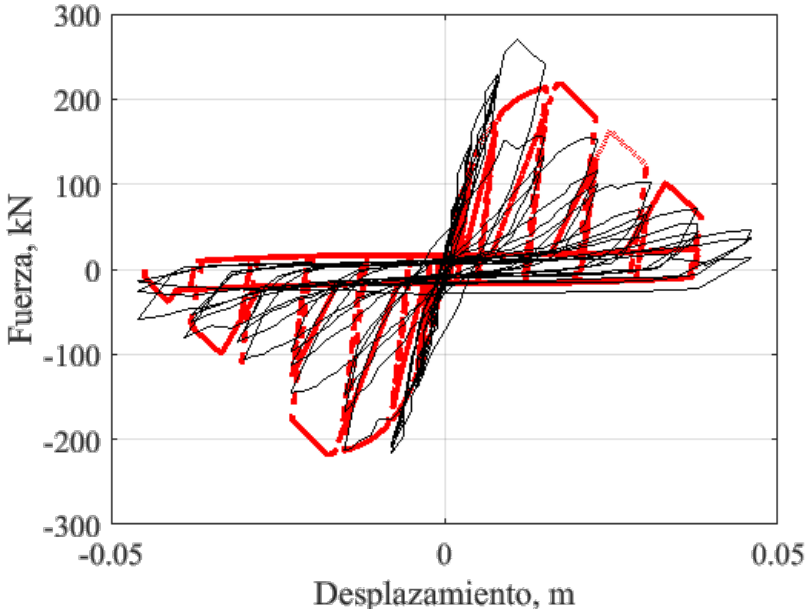
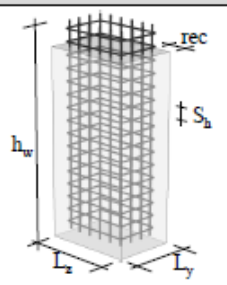
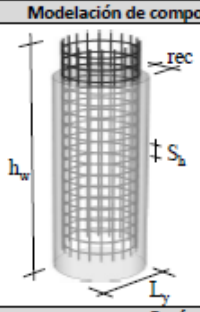


Figura 6-35. Validación modelo columnas. Adaptado de Lynn et al (1998)

(Espacio en blanco intencional)

Modelación de componentes de puentes en OpenSees





Nombre de Componente:	Columnas
Material:	Concreto y acero
Ubicación:	Subestructura del puente
Comportamiento:	No lineal

Parámetros de entrada

Parámetro	Descripción	Unidades	Observaciones
eleName	Nombre del elemento para identificación en OpenSees	-	
tipo	Definicion de forma de la seccion transversal de la columna	-	rectangular o circular
rec	Recubrimiento del acero de la columna	m	
hw	Altura de la columna	m	
Ly	Dimension en sentido longitudinal del puente	m	Para tipo circular es el diametro
Lz	Dimension en sentido transversal del puente	m	Para tipo circular esta dimension es ignorada
fpc	Capacidad de compresion del concreto a los 28 dias	kPa	
rho	Cuantia de la seccion transversal de la columna	-	
numB	Cantidad de barras longitudinales	-	
fyh	Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo	kPa	
sh	Separacion entre estribos	m	
Abh	Area de una barra de estribo	m^2	
nhy	Cantidad de ramas perpendiculares al eje y local	-	Eje y local corresponde al X global
nhz	Cantidad de ramas perpendiculares al eje z local	-	Eje z local corresponde al Y global
massDens	Densidad lineal de masa de la columna	kg/m	

Estimación de la capacidad

Referencias:

Mosalam, et al (2015). Guidelines for nonlinear seismic analysis of ordinary bridges: Version 2.0. CALTRANS.

Aviram, A., Mackie, K. y Stojadinovic, B. (2008). Guidelines for nonliner analysis of bridge structures in california. PEER 2008/03.

Expresiones para estimación:

$$P_u = b_{deck} L\, d$$

$$f_{t20} = \frac{p_u}{f_c' L_y L_z}$$

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{\frac{f_c'}{0.85}}(b - rec)h$$

$$\begin{cases} f_{t20} \le 0.05 & \begin{cases} d = 1 \\ e = 2 \\ g = 0.4 \end{cases} \\ f_{t20} > 0.05 & \begin{cases} d = 0.75 \\ e = 1 \\ g = 0.4 \end{cases} \end{cases}$$

$$V_s = n\, A_b \frac{f_y (b - rec)}{s}$$

$$V_n = V_c + V_s$$

Materiales generados

Nombre material	Tipo de material	Parámetros material
matRebarMinMax	Material MinMax	matRebar , -0.12, 0.12
matelePilaRecCover	Material Concrete01	f'_c, ε_{c0} , f'_{cu}, ε_U
mat0elePilaRecCore	Material Concrete07	f_y, f'_c, ε_{c0} , f'_{cu}, ε_U
matelePilaRecCore	Material MinMax	mat0elePilaRecCore, ε_U, -ε_U
matelePilaRec_A_CortColY	Material SAWS	V_n
matelePilaRec_B_MMCortY	Material MinMax	matelePilaRec_A_CortColY, ε_{VUY}, ε_{VUY}
matelePilaRec_A_CortColZ	Material SAWS	V_n
matelePilaRec_B_MMCortZ	Material MinMax	matelePilaRec_A_CortColZ, ε_{VUZ}, ε_{VUY}
secelePilaRec	Sección Fiber	matRebarMinMax, matelePilaRecCover, matelePilaRecCore
secelePilaRec_B_AgreFibras	Sección Aggregator	secelePilaRec, matelePilaRec_B_MMCortY-Z

Elemento generado

Nombre elemento	Tipo de elemento	Parámetros elemento
elePilaRec	ForceBeamColumn	secelePilaRec_B_AgreFibras

Figura 6-36. Formato de caracterización de las columnas

6.5.6 Pantallas

Para la modelación de las pantallas se realizó un modelo no lineal que depende de las propiedades geométricas y mecánicas del concreto y del acero de refuerzo. Para la validación del modelo se modeló se analizaron los resultados experimentales obtenidos por Leman et al (2015). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6-37. Como se puede observar los resultados obtenidos a partir del análisis contra el tiempo son cercanos al comportamiento obtenido en el ensayo. El formato de caracterización del modelo utilizado se puede identificar en la Figura 6-38.

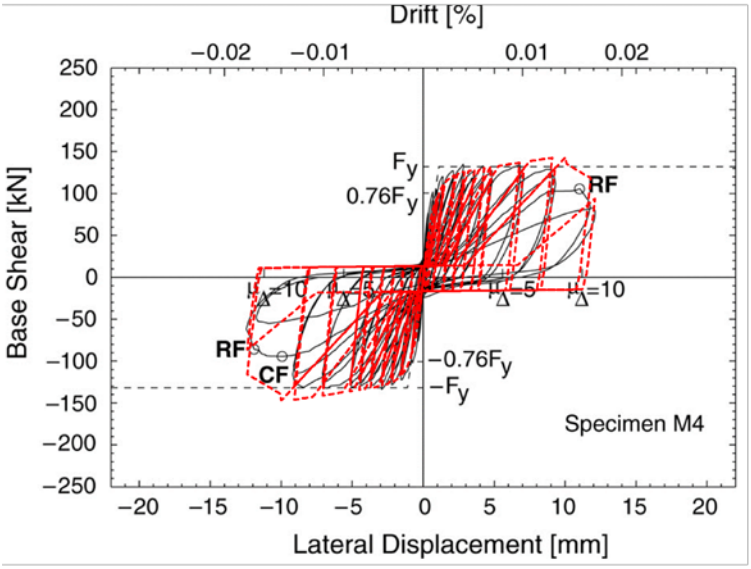
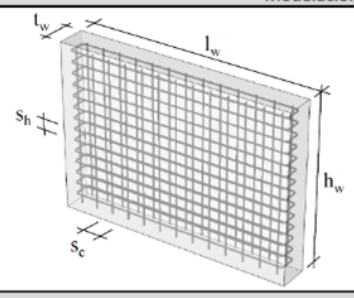


Figura 6-37. Validación modelo pantallas. Adaptado de Leman et al (2015)

(Espacio en blanco intencional)

Modelación de componentes de puentes en OpenSees



Nombre de Componente:	Muros/Pantallas
Material:	Concreto y acero
Ubicación:	Subestructura, entre la cimentacion y la superestructura
Comportamiento:	Fibras/No lineal

Parámetros de entrada

Parámetro	Descripción	Unidades	Observaciones
Nom	Nombre del elemento para identificación en OpenSees	-	-
hw	Altura del muro	m	-
Lw	Dimension transversal al eje principal del puente	m	Usualmente la dimension mas larga (l_w)
tw	Dimension paralela al eje principal del puente	m	Usualmente la dimension mas corta (t_w)
sl	Separacion entre barras longitudinales	m	Barras verticales
sh	Separacion entre barras transversales	m	Barras horizontalez
rec	Recubrimiento de las barras	m	Al eje de las barras
fpc	Capacidad de compresion del concreto a los 28 dias	kPa	-
fy	Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo	kPa	-
NoBarraL	Diametro de las barras verticales en octavos de pulgada	1/8in	-
NoBarraH	Diametro de las barras verticales en octavos de pulgada	1/8in	-
Nparrillas	Cantidad de parrillas que conforman el refuerzo	-	-

Estimación de la capacidad

Referencias:

Leman, et al (2015). Nonlinear Analysis Methods for Flexural Seismic Reinforced Concrete Walls. Engineering Structures 104 (2015) 174–192

Greifenhagen, C., Lestuzzi, P. (2005). Static cyclic tests on lightly reinforced concrete shear walls. Engineering Structures 27 (2005) 1703–1712

Aviram, et al (2008). Guidelines for nonliner analysis of bridge structures in california. PEER 2008/03.

Mosalam, et al (2015). Guidelines for nonlinear seismic analysis of ordinary bridges: Version 2.0. CALTRANS.

Expresiones para estimación:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$$

$$V_{c1} = \begin{cases} \left(0.05\sqrt{f'_c} + \dfrac{\left(l_w\left(0.1\sqrt{f'_c} + \dfrac{0.2\,P_u}{l_w\,t_w}\right)\right)}{\dfrac{M_u}{V_u} - \dfrac{l_w}{2}}\right) t_w d & si \quad \dfrac{M_u}{V_u} - \dfrac{l_w}{2} \geq 0 \\ \max\left(0.27\,t_w\,d\sqrt{f'_c} + \dfrac{P_u\,d}{4\,l_w}, 0\right) & si \quad \dfrac{M_u}{V_u} - \dfrac{l_w}{2} < 0 \end{cases}$$

$$V_{c2} = \begin{cases} 0.17\,t_w d\sqrt{f'_c} & si \;\; P_u \geq 0 \\ 0.17\left(1 + 0.29\dfrac{P_u}{l_w t_w}\right) t_w d\sqrt{f'_c} & si \;\; P_u < 0 \end{cases}$$

$$V_{c3} = 0.83 t_w d\sqrt{f'_c}$$

$$V_{c\,min} = \min(V_{c1}, V_{c2}, V_{c3})$$

$$V_{n\,min} = V_{c\,min} + 0.75\rho\, f_y l_w t_w$$

$$V_{n\,max} = t_w l_w\left(\alpha_C\sqrt{f'_c} + \rho_t f_y\right)$$

$$V_n = \min(V_{n\,min}, V_{n\,max})$$

Materiales generados

Nombre material / Seccion	Tipo de material	Parámetros material
matWALL_A_ConcGen	Concrete01 Material	E , f'_c
matWALL_A_SteelRef	Reinforcing Steel Material	E, f_y
matWALL_A_MultiCort	SAWS Material	V_n
matWALL_B_MMConcGen	Minmax Material	matWALL_A_ConcGen , $-\varepsilon_{uc}$, ε_{uc}
matWALL_B_MMSteelRef	Minmax Material	matWALL_A_SteelRef , $-\varepsilon_{us}$, ε_{us}
matWALL_B_MMCortante	Minmax Material	matWALL_A_MultiCort , $-\varepsilon_{ucs}$, ε_{ucs}
SecWALLY1_A_Fibras	Fiber Section	matWALL_B_MMConcGen , matWALL_B_MMSteelRef
SecWALLY1_B_AgreFibras	Aggregator Section	SecWALLY1_A_Fibras , matWALL_B_MMCortante

Elemento generado

Nombre elemento	Tipo de elemento	Seccion del elemento
elemWALL	ForceBeamColumn Element	SecWALLY1_B_AgreFibras

Figura 6-38. Formato de caracterización de las pantallas

6.5.7 Neoprenos

Para la modelación de los neoprenos se realizó un modelo no lineal que depende de las propiedades mecánicas de los materiales del neopreno (espesor, número de capas, platinas de refuerzo, etc.). Para la validación del modelo se analizaron los resultados experimentales obtenidos por Hube et al (2017). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6-39. Como se puede observar los resultados obtenidos a partir del análisis contra el tiempo son cercanos al comportamiento obtenido en el ensayo. En la Figura 6-40 se puede identificar la envolvente del modelo de neopreno utilizada y la comparación con el caso que no existiera. El formato de caracterización del modelo utilizado se puede identificar en la Figura 6-41.

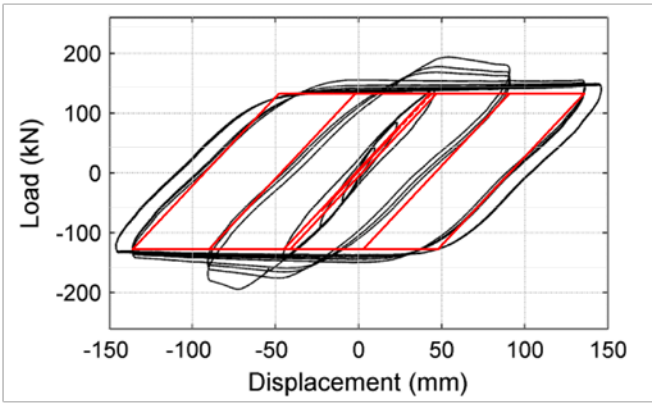


Figura 6-39. Validación modelo neoprenos. Adaptado de Hube et al (2017)

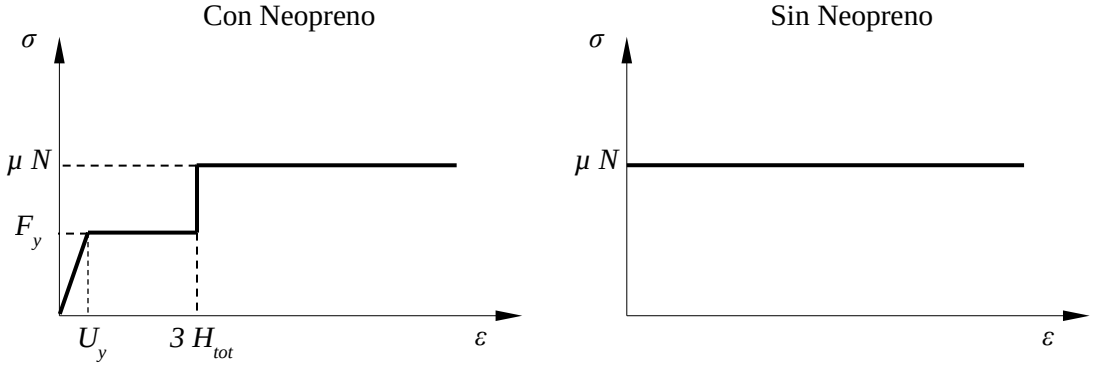
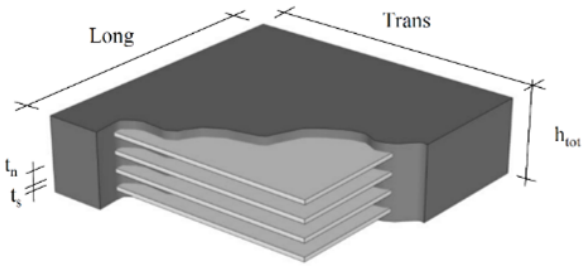


Figura 6-40. Envolvente modelo neoprenos

Modelación de componentes de puentes en OpenSees



Nombre de Componente:	Apoyos de neoprenos
Material:	Neopreno/Neopreno-reforzado
Ubicación:	En el apoyo de vigas del tablero
Comportamiento:	No lineal

Parámetros de entrada

Parámetro	Descripción	Unidades	Observaciones
Nom	Nombre del elemento para identificación en OpenSees	-	-
Long	Dimensión en el sentido longitudinal del puente	m	-
Trans	Dimensión en el sentido transversal del puente	m	-
EspNeo	Espesor de las capas de neopreno	m	Tomar el espesor de las capas intermedias
CapasNeo	Número de capas intermedias de neopreno	Un	-
Dureza	Referencia comercial de la calidad del neopreno	50/60/70	Si no hay neoprenos poner Dureza 0
EspPlat	Espesor de las platinas de refuerzo	m	-
CapasPlat	Número de platinas de refuerzo	Un	-
EPlat	Módulo de elasticidad de las platinas de refuerzo	kPa	-
EConcreto	Módulo de elasticidad del concreto del elemento de apoyo	kPa	-
EspesorEstrib	Dimensión longitudinal del elemento de apoyo	m	Ancho de la viga cabezal dado el caso
AnchoEstribo	Dimensión transversal del elemento de apoyo	m	Longitud de la viga cabezal dado el caso
AltoEstribo	Dimensión vertical del elemento de apoyo	m	Altura de la viga cabezal
CantidadNeop	Cantidad de neoprenos en el elemento de apoyo	Un	-
Silla	Longitud de apoyo de la viga del tablero	m	-
Luz	Luz del vano que llega al neopreno	m	-
Dead	Carga muerta por metro cuadrado del tablero	kN/m^2	Considerar el peso propio del tablero
Live	Carga viva por metro cuadraro del tablero	kN/m^2	-

Estimación de la capacidad

Referencias:	Hube M., et al (2017). Experimental Behavior of Elastomeric Bearings And Seismic Bars of Symply Supported Chilean Bridges. 16th World Conference on Earthquake Engineering.
	Mosalam, et al (2015). Guidelines for nonlinear seismic analysis of ordinary bridges: Version 2.0. CALTRANS.
	Aviram, A., Mackie, K. y Stojadinovic, B. (2008). Guidelines for nonliner analysis of bridge structures in california. PEER 2008/03.
Expresiones para estimación:	$A = Long \times Trans$ $h_{tot} = (Capas_{neo} + 1)Esp_{neo} + Capas_{plat}Esp_{plat}$ $G = \begin{cases} 775.66 & si \quad Dureza = 50 \\ 1137.34 & si \quad Dureza = 60 \\ 1723,69 & si \quad Dureza = 70 \end{cases}$ $k_1 = \frac{G \times A}{h_{tot}}$ $u_y = 0.5h_{tot} \qquad F_y = u_y \times k_1$ $\mu_{concr} = 0.3$ $F_{Normal} = \left(\frac{Ancho_{estribo} \times L}{2}\right) Dead$ $F_{Frtección} = \mu_{concr} \times F_{Normat}$ $u_{max} = \min(silla, 3h_{tot})$

Materiales generados

Nombre material	Tipo de material	Parámetros material
matEBP_A_TraslaMulti (fricción)	MultiLinear	[0.01 ∞],[$F_{Fricción}$ $F_{Fricción}$]
matEBP_A_TraslaMulti (neopreno)	MultiLinear	[u_y ∞],[F_y F_y]
matEBP_A_SoloFric (neopreno)	MultiLinear	[0.01 ∞],[$F_{Fricción}$ $F_{Fricción}$]
matEBP_A_GapFricPos	ElasticPPGap	∞, 0.01, ∞, u_{max}0
matEBP_A_GapFricNeg	ElasticPPGap	∞, 0.01, ∞, -u_{max}0
matEBP_B_TrasBP	MinMax	matEBP_A_TraslaMulti, -u_{max} u_{max}
matEBP_B_SerGapFricP	Series	matEBP_A_GapFricPos, matEBP_A_SoloFric
matEBP_B_SerGapFricP	Series	matEBP_A_GapFricNeg, matEBP_A_SoloFric
matEBP_C_TrasBP	Parallel	{matEBP_B_SerGapFricN, matEBP_B_SerGapFricP}
matEBP_D_TrasBP	Parallel	{matEBP_C_TrasBP, matEBP_B_TrasBP}

Elemento generado

Nombre elemento	Tipo de elemento	Parámetros elemento
EBP	ZeroLength	{mat_D_TrasBP}

Figura 6-41. Formato de caracterización del relleno de los neoprenos

6.6 CONFORMACIÓN DE MODELOS NO LINEALES PARAMÉTRICOS

En el presente numeral se describe el procedimiento definido para generar los modelos computacionales analizados. El objetivo es simular el comportamiento dinámico no lineal de cada una de las tipologías representativas. A partir de la modelación matemática es posible determinar los parámetros de demanda sísmica (PDS) que caracterizan cada una de las tipologías. En los modelos se integran los componentes susceptibles a daño (numeral 6.4) y el comportamiento no lineal (numeral 6.5), a partir de geometrías y características de puentes reales.

Teniendo en cuenta esto, para cada tipología, se genera por lo menos un modelo estructural. Para aquellas tipologías que se han identificado como más representativas dentro del portafolio, se generan una mayor cantidad de modelos estructurales, con diferentes variaciones en parámetros, de acuerdo con la taxonomía descrita en la Tabla 6-1. Con el fin de automatizar la generación de estos modelos, se escribió para cada tipología de puente una rutina en Matlab, capaz de leer un archivo de entrada en formato MS Excel (.xlsx) y de generar el modelo estructural en el formato de OpenSees Navigator (interfaz gráfica del programa OpenSees en el entorno de Matlab). Estas rutinas en Matlab se han denominado “Generador de Modelos”. Los modelos generados de esta forma pueden ser visualizados y modificados utilizando el programa OpenSees Navigator Standalone – Win, el cual es de uso libre, sin necesidad de tener instalado Matlab. El procedimiento para la generación de los modelos y posterior ejecución de las simulaciones puede resumirse como se muestra en la Figura 6-42.

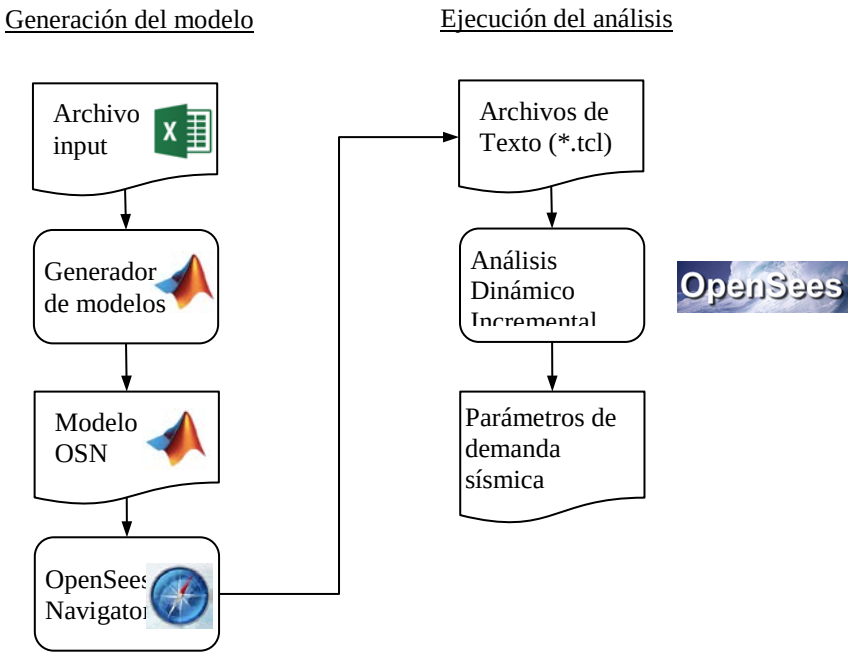


Figura 6-42. Generador de modelos

El archivo de entrada se compone de diferentes pestañas, en las que se ingresan todos los parámetros de necesarios para generar el modelo. Estos parámetros de entrada se refieren tanto a geometría del puente, como a las diferentes propiedades de materiales necesarias para caracterizar el comportamiento de los diferentes componentes. Adicionalmente, el archivo de entrada incluye datos sobre las señales de terremotos que se considerarán en el análisis. En la Tabla 6-8 se presenta una descripción detallada de las diferentes pestañas contenidas en el archivo de entrada, junto con la definición de los diferentes parámetros. Para el caso de las pestañas que se refieren a componentes, los diferentes parámetros ya han sido descritos en los formatos mostrados en el numeral 6.5.

Tabla 6-8. Descripción del archivo de entrada

Nombre pestaña	Descripción	Definición de parámetros
inputGeo	Geometría general del puente	**nVanos**: cantidad de vanos **lVanos**: longitudes de los vanos **nEleSup**: cantidad de elementos en cada tramo de superestructura **bDeck**: ancho del tablero **lPort**: longitud del pórtico **nColsPort**: cantidad de elementos verticales en un pórtico **hCols**: alturas libres de los elementos verticales **hcg**: distancia desde el extremo superior de las columnas al centroide de la superestructura **nEleCols**: cantidad de elementos en cada columna **bEstribo**: ancho del estribo **nEBP**: cantidad de conectores superestructura-subestructura (neoprenos y conectores de cortante) en cada pórtico o estribo
inputCols	parámetros para columnas	ver formatos del numeral 6.5
inputWallBL	parámetros para muros	
inputCap	parámetros para la viga cabezal	
inputCim	parámetros para la cimentación	
inputEPB	parámetros para los neoprenos	
inputESK	parámetros para las llaves de cortante externas	
inputISK	parámetros para las llaves de cortante internas	
inputBackfill	parámetros del material de relleno detrás de los estribos	

Tabla 6-8. Descripción del archivo de entrada

Nombre pestaña	Descripción	Definición de parámetros
inputMotions	listado de señales para el análisis cronológico	**Name**: nombre del archivo de texto que contiene la señal **dir**: dirección en la que se considerará la señal **dt**: paso de tiempo **nSteps**: cantidad de puntos de la señal **cFactor**: factor de escala para llevar la excitación a m/s2 **deltaEscIDA**: factor de escala para llevar la señal a la intensidad inicial a considerar **nEscIDA**: cantidad de veces que se escala la señal para el análisis dinámico incremental (IDA)
inputDamp	parámetros para la consideración de amortiguamiento de Rayleigh	**zeta**: relación de amortiguamiento **Ti**: período inicial **Tj**: período final

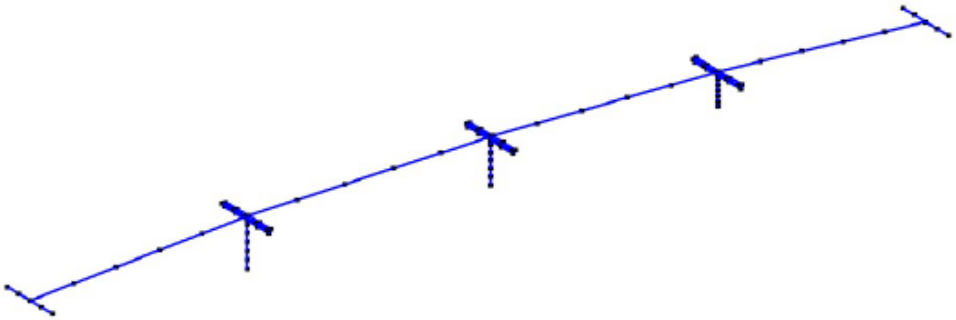
Cada tipología tiene una configuración geométrica particular, y puede tener o no algún tipo de componente determinado. Por esta razón, se ha preparado para cada tipología un formato en el que se describe de manera general la configuración geométrica y la ubicación de los diferentes tipos de componentes dentro del modelo. En las siguientes figuras se presentan los formatos de modelación para las diferentes tipologías.

(Espacio en blanco intencional)

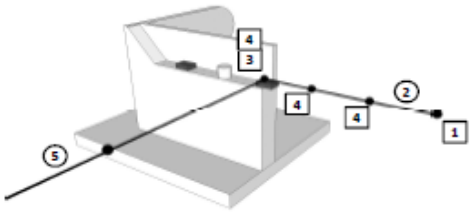
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VNI-1

Modelo

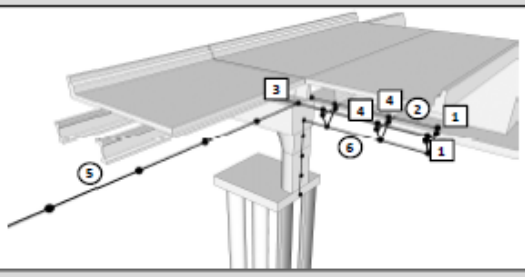


Estribos - Superestructura



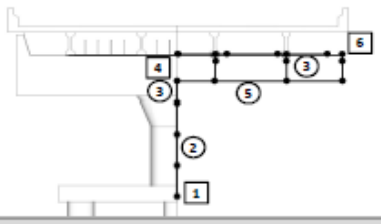
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



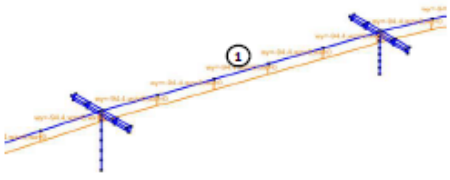
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

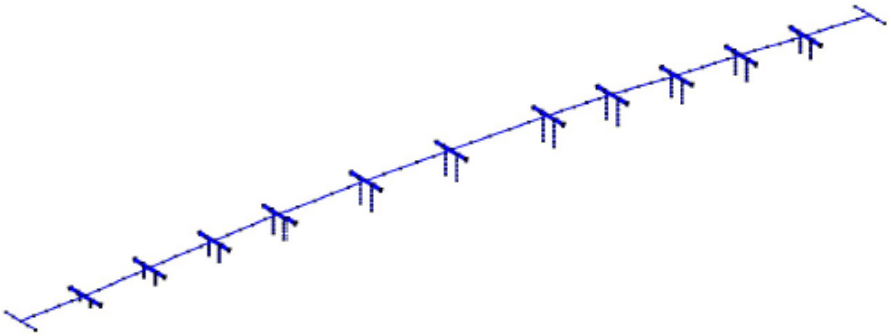
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-43. Formato de modelación - Tipología VNI-1

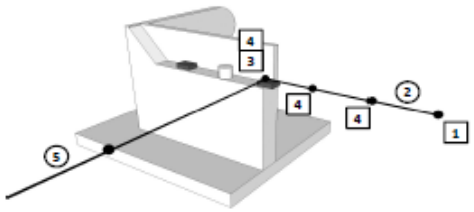
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VNI-2

Modelo

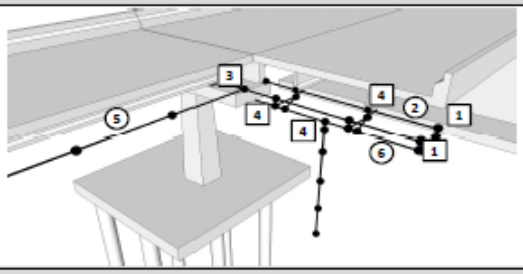


Estribos - Superestructura



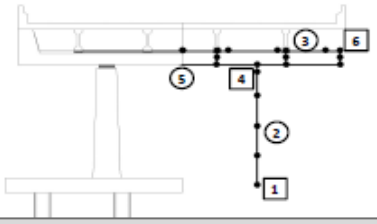
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



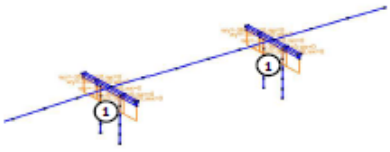
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Neopreno entre columna y viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Viga cabezal

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

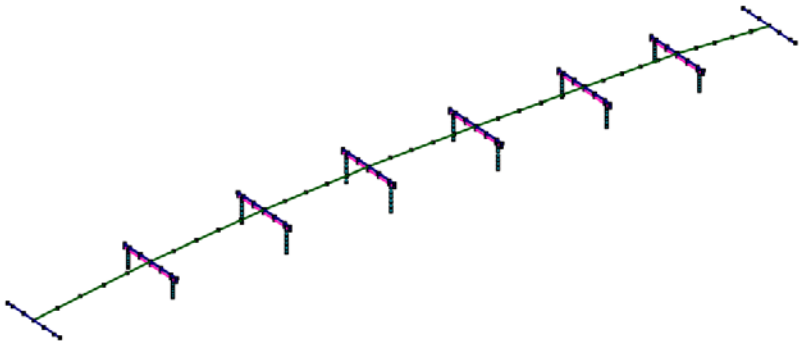
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-44. Formato de modelación - Tipología VNI-2

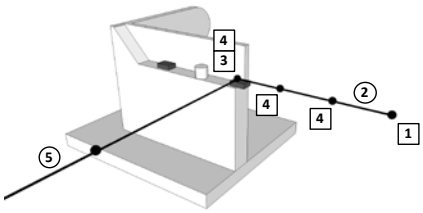
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VNI-3

Modelo

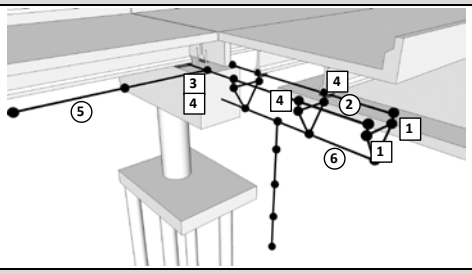


Estribos - Superestructura



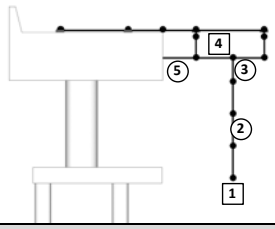
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



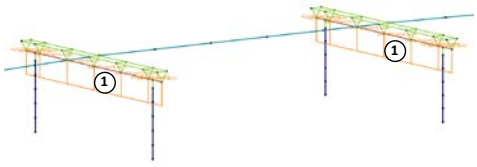
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Viga cabezal

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

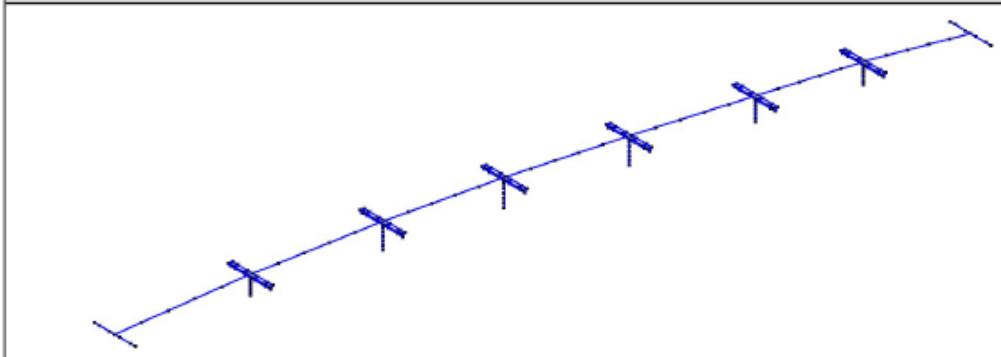
Convenciones	Elementos tipo linea ◯ Elementos sin longitud ☐

Figura 6-45. Formato de modelación - Tipología VNI-3

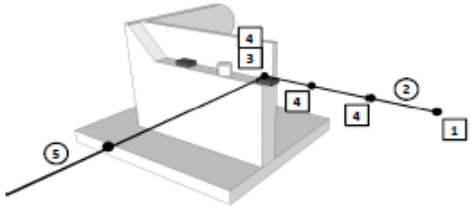
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VNI-4

Modelo

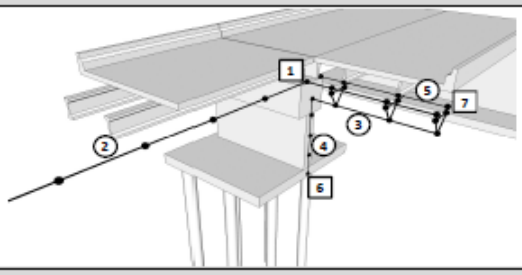


Estribos - Superestructura



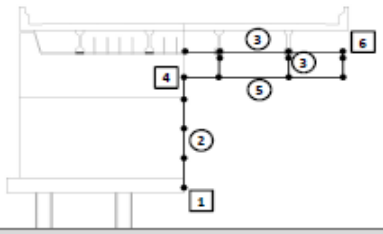
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



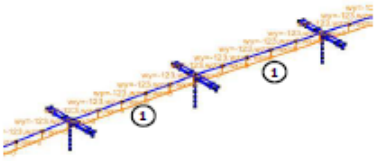
Componentes y conectividad	
1	Conexión continua tablero
2	Tablero
3	Viga cabezal
4	Pantalla
5	Elemento rígido
6	Cimentación
7	Tope sísmico

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Pantalla
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero
Masa	
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	

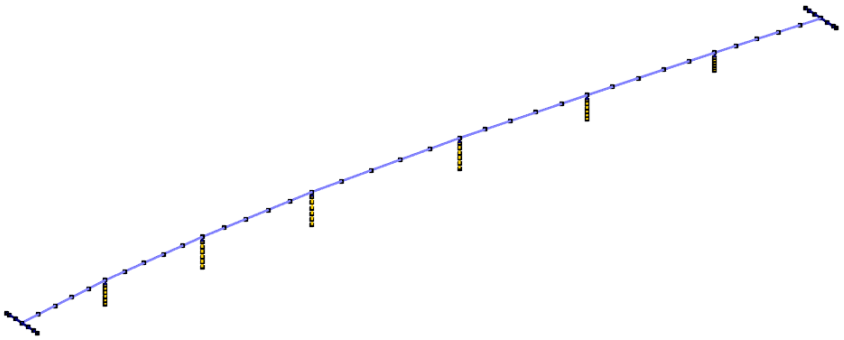
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-46. Formato de modelación - Tipología VNI-4

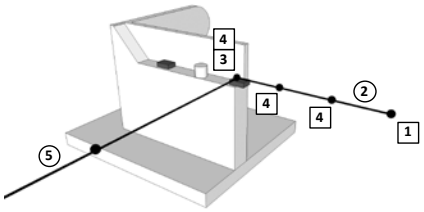
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VMH-1

Modelo

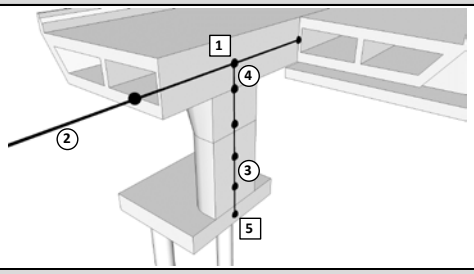


Estribos - Superestructura



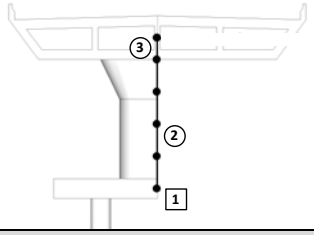
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



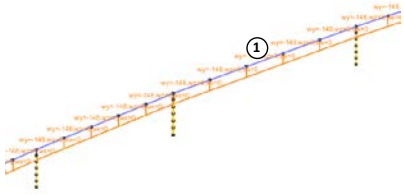
Componentes y conectividad	
1	Conexión continua tablero - elemento rígido
2	Tablero
3	Columna
4	Elemento rígido
5	Cimentación

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero
Masa	
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	

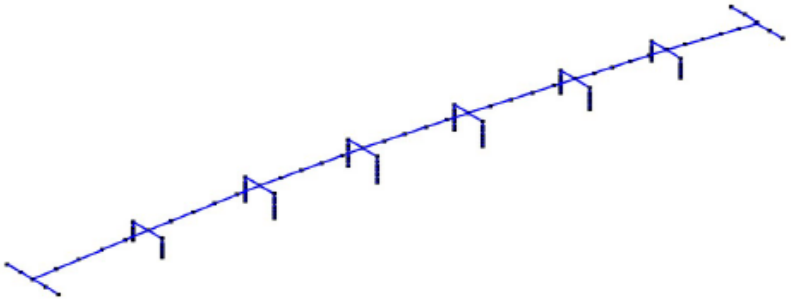
Convenciones	Elementos tipo linea ◯ Elementos sin longitud ☐

Figura 6-47. Formato de modelación - Tipología VMH-1

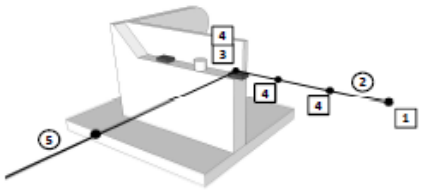
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VMH-2

Modelo

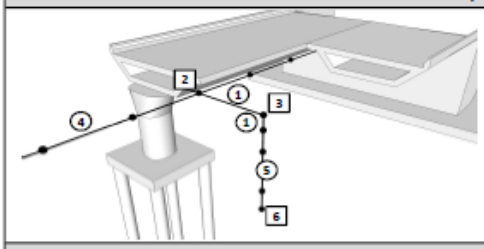


Estribos - Superestructura



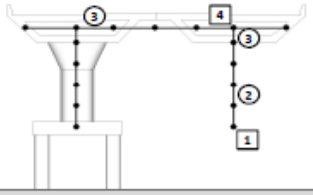
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Superestructura



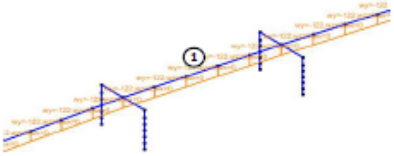
Componentes y conectividad	
1	Elemento rígido
2	Conexión continua tablero
3	Conexión continua elemento rígido - elemento rígido
4	Tablero
5	Columna
6	Cimentacion

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido - elemento rígido

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero
Masa	
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	

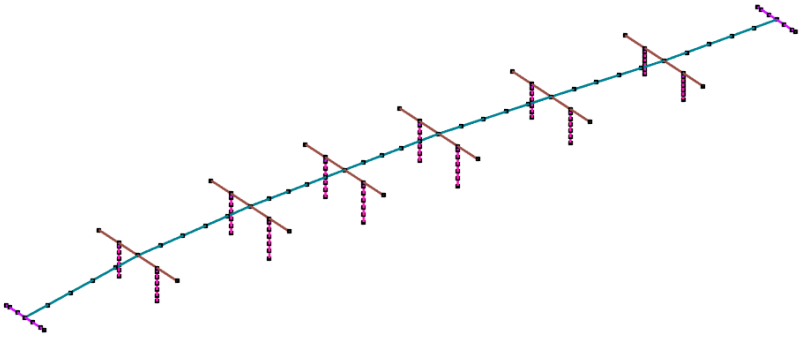
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-48. Formato de modelación - Tipología VMH-2

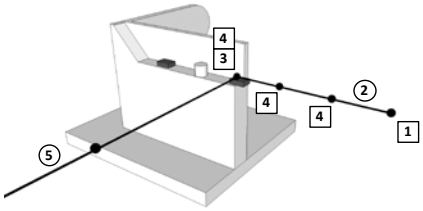
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VMH-3

Modelo

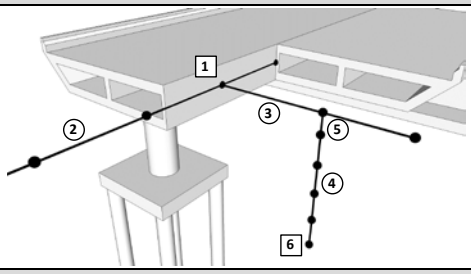


Estribos - Superestructura



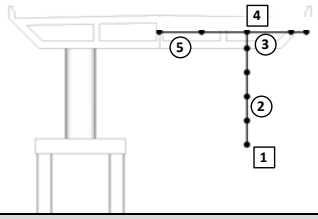
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



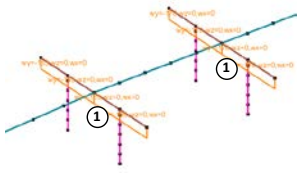
Componentes y conectividad	
1	Conexión continua tablero - viga cabezal
2	Tablero
3	Viga cabezal
4	Columna
5	Elemento rígido
6	Cimentación

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Viga cabezal

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

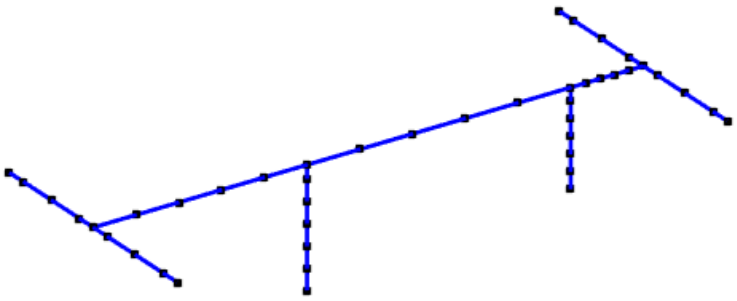
Convenciones	Elementos tipo linea ◯	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-49. Formato de modelación - Tipología VMH-3

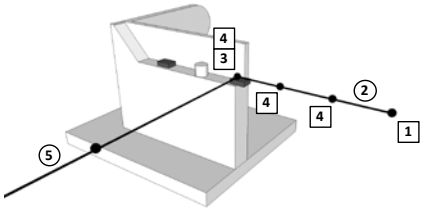
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VMH-4

Modelo

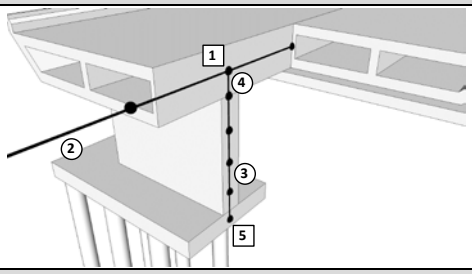


Estribos - Superestructura



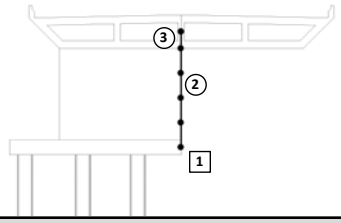
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



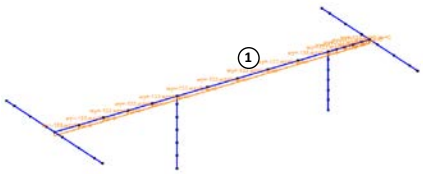
Componentes y conectividad	
1	Conexión continua tablero - elemento rígido
2	Tablero
3	Pantalla
4	Elemento rígido
5	Cimentación

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Pantalla
3	Elemento rígido

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

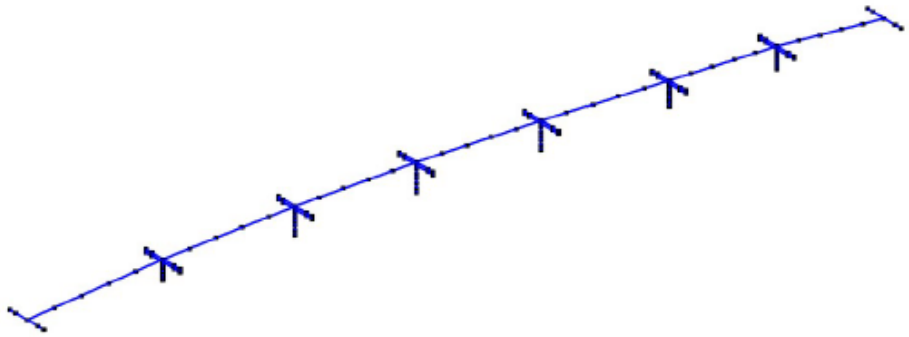
Convenciones	Elementos tipo linea ◯	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-50. Formato de modelación - Tipología VMH-4

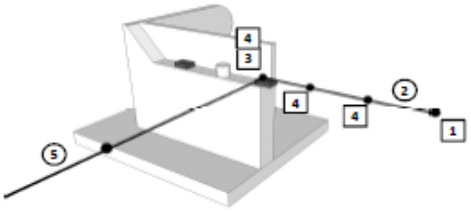
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VNH-1

Modelo

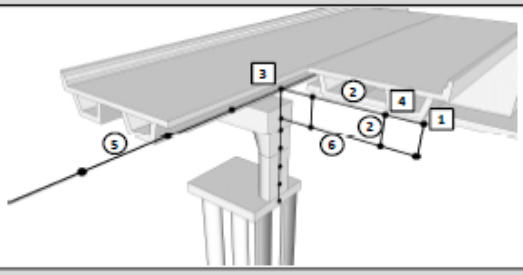


Estribos - Superestructura



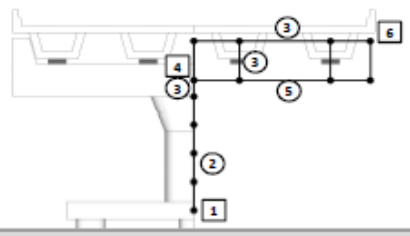
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



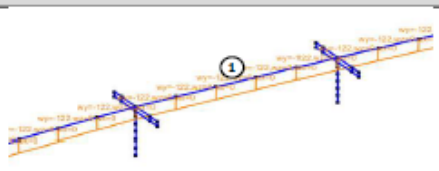
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

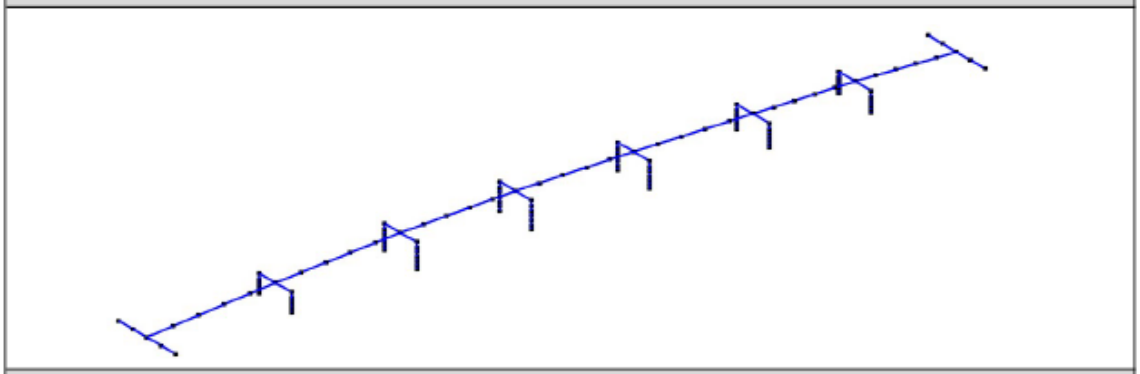
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud □

Figura 6-51. Formato de modelación - Tipología VNH-1

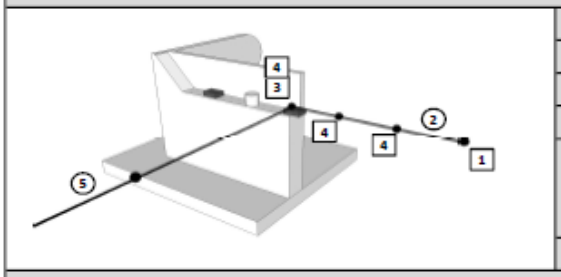
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VNH-2

Modelo

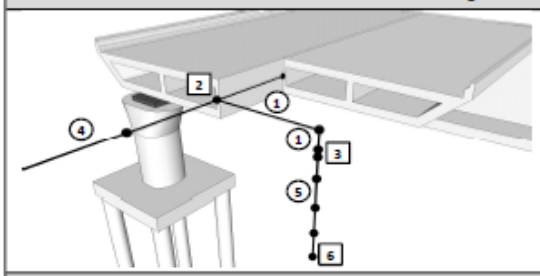


Estribos - Superestructura



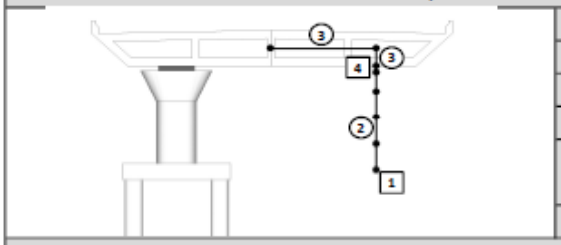
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



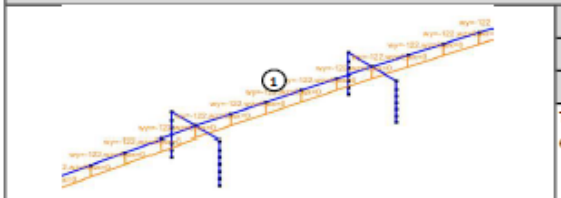
Componentes y conectividad	
1	Elemento rígido
2	Conexión continua tablero
3	Neopreno
	Llave de cortante interna
4	Tablero
5	Columna
6	Cimentación

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-52. Formato de modelación - Tipología VNH-2

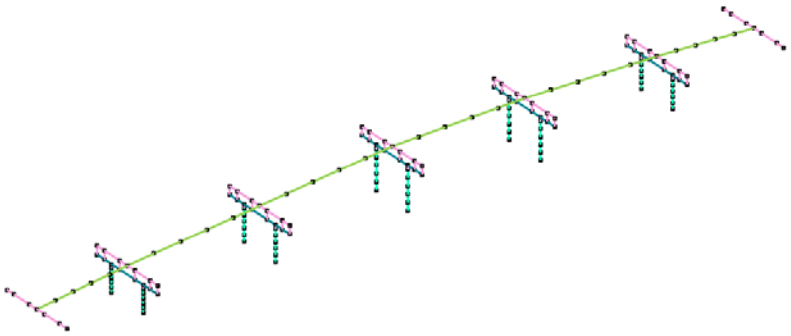
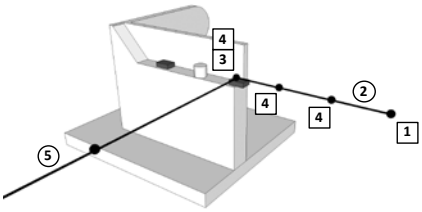
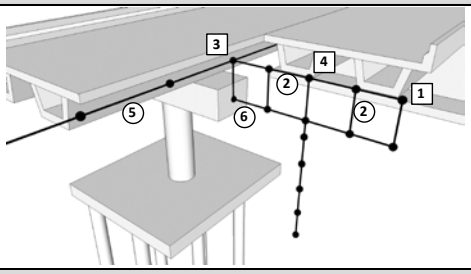
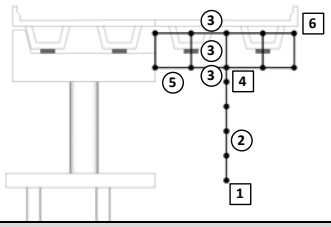
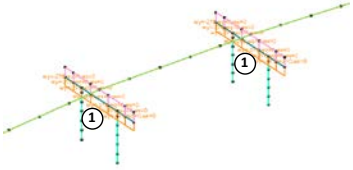
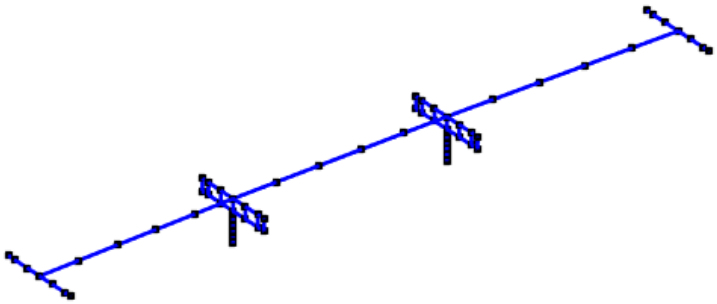
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees		
Tipología VNH-3		
Modelo		
		
Estribos - Superestructura		
	**Componentes y conectividad**	
	1	Tope sísmico
	2	Elemento rígido
	3	Conexión continua tablero - elemento rígido
	4	Neopreno
		Llave de cortante interna
		Relleno de estribo
	5	Tablero
Viga cabezal - Superestructura		
	**Componentes y conectividad**	
	1	Tope sísmico
	2	Elemento rígido
	3	Conexión continua tablero
	4	Neopreno
		Llave de cortante interna
	5	Tablero
	6	Viga cabezal
Superestructura - Columna - Cimentación		
	**Componentes y conectividad**	
	1	Cimentación
	2	Columna
	3	Elemento rígido
	4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
	5	Viga cabezal
	6	Tope sísmico
Carga vertical y masa		
	**Componentes cargados**	
	1	Viga cabezal
	Masa	
	Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	
Convenciones	Elementos tipo linea ◯ Elementos sin longitud ☐	

Figura 6-53. Formato de modelación - Tipología VNH-3

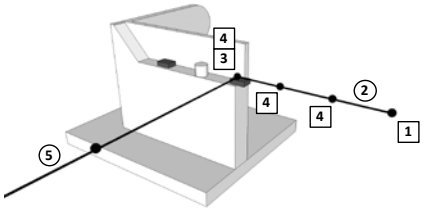
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VNH-4

Modelo

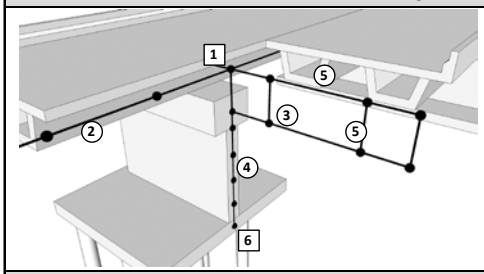


Estribos - Superestructura



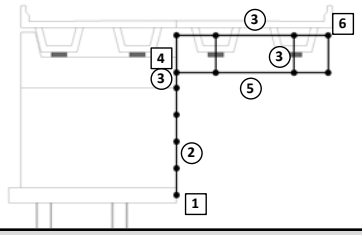
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
	Relleno de estribo
5	Tablero

Viga cabezal - Superestructura



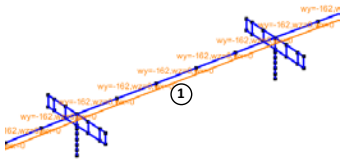
Componentes y conectividad	
1	Conexión continua tablero
2	Tablero
3	Viga cabezal
4	Pantalla
5	Elemento rígido
6	Cimentación

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Pantalla
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero

Masa
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

Convenciones	Elementos tipo linea ◯	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-54. Formato de modelación - Tipología VNH-4

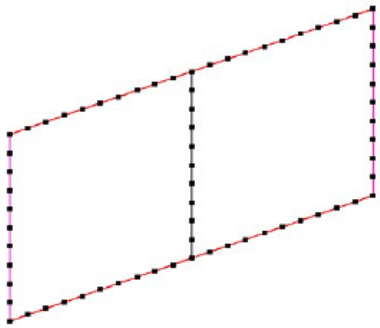
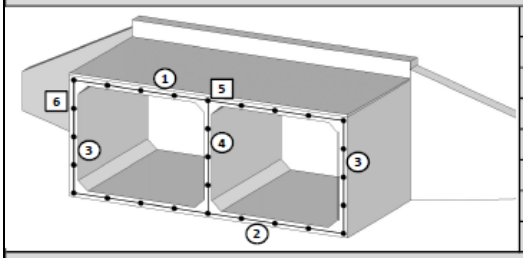
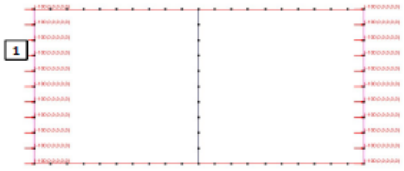
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees		
Tipología VBC-1		
Modelo		
		
Losa superior, inferior y muros		
	Componentes y conectividad	
	1	Losa superior
	2	Losa inferior
	3	Muro exterior
	4	Muro interior
	5	Conexión continua losa - muro
	6	Suelo de relleno
Carga lateral y masa		
	Componentes cargados	
	1	Nodos muro exterior
	Masa	
	Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	
Convenciones	Elementos tipo linea ○ Elementos sin longitud ☐	

Figura 6-55. Formato de modelación - Tipología VBC-1

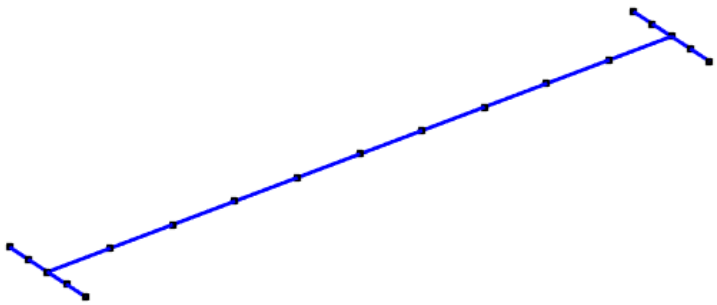
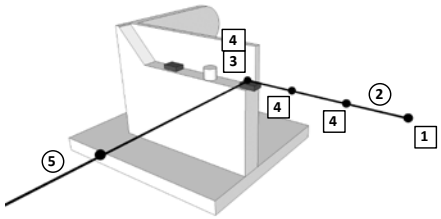
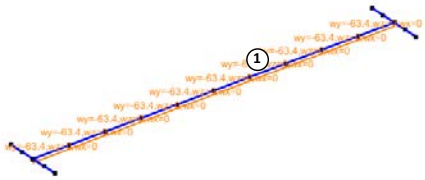
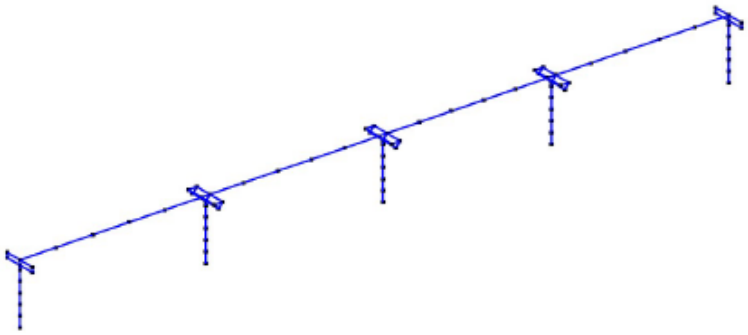
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees		
Tipología VLS-1		
Modelo		
		
Estribos - Superestructura		
	**Componentes y conectividad**	
	1	Tope sísmico
	2	Elemento rígido
	3	Conexión continua tablero - elemento rígido
	4	Neopreno
		Llave de cortante interna
		Relleno de estribo
	5	Tablero
Carga vertical y masa		
	**Componentes cargados**	
	1	Tablero
	Masa	
	Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	
Convenciones	Elementos tipo linea ◯ Elementos sin longitud ☐	

Figura 6-56. Formato de modelación - Tipología VLS-1

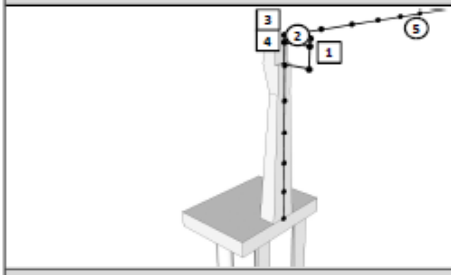
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología PNI-1

Modelo

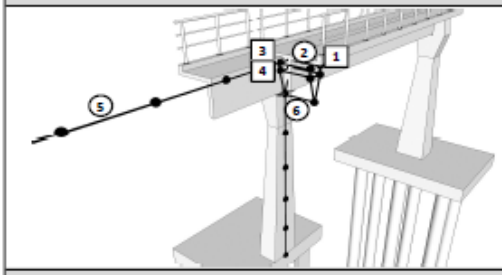


Pilas extremas - Superestructura



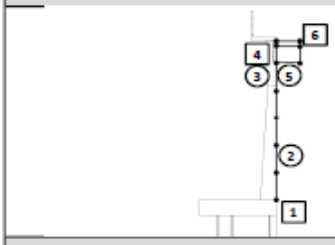
	Componentes y conectividad
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero

Pilas internas - Superestructura



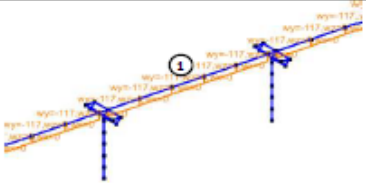
	Componentes y conectividad
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



	Componentes y conectividad
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



	Componentes cargados
1	Tablero
	Masa
	Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

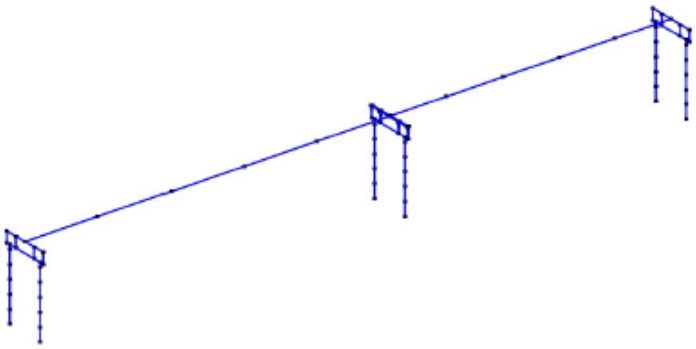
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-57. Formato de modelación - Tipología PNI-1

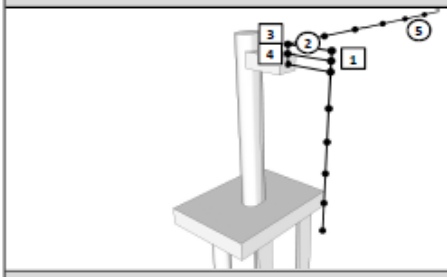
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología PNI-3

Modelo

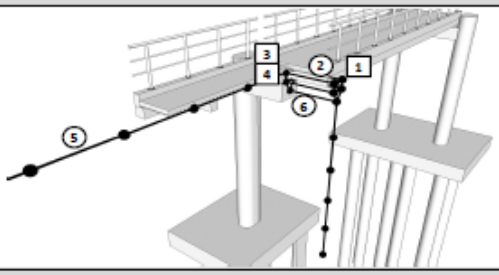


Pilas extremas - Superestructura



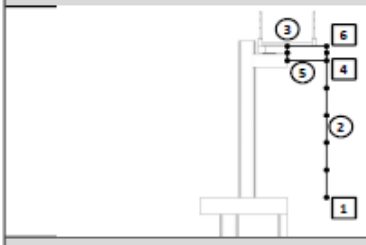
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero

Pilas internas - Superestructura



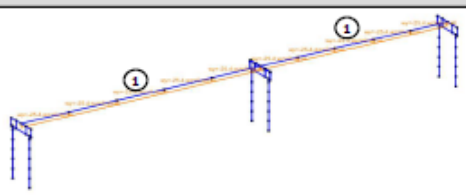
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Tablero
Masa	
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	

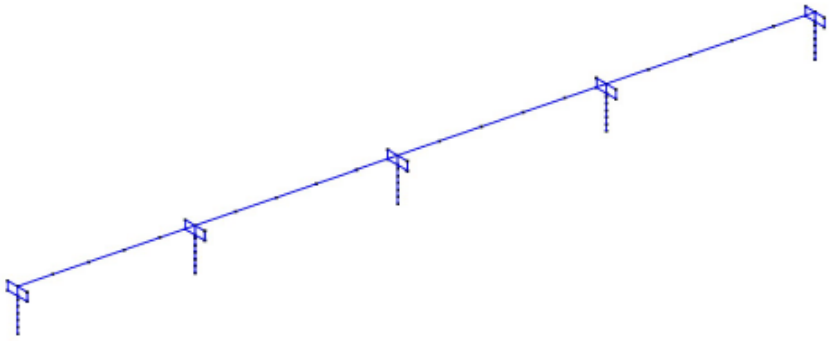
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-58. Formato de modelación - Tipología PNI-3

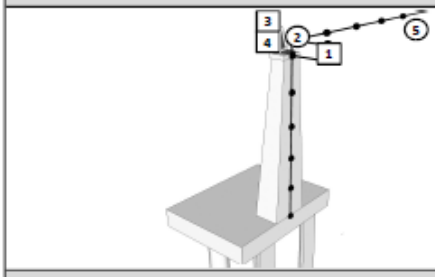
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología PNH-1

Modelo

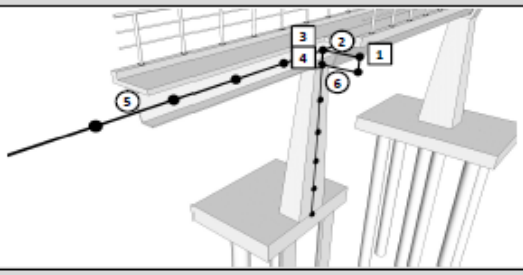


Pilas extremas - Superestructura



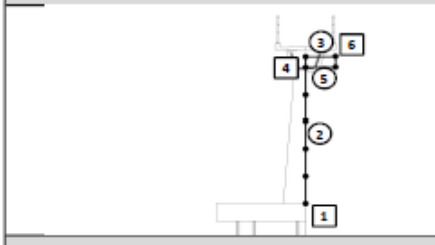
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero

Pilas internas - Superestructura



Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa

Componentes cargados	
1	Viga cabezal
Masa	
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	

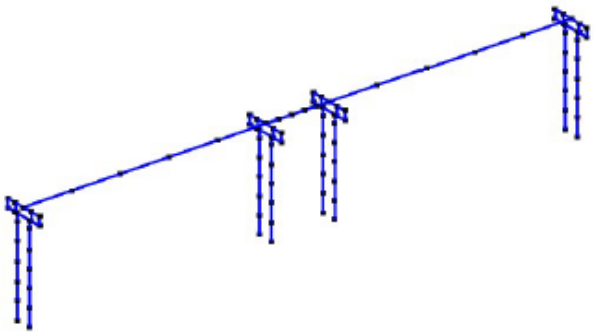
Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud ☐

Figura 6-59. Formato de modelación - Tipología PNH-1

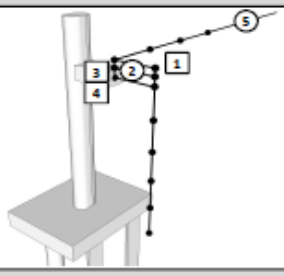
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología PNH-3

Modelo

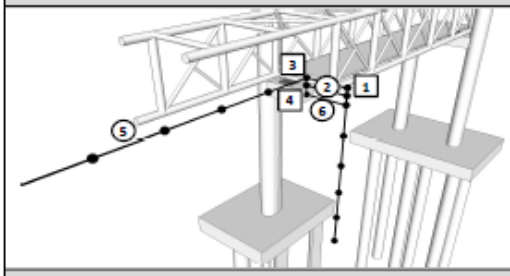


Pilas extremas - Superestructura



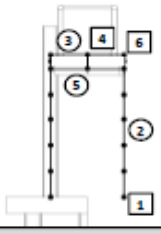
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero

Pilas internas - Superestructura



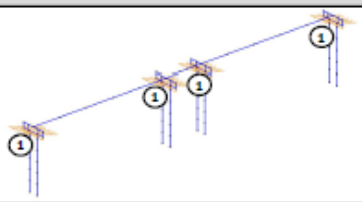
Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero
6	Viga cabezal

Superestructura - Columna - Cimentación



Componentes y conectividad	
1	Cimentación
2	Columna
3	Elemento rígido
4	Neopreno - Llave de cortante interna
5	Viga cabezal
6	Tope sísmico

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Viga cabezal
Masa	
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	

Convenciones	Elementos tipo linea ○ Elementos sin longitud □

Figura 6-60. Formato de modelación - Tipología PNH-3

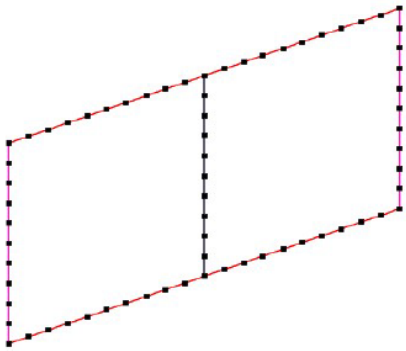
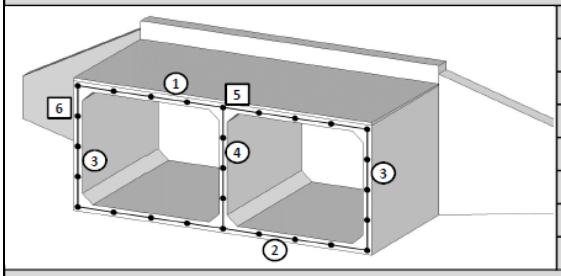
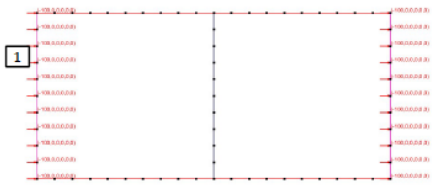
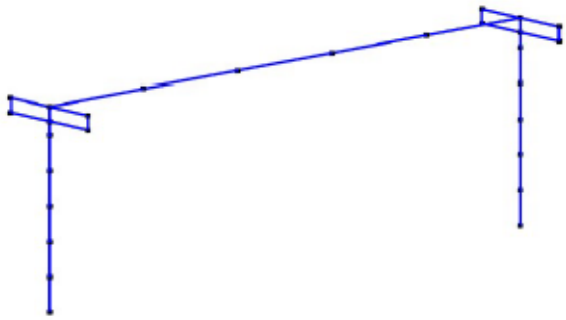
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees		
Tipología PBC-1		
Modelo		
		
Losa superior, inferior y muros		
	Componentes y conectividad	
	1	Losa superior
	2	Losa inferior
	3	Muro exterior
	4	Muro interior
	5	Conexión continua losa - muro
	6	Suelo de relleno
Carga lateral y masa		
	Componentes cargados	
	1	Nodos muro exterior
	Masa	
	Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	
Convenciones	Elementos tipo linea ◯ Elementos sin longitud ☐	

Figura 6-61. Formato de modelación - Tipología PBC-1

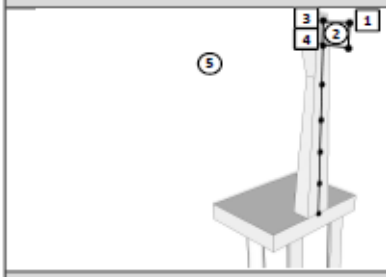
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología PLS-1

Modelo



Pilas extremas - Superestructura



Componentes y conectividad	
1	Tope sísmico
2	Elemento rígido
3	Conexión continua tablero - elemento rígido
4	Neopreno
	Llave de cortante interna
5	Tablero

Carga vertical y masa

Componentes cargados	
1	Tablero

Masa

Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia

Convenciones

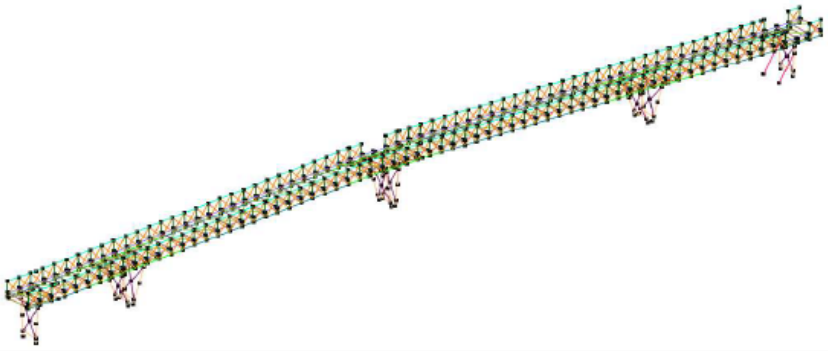
Elementos tipo linea ○ Elementos sin longitud ☐

Figura 6-62. Formato de modelación - Tipología PLS-1

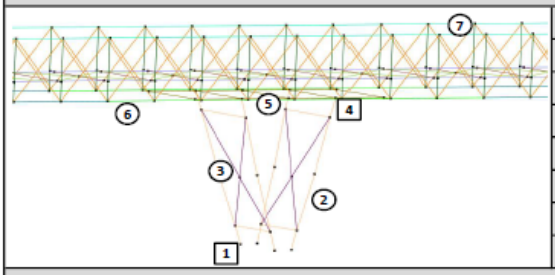
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología PPB-1

Modelo

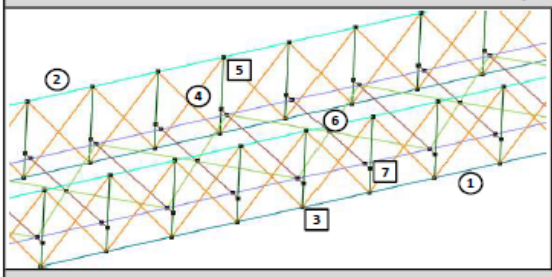


Pilas - Superestructura



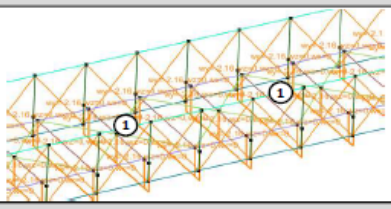
Componentes y conectividad	
1	Apoyo articulado
2	Columna metálica
3	Diagonal metálica
4	Conexión articulada
5	Viga de apoyo
6	Cordón inferior
7	Cordón superior

Superestructura



Componentes y conectividad	
1	Cordón inferior
2	Cordón superior
3	Conexión continua - Entre cordones
4	Tensor
5	Conexión articulada - Entre tensor y cordón
6	Vigueta
7	Conexión continua - Entre vigueta y paral

Carga vertical y masa



Componentes cargados	
1	Viguetas
Masa	
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia	

Convenciones	Elementos tipo linea ○	Elementos sin longitud □

Figura 6-63. Formato de modelación - Tipología PPB-1

6.7 SOFTWARE PARA ANÁLISIS NO LINEAL CRONOLÓGICO (PERFORM 3D – OPENSEES)

Para la generación de funciones de vulnerabilidad sísmica de puentes en necesario realizar análisis no lineales cronológicos, los cuales se pueden realizar en programas de computador tales como Perform3D u OpenSees. Perform3D es un programa comercial, desarrollado inicialmente por el profesor Graham Powell de la Universidad de California, Berkeley bajo el nombre de DRAIN-3D; actualmente, el programa es comercializado por la empresa Computers and Structures, Inc. El programa usa modelos básicos de materiales y elementos con el enfoque de evaluar los niveles de seguridad de una estructura esperados durante un evento sísmico. En la actualidad, se usa principalmente para conducir diseños basados en desempeño de edificios.

Por otro lado, OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) es un programa gratuito desarrollado en la misma universidad por un grupo de profesores e investigadores con el propósito de contar con una herramienta de predicción del comportamiento no lineal de estructuras y suelos. Este programa se ha utilizado ampliamente en la simulación del comportamiento de puentes.

Teniendo en cuenta las características del proyecto desarrollado actualmente por la Universidad de los Andes, el uso de OpenSees trae ciertas ventajas sobre el uso de Perform3D, como se puede ver a continuación:

- OpenSees es un software gratuito de fuente abierta. Por el contrario, Perform-3D es un software comercial que requiere el pago de costos de licenciamiento. El número de licencias disponibles podría limitar el número máximo de análisis que se podrían realizar en una ventana de tiempo.

- Perform3D es un software orientado principalmente al diseño por desempeño de edificios; sus opciones de modelación son bastante básicas y no permite realizar una modelación avanzada del deterioro de los materiales. OpenSees, por otro lado, cuenta con una amplia gama de modelos, con los cuales se pueden tener mejores predicciones del comportamiento de estructuras. Estas características han hecho que OpenSees sea el programa más utilizado en otras partes del mundo en estudios similares al que se desarrolla actualmente.

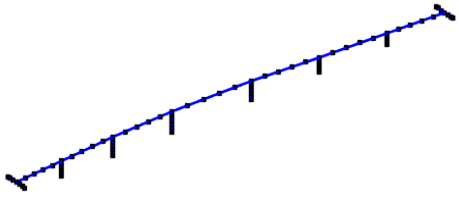
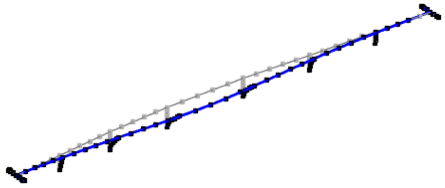
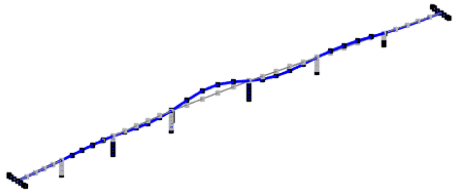
- Los modelos de OpenSees se pueden generar mediante archivos de texto, los cuales pueden ser programados.

- Ambos programas cuentan con una interfaz gráfica; la manipulación de los modelos para revisión o para modificación representarían tareas similares.

Con el fin de comparar los resultados que se pueden obtener de ambos programas se realizaron modelos completos comparables. Como ya se explicó, los modelos de materiales disponibles en el software OPENSEES son mucho más avanzados que los que tiene disponibles PERFORM 3D, por lo cual una comparación mediante un análisis no lineal dinámico no sea apropiada. Por esta razón se compara el

componente elástico mediante los modos fundamentales de las estructuras y el componente inelástico mediante un análisis no lineal estático, ambos en las direcciones principales de análisis.

De la Figura 6-64 a la Figura 6-66 se pueden observar los formatos de comparación para tres tipologías presentes en el portafolio. En estas es posible identificar las similitudes entre los programas analizados, es posible ver que los errores relativos en cuanto a los periodos de los modos son considerablemente menores, del orden del 5%. Adicionalmente se puede verificar que las curvas de capacidad obtenidas son similares en forma y magnitud, las diferencias obtenidas no son representativas. A partir del análisis se puede afirmar que los resultados obtenidos mediante los programas analizados son consistentes para análisis lineales y no lineales estáticos.

Comparación de modelos no lineales PERFORM 3D - OPENSEES			
Tipología	VMH-1	**No. De luces**	7
	PERFORM 3D	**OPENSEES**	
Modelo			
Tablero	Elemento elástico	Elemento elástico	
Viga cabezal	Elemento elástico	Elemento elástico	
Columnas	Elemento de fibras	Elemento de fibras	
Cimentación	Rígida	Rígida	
Apoyos de neopreno	Elemento elástico perfectamente plástico	Elemento multilineal	
Estribo longitudinal	Elemento elástico perfectamente plástico	Elemento multilineal parabólico	
Modo fundamental 1	T_1 = 0.43 s	T_1 = 0.45 s 	
Modo fundamental 2	T_2 = 0.33 s	T_2 = 0.31 s 	

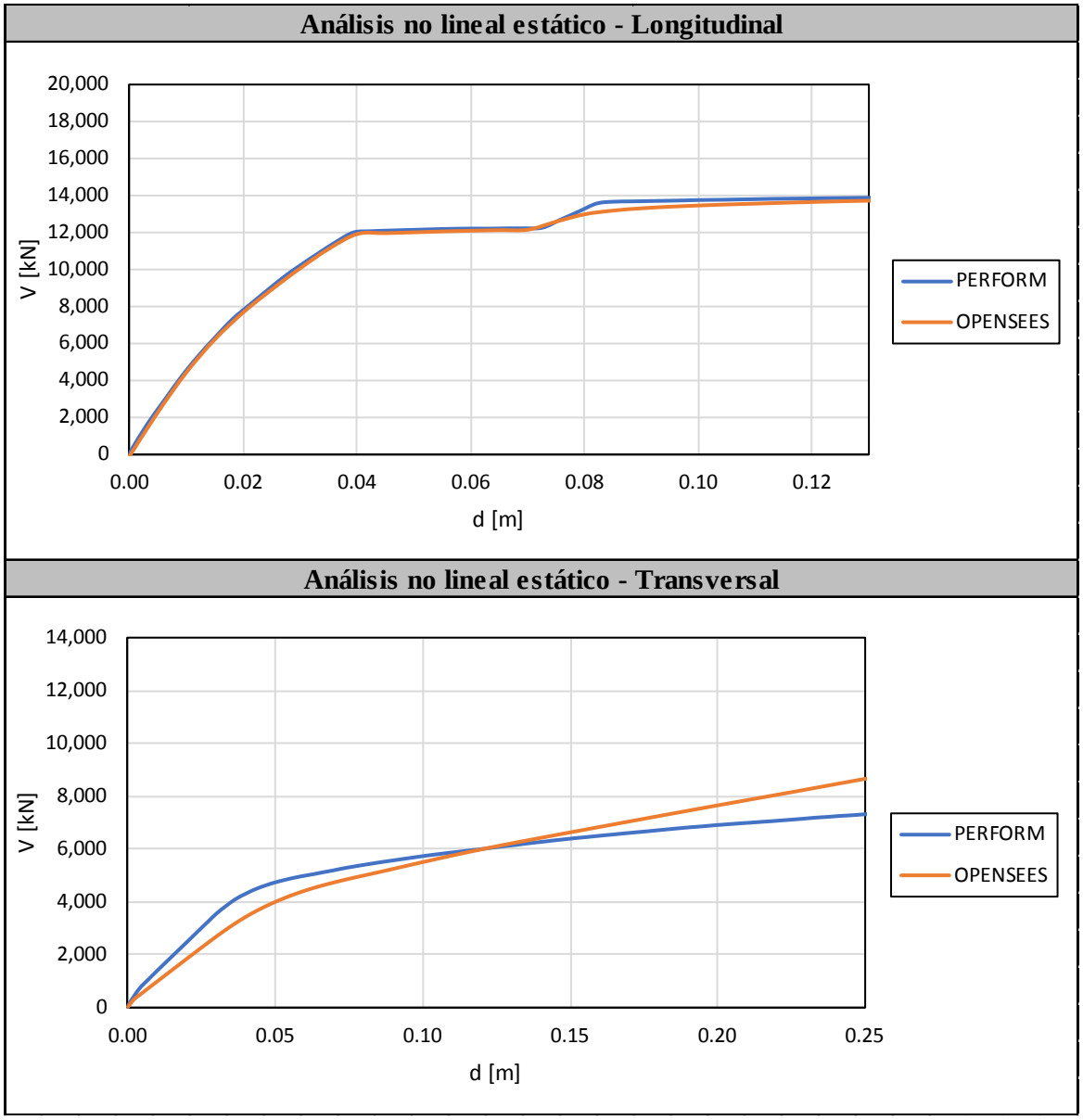
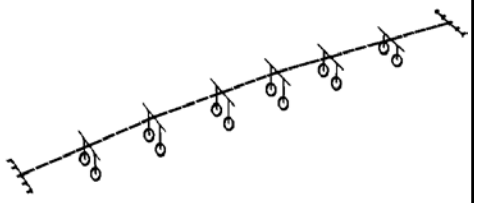
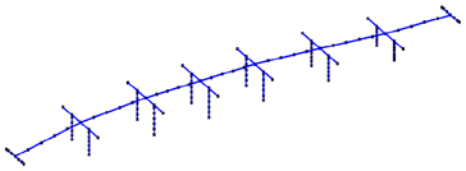
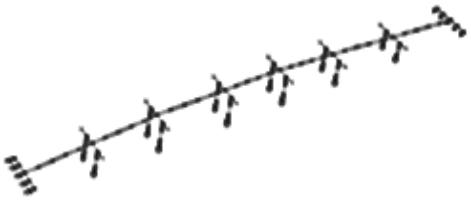
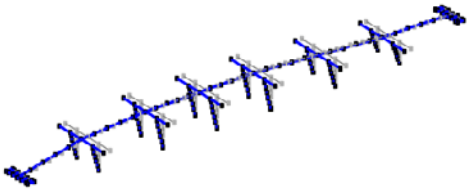
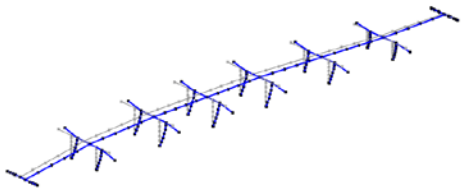


Figura 6-64. Formato de comparación OpenSees - Perform 3D tipología VMH_1

Comparación de modelos no lineales PERFORM 3D - OPENSEES			
Tipología	VMH-3	**No. De luces**	7
	PERFORM 3D	**OPENSEES**	
Modelo			
Tablero	Elemento elástico	Elemento elástico	
Viga cabezal	Elemento elástico	Elemento elástico	
Columnas	Elemento de fibras	Elemento de fibras	
Cimentación	Flexible	Flexible	
Apoyos de neopreno	Elemento elástico perfectamente plástico	Elemento multilineal	
Estribo longitudinal	Elemento elástico perfectamente plástico	Elemento multilineal parabólico	
Modo fundamental 1	T_1 = 0.78 s 	T_1 = 0.74 s 	
Modo fundamental 2	T_2 = 0.50 s	T_2 = 0.52 s 	

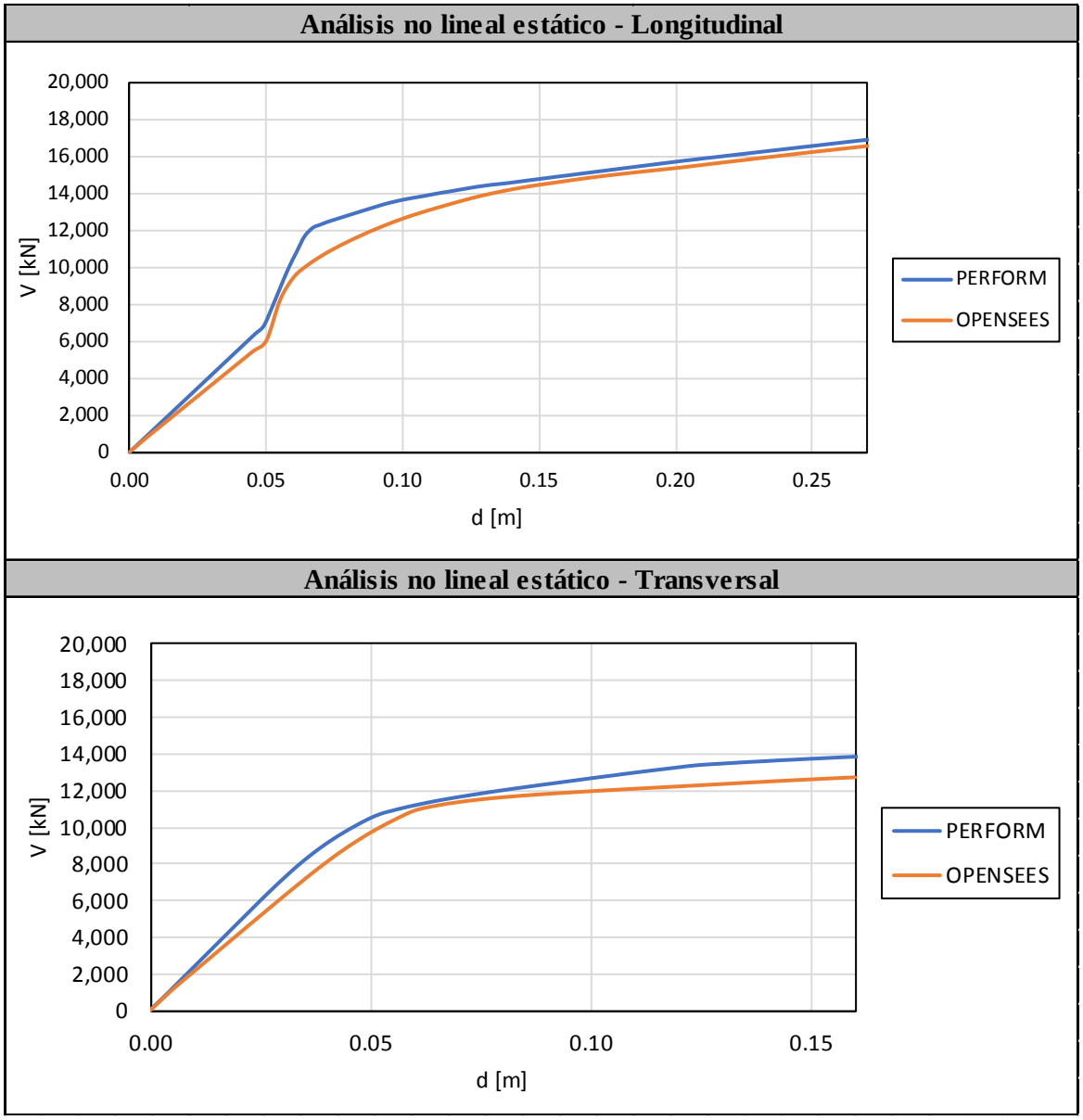
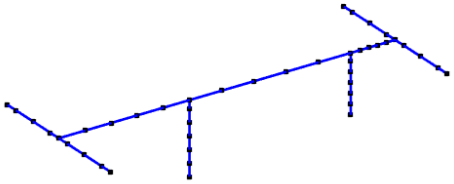
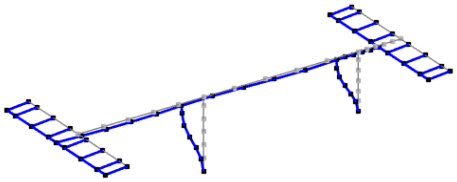
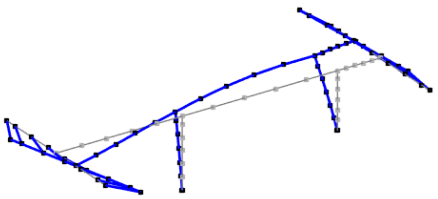


Figura 6-65. Formato de comparación OpenSees - Perform 3D tipología VMH_3

Comparación de modelos no lineales PERFORM 3D - OPENSEES			
Tipología	VMH-4	**No. De luces**	3
	PERFORM 3D	**OPENSEES**	
Modelo			
Tablero	Elemento elástico	Elemento elástico	
Viga cabezal	Elemento elástico	Elemento elástico	
Pantallas	Elemento de fibras	Elemento de fibras	
Cimentación	Rígida	Rígida	
Apoyos de neopreno	Elemento elástico perfectamente plástico	Elemento multilineal	
Estribo longitudinal	Elemento elástico perfectamente plástico	Elemento multilineal parabólico	
Modo fundamental 1	T_1 = 0.40 s	T_1 = 0.35 s 	
Modo fundamental 2	T_2 = 0.08 s	T_2 = 0.07 s 	

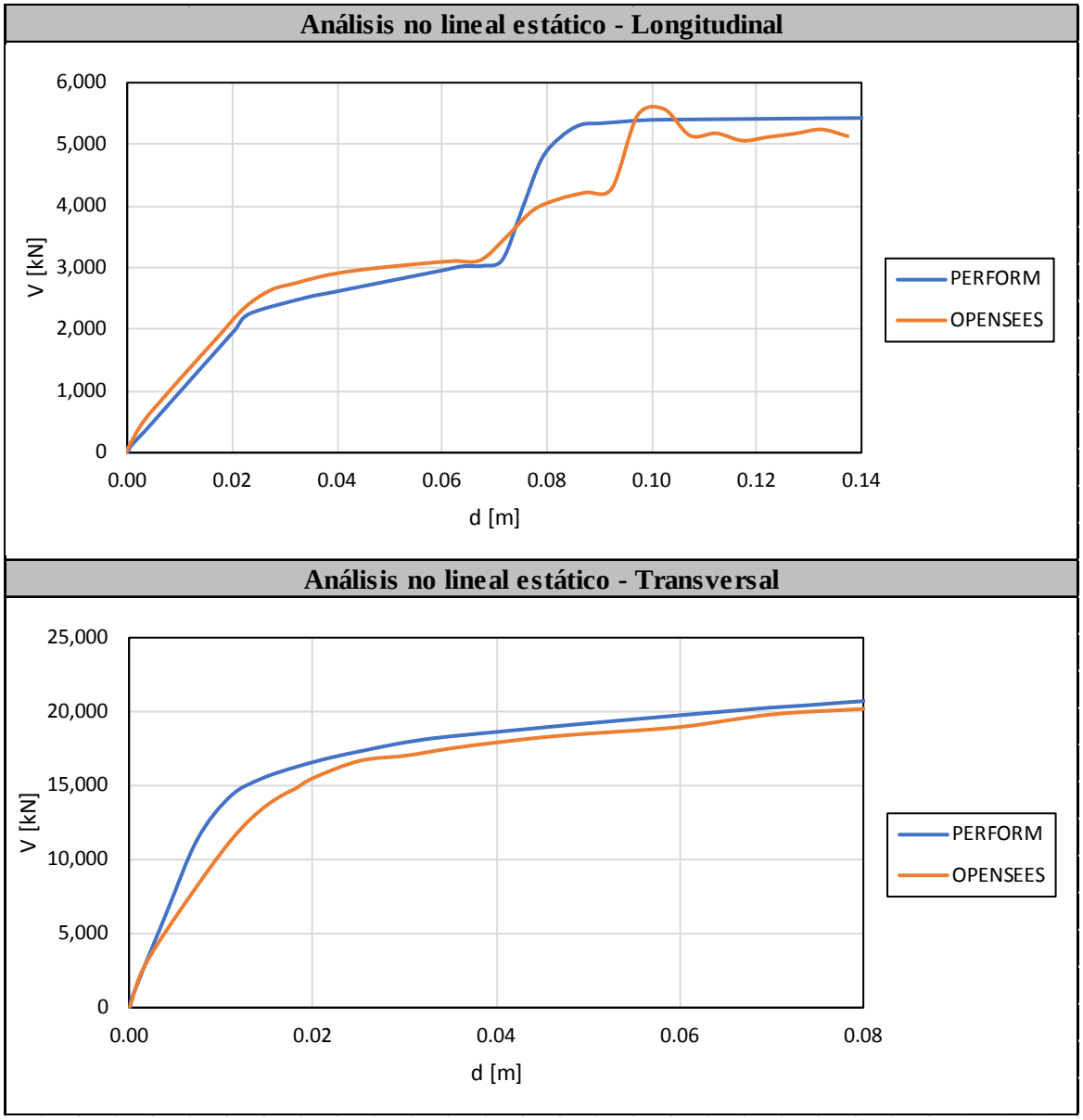


Figura 6-66. Formato de comparación OpenSees - Perform 3D tipología VMH_4

6.8 PARÁMETROS DE DEMANDA SÍSMICA

Cada uno de los modelos de análisis se somete a un proceso de evaluación de respuesta dinámica no lineal. En función del tipo de componentes incluidos en la modelación estructural. Los modelos se analizan para el grupo de señales indicadas en el numeral 6.2.4. Los parámetros de demanda sísmica se grafican en función de la intensidad sísmica de análisis y los resultados se agregan para todas las señales con el fin de ilustrar la variabilidad e incertidumbre asociada con la amenaza sísmica. La información se almacena en archivos para su posterior uso en el análisis de vulnerabilidad. En la Figura 6-67 se presentan los resultados de ductilidad de curvatura y del desplazamiento relativo entre la subestructura y la superestructura con respecto a la

aceleración espectral para cada tipología analizada. Cada una de las líneas presentadas en las siguientes gráficas corresponden a cada señal escalada a diferentes intensidades.

Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

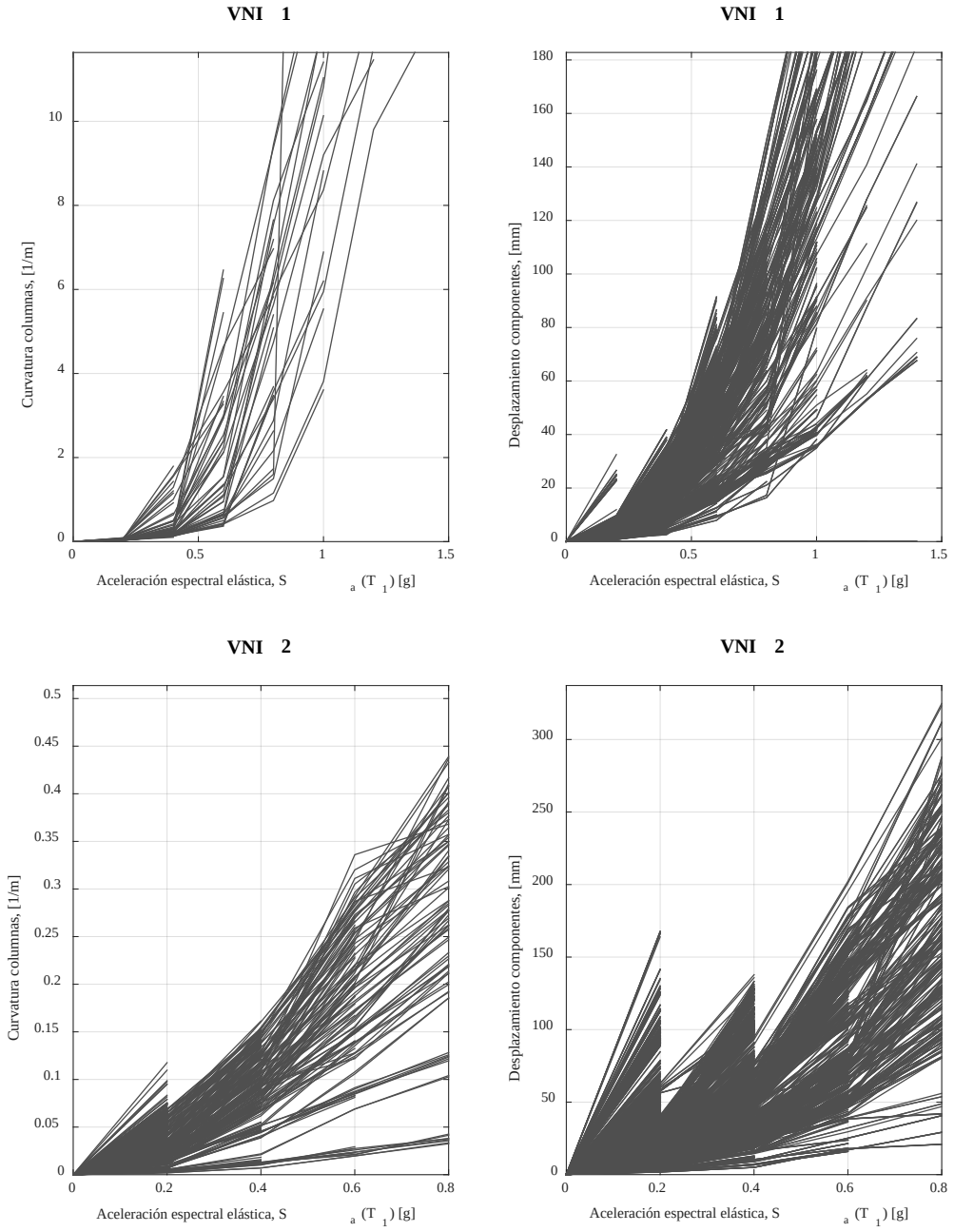


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

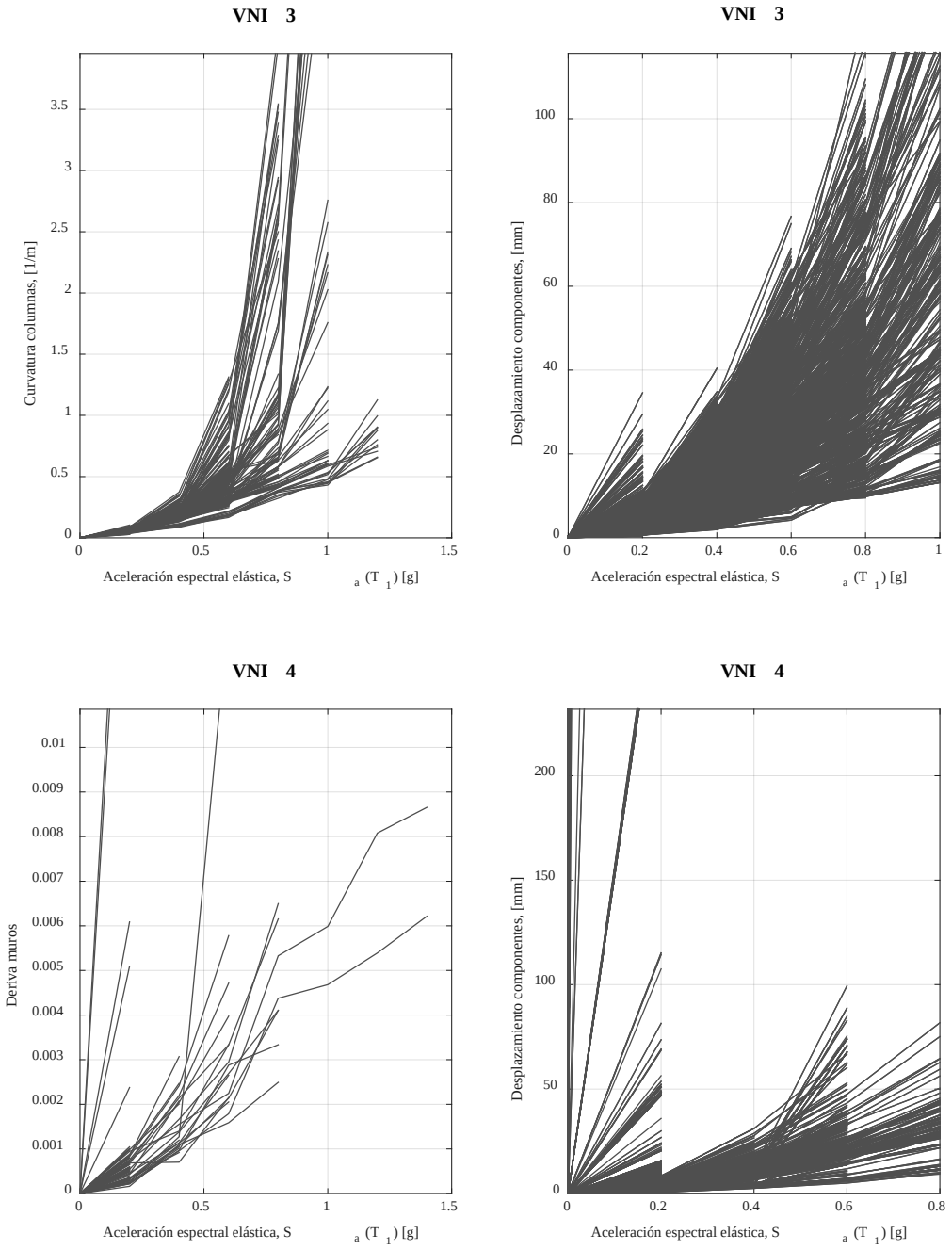


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

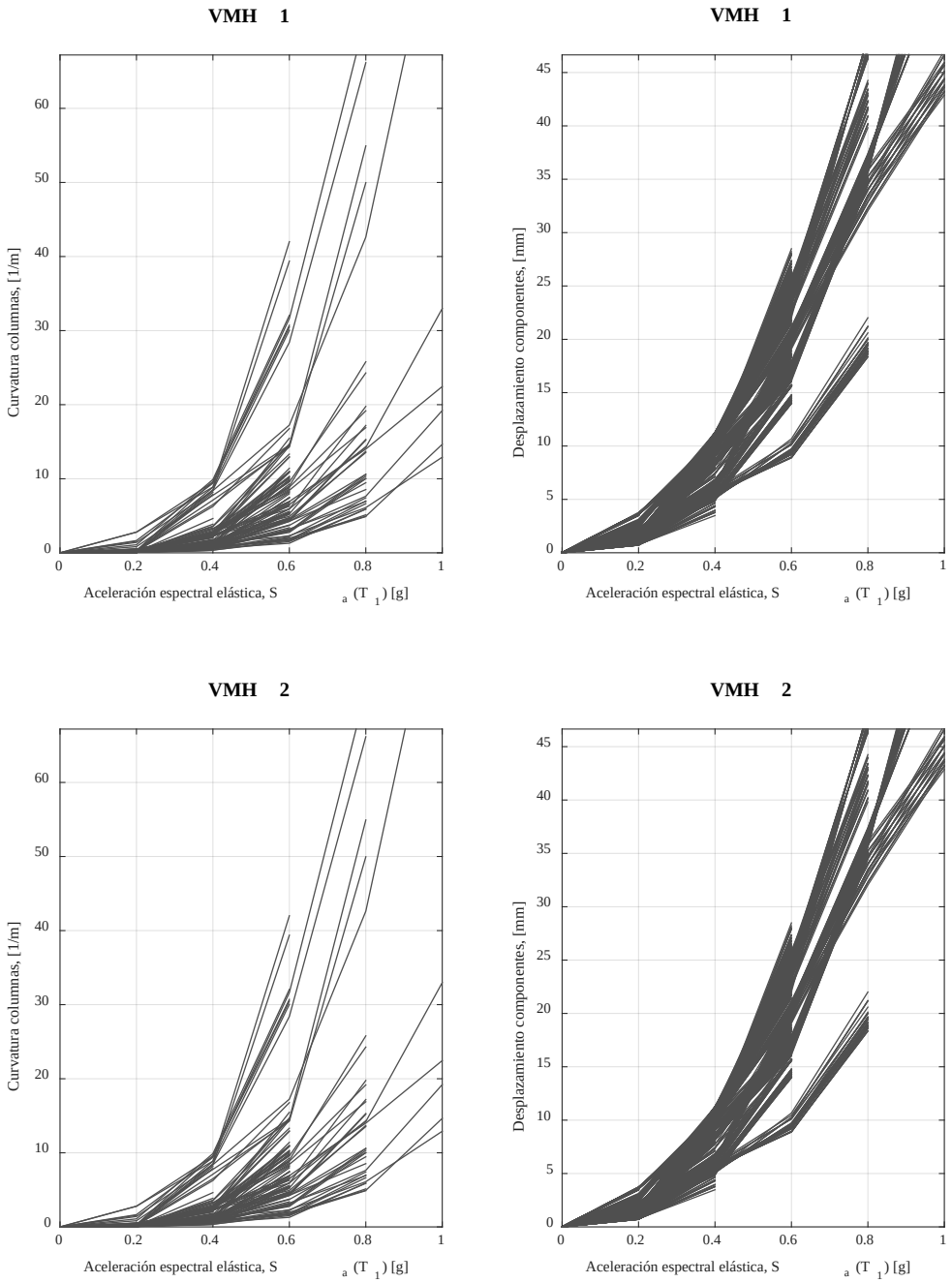


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

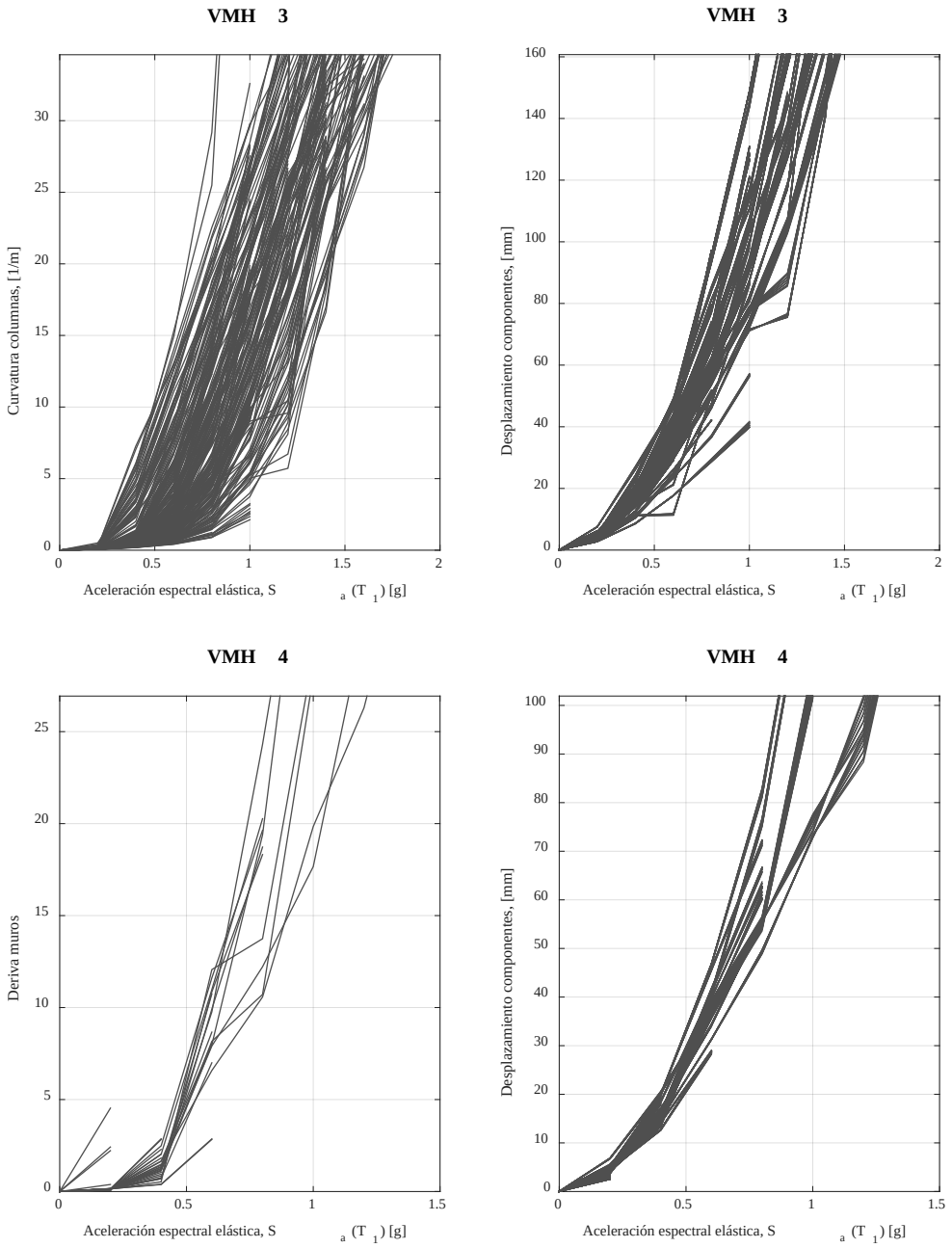


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

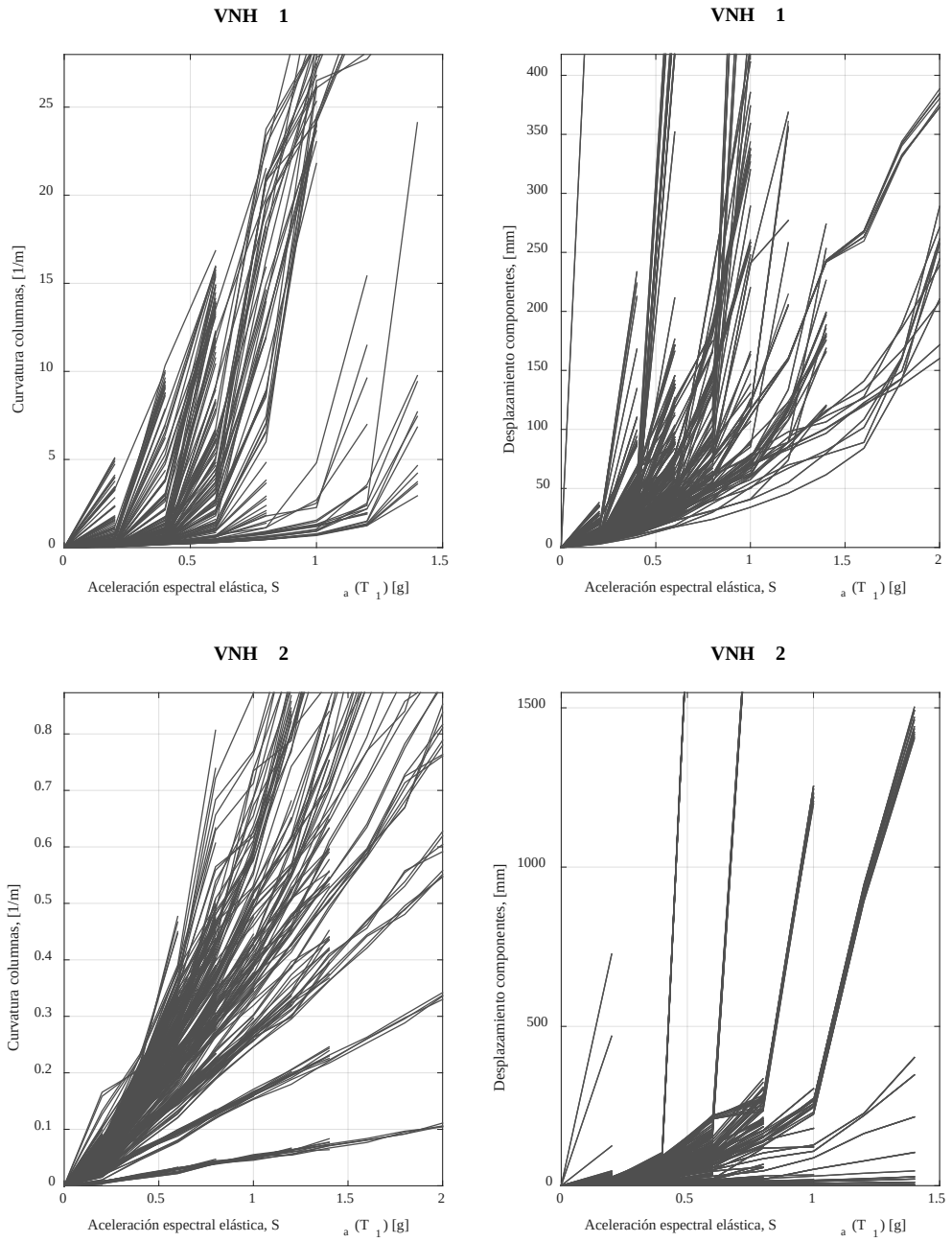


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

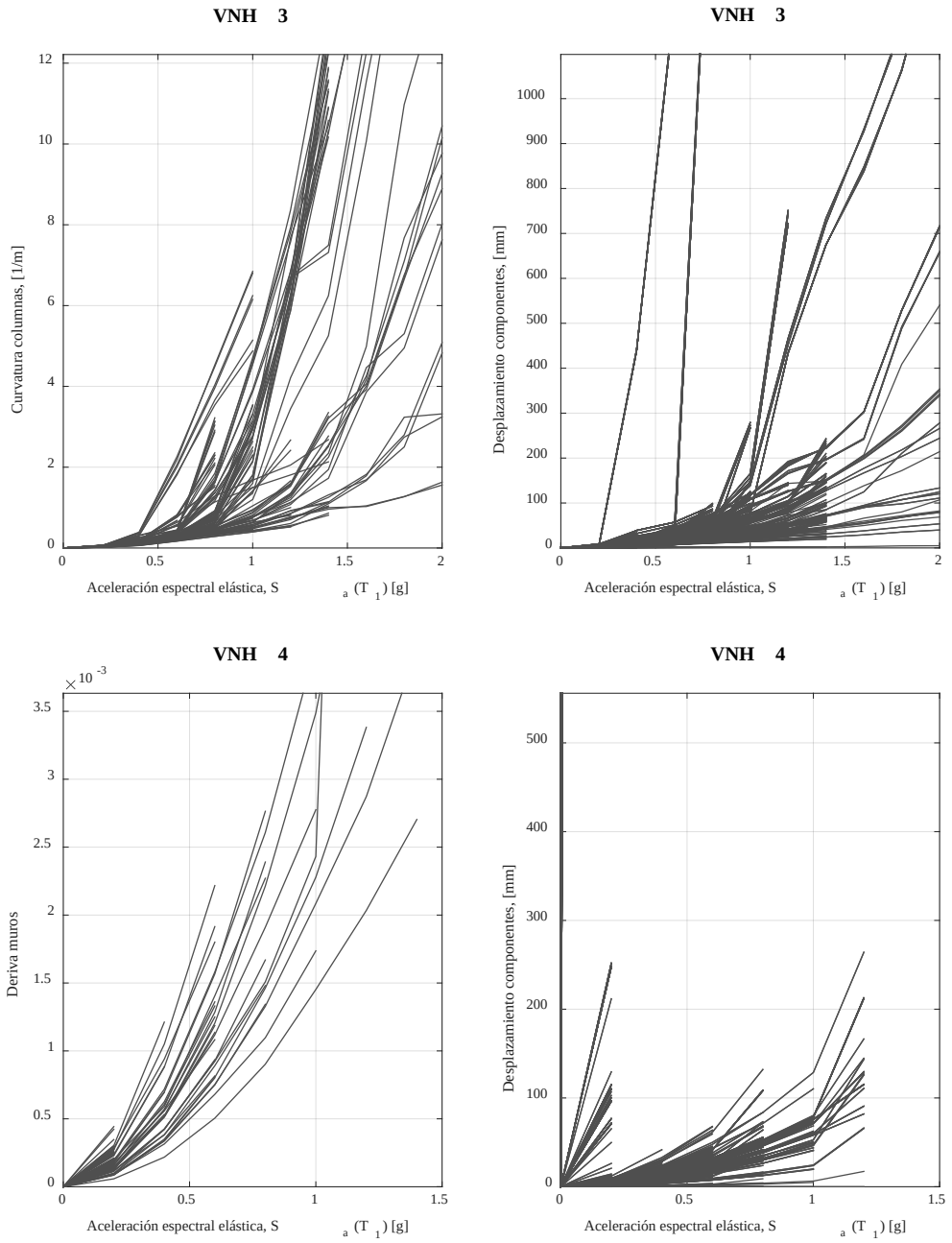


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

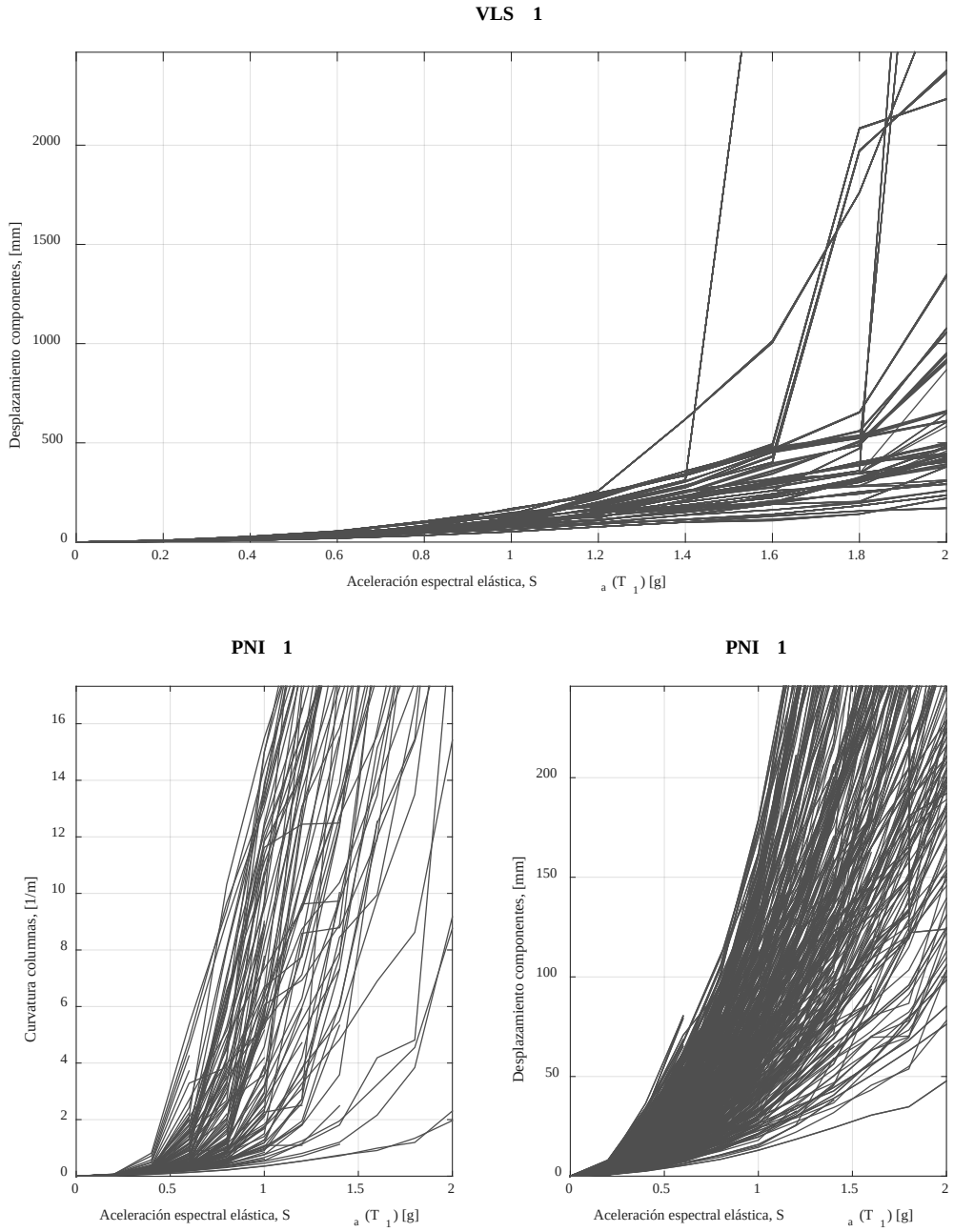


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

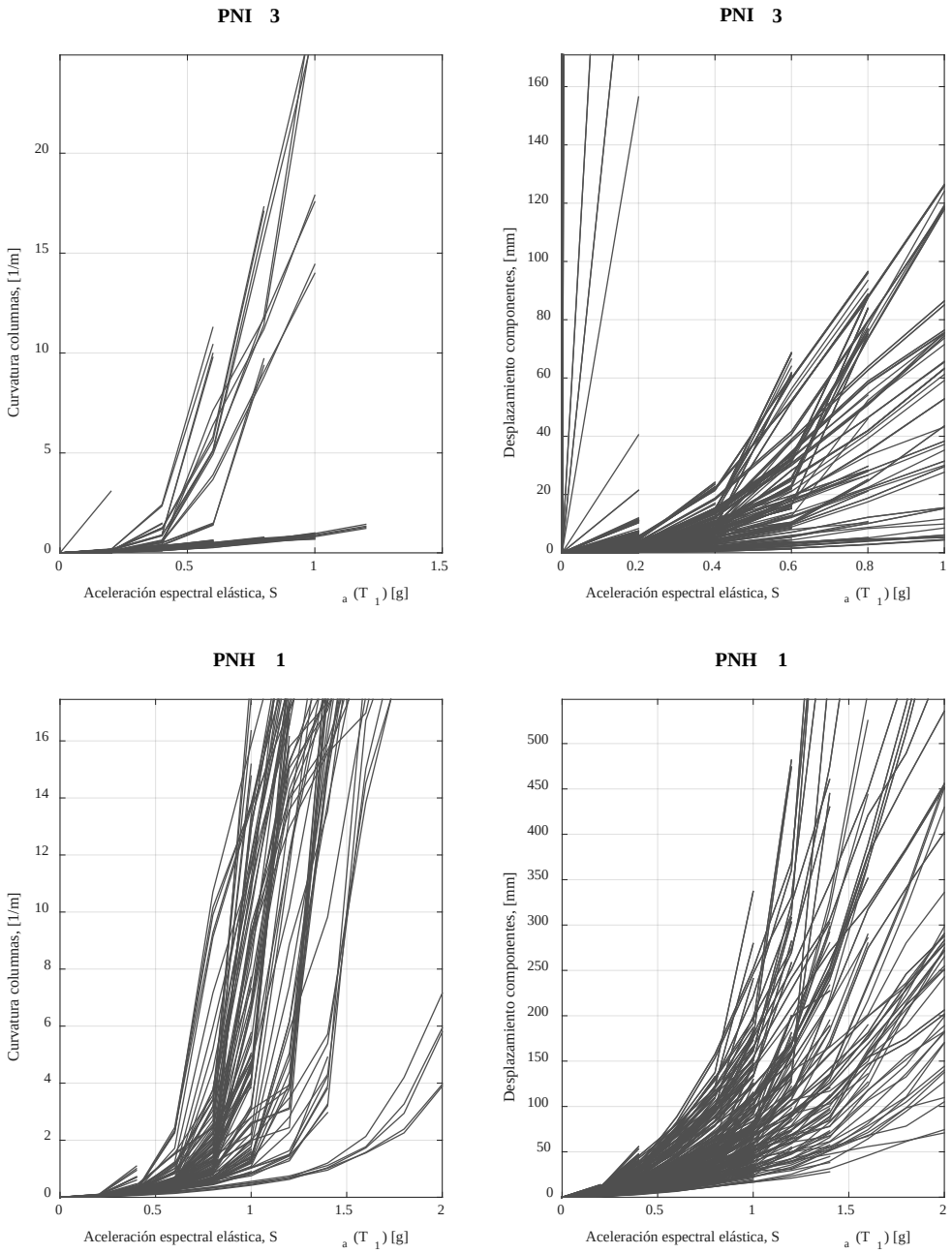


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

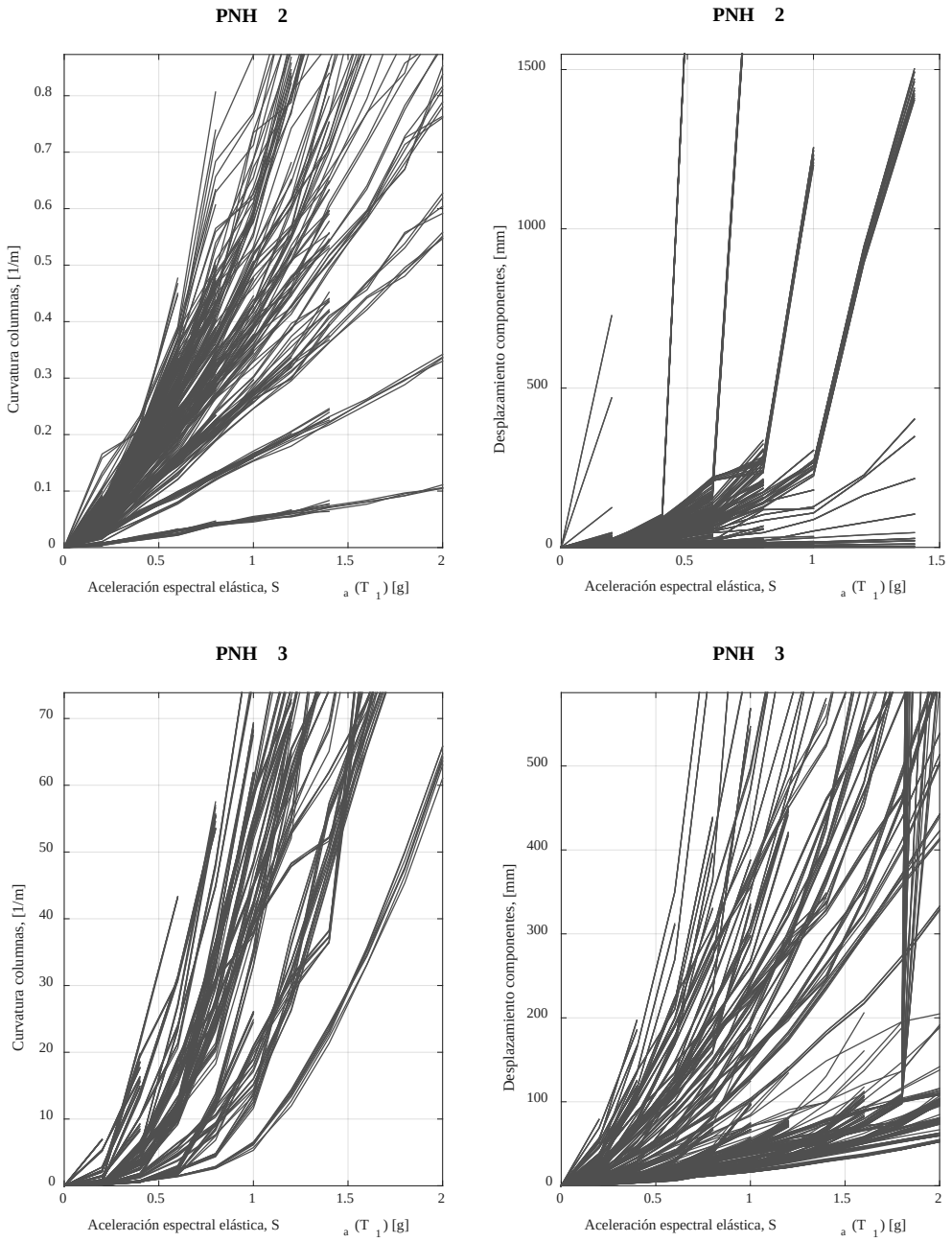


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

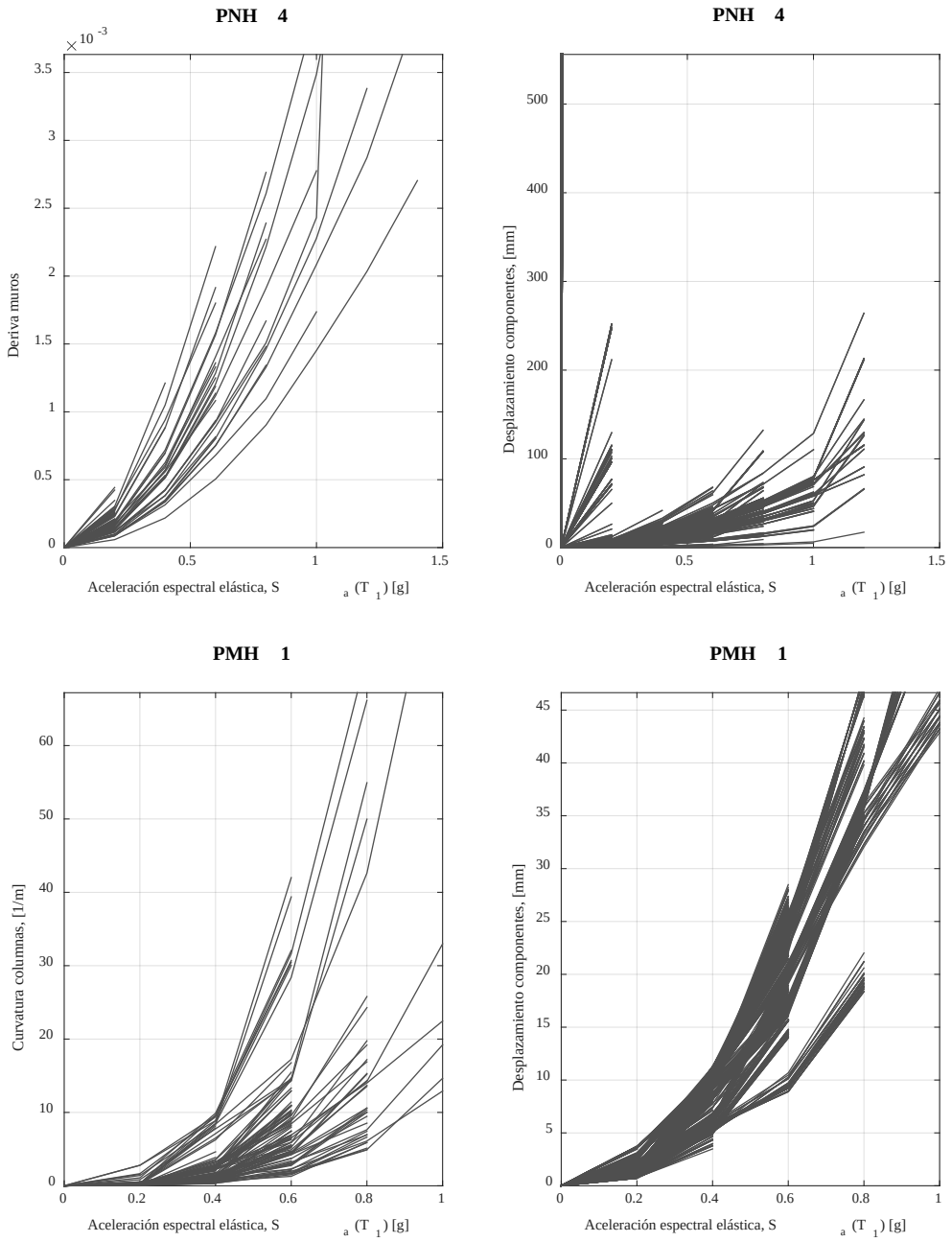


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología

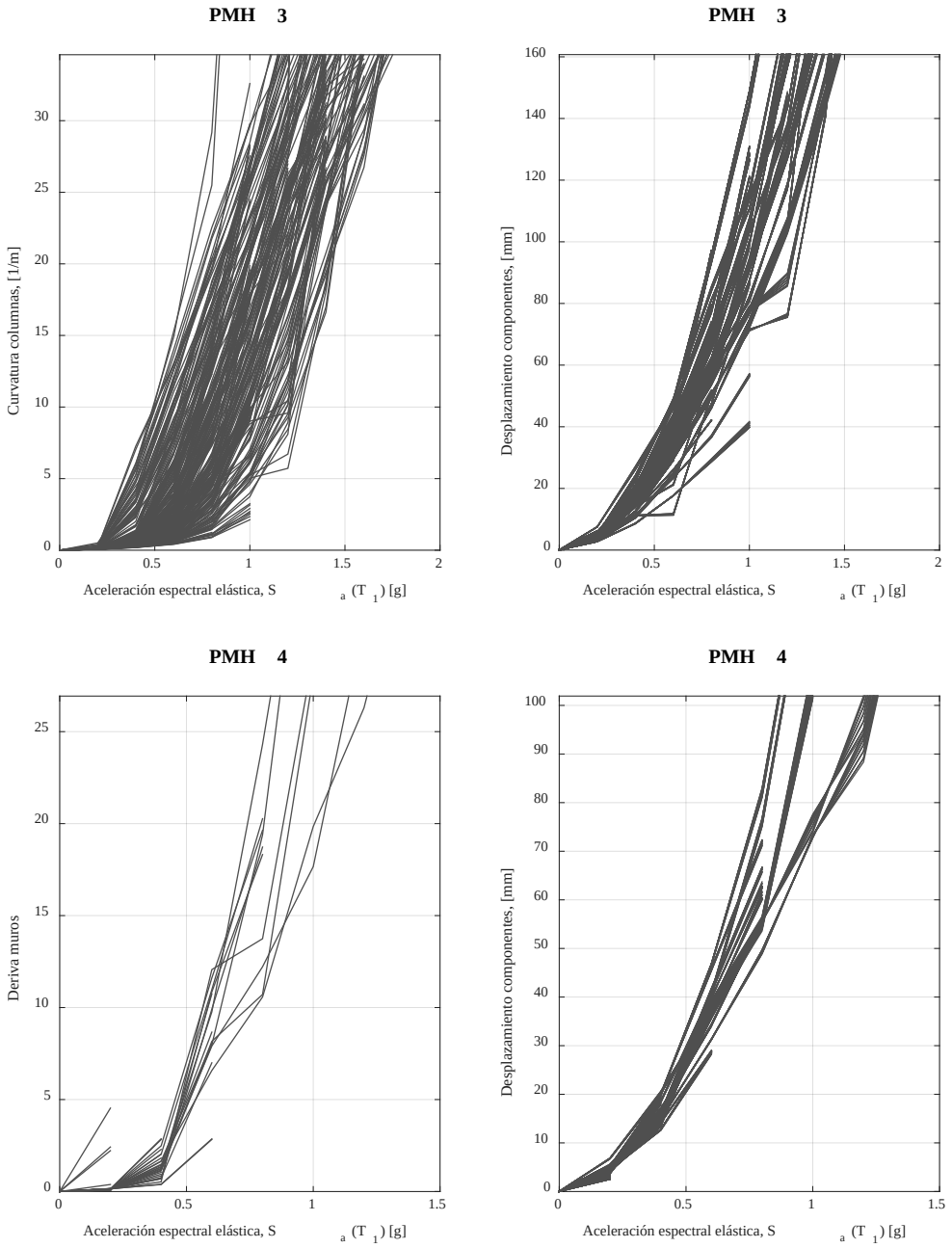
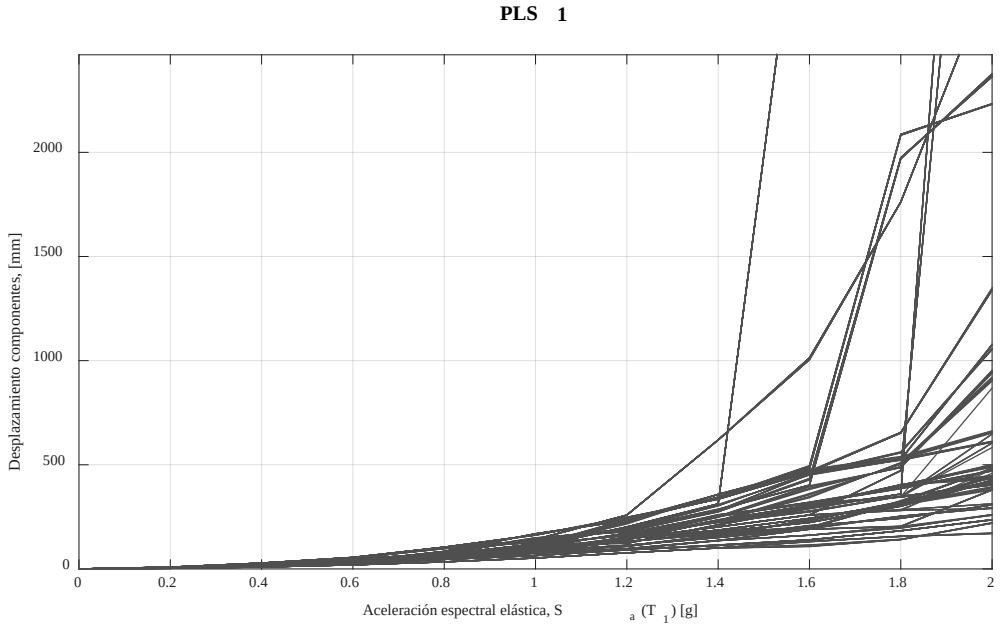


Figura 6-67. Parámetros de demanda sísmica por tipología



(Espacio en blanco intencional)

6.9 MODELOS DE COMPONENTES SUSCEPTIBLES A DAÑO

El modelo de componentes susceptibles a daño en cada tipología integra todos los componentes definidos como susceptibles a daño ante un evento sísmico. Para su confirmación, se debe realizar el siguiente proceso para cada componente:

1. Identificar el número de elementos de este componente en la tipología de análisis.
2. Cada componente debe ser incluido en el modelo no lineal y se debe identificar el parámetro de demanda sísmica (PDS) con el cual se asocia el daño. (p.e. ductilidad a la curvatura, desplazamiento, etc.)
3. Asociar al componente particular una función de fragilidad definida, la cual describe la probabilidad de tener un daño determinado dado un parámetro de demanda sísmica.
4. Para cada nivel de daño asociar unos costos de reparación aproximados, consistentes con los costos de la zona de estudio.
5. Integrar el modelo en el archivo de entrada de FUNVUL-BRIDGES.

De acuerdo con la Tabla 6-7, los principales parámetros de demanda sísmica de los componentes definidos para cada tipología son la ductilidad a la curvatura (μf) y desplazamiento (δ). Para algunos casos como los neoprenos, estribos y columnas se tienen fragilidades que dependen de la dirección de análisis.

En el marco del presente proyecto, se realiza una revisión bibliográfica detallada con el fin de recopilar información suficiente para poder representar los modelos de componentes para cada tipología, la cual se presentará en las siguientes secciones junto con la compilación de los modelos de componentes finales generados.

6.9.1 Funciones de fragilidad

Las funciones de fragilidad describen, para cada componente, la probabilidad de estar en un estado de daño dada una intensidad sísmica, como se representa en la Tabla 6-9. Como se describió en el numeral anterior, para cada componente se define el parámetro de demanda sísmica sobre el cual se va a evaluar el daño.

Cada uno de esos estados de daño, se define a partir de unos estados límite los cuales son identificados en análisis paramétricos o ensayos experimentales. Los estados límite describen la demanda media y la incertidumbre asociada para la cual existe el 50% de probabilidad de tener un daño determinado, Tabla 6-9.

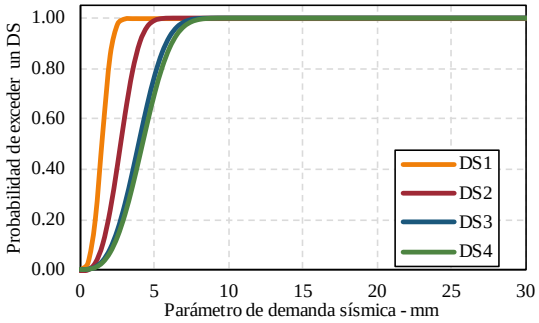
Tabla 6-9. Estados límite

Función Fragilidad	Componente	Parámetro	Leve	Moderado	Extensivo	Completo
P.COL.07	Columnas diseñadas sísmicamente	**μ (1/mm)**	4.890	9.150	12.460	13.080
		β (1/mm)	0.700	0.530	0.590	0.590
P.COL.08	Columnas no diseñadas sísmicamente	**μ (1/mm)**	1.440	2.700	3.920	4.180
		β (1/mm)	0.730	0.610	0.740	0.770
P.MR.01	Muros	**μ (mm/mm)**	0.009	0.013	0.019	-
		β (mm/mm)	0.500	0.350	0.450	-
P.NEO.01	Neoprenos antiguos	**μ (mm)**	37.5	56	75	93.7
		β (mm)	0.25	0.25	0.46	0.46
P.NEO.02	Neoprenos nuevos	**μ (mm)**	75	112	150	265
		β (mm)	0.25	0.25	0.46	0.46
P.LLA.02	Llave de cortante antigua	**μ (mm)**	1	7	14	22
		β (mm)	0.25	0.25	0.46	0.46
P.LLA.03	Llave de cortante nueva	**μ (mm)**	1	8	17	29
		β (mm)	0.25	0.25	0.46	0.46
P.EST.03	Estribo	**μ (mm)**	9.80	37.	77.2	-
		β (mm)	0.7	0.9	0.85	-

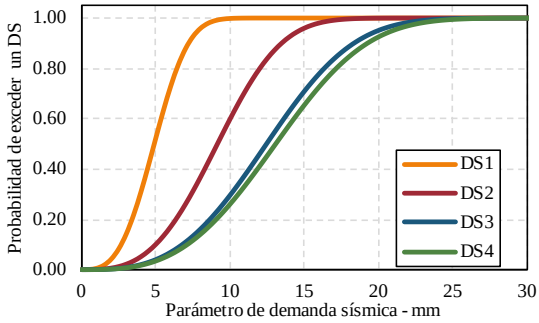
Cada estado de daño, a su vez tiene unas actividades de reparación asociadas para las cuales se genera un modelo de costos. La metodología de evaluación se obtiene a partir del APU disponible y se describe en detalle en el numeral 5.6.

6.9.2 Catálogo de funciones de fragilidad

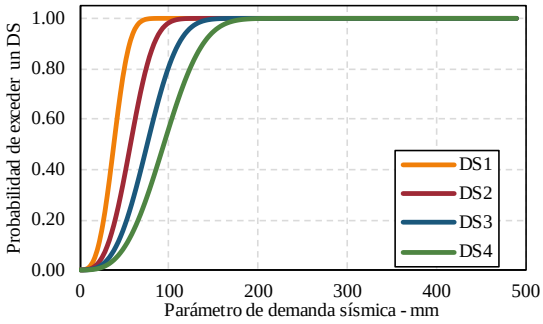
En la Figura 6-68, se presentan las funciones de fragilidad recopiladas en la literatura para representar el daño de los componentes susceptibles. A partir de estas, para cada tipología se conforman los modelos de componentes finales. Teniendo en cuenta que las funciones presentadas consideran dos niveles de diseño, se tendrá en cuenta en que las tipologías más recientes no solo se diferencian dentro del comportamiento no lineal, sino también en sus modelos de componentes.



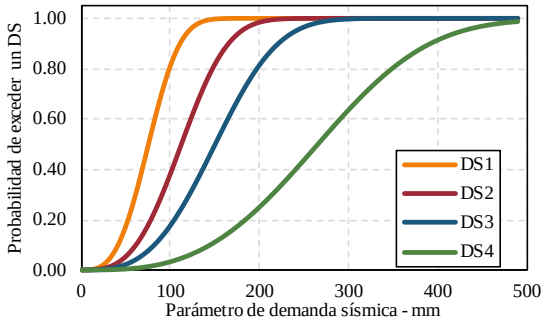
a. P.COL.08 - Columnas no diseñadas sísmicamente
Ramanathan *et al.* (2010)



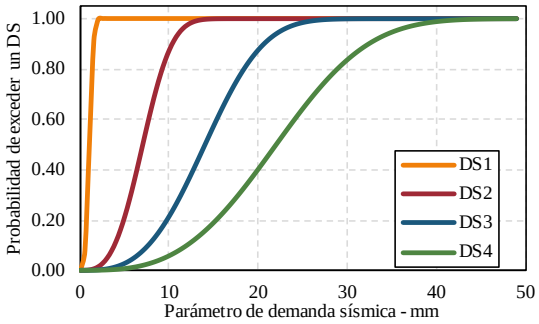
b. P.COL.07 - Columnas diseñadas sísmicamente
Ramanathan *et al.* (2010)



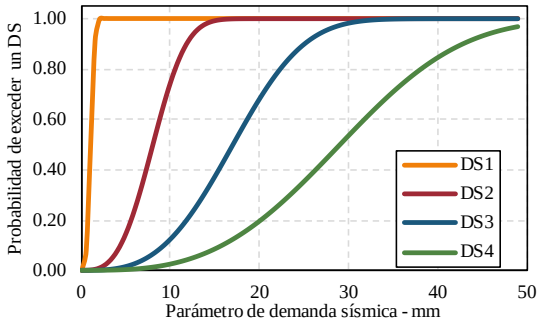
c. P.NEO.01 - Neoprenos antiguos
Zakeri *et al.* (2014)



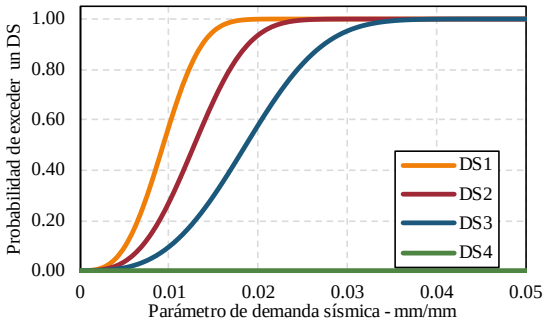
d. P.NEO.02 - Neoprenos nuevos
Zakeri *et al.* (2014)



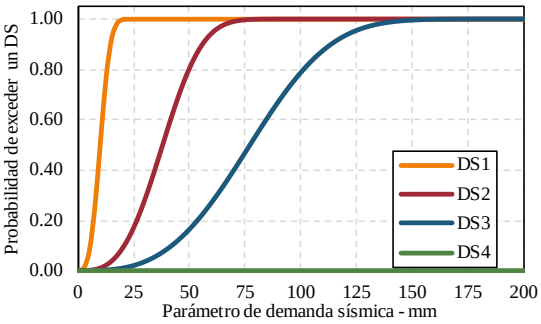
e. P.LLA.02 - Llave de cortante antigua
Zakeri *et al.* (2014)



f. P.LLA.03 - Llave de cortante nueva
Zakeri *et al.* (2014)



g. P.MR.01 – Muro
FEMA P-58



h. P.EST.03 – Estribo
Nielson *et al.* (2005)

Figura 6-68. Catálogo de funciones de fragilidad

6.9.3 Costos de reparación

En el Capítulo 5 se detalla la metodología de valoración económica de las actividades de reparación, relacionando los costos para cada uno de los estados de daño de los componentes presentados en la Figura 6-68. Los valores corresponden a costos unitarios, los cuales tienen en cuenta las cantidades especificadas en el modelo de componentes, teniendo en cuenta que puede haber modelos de componentes cuya probabilidad de daño es representada por una misma fragilidad, pero que dadas las variaciones geométricas que pueden existir dentro de un mismo modelo, varían también sus costos de reposición.

6.9.4 Modelo de componentes

La Tabla 6-10 presenta el modelo de componentes final para la tipología VMH_3. En el Anexo A-8 se presentan los modelos para cada una de las tipologías presentes.

Tabla 6-10. Modelo de componentes tipo

Luz	ID Eje	Tipo	Componente	Tamaño	Cantidad	Función Fragilidad	PDS
1_2	E2	C	Columna diseñada sísmicamente	4.074	1	P.COL.07_2	DuctCurvature
2_3	E3	C	Columna diseñada sísmicamente	4.914	1	P.COL.07_3	DuctCurvature
3_4	E4	C	Columna diseñada sísmicamente	4.914	1	P.COL.07_3	DuctCurvature
4_5	E5	C	Columna diseñada sísmicamente	4.914	1	P.COL.07_3	DuctCurvature
5_6	E6	C	Columna diseñada sísmicamente	4.074	1	P.COL.07_2	DuctCurvature
6_7	E7	C	Columna diseñada sísmicamente	3.066	1	P.COL.07_1	DuctCurvature
1	E1	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
1_2	E2	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
2_3	E3	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
3_4	E4	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
4_5	E5	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
5_6	E6	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
6_7	E7	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
7	E8	BT	Neopreno de buena calidad	0.12	1	P.NEO.02_1	Displacement
1	E1	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
1	E1	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
1_2	E2	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
2_3	E3	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
3_4	E4	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
4_5	E5	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
5_6	E6	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
6_7	E7	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
7	E8	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
7	E8	SK	Conector sísmico	0	1	P.LLA.03_1	Displacement
1	E1	SK	Tope sísmico	0.0045	1	P.LLA.03_2	Displacement
7	E8	SK	Tope sísmico	0.0045	1	P.LLA.03_2	Displacement
1	E1	BF	Estribo	16.652	1	P.EST.03_1	Displacement
1	E1	BF	Estribo	16.652	1	P.EST.03_1	Displacement

6.10 CATÁLOGO DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

En la Figura 6-69 se presentan las funciones de vulnerabilidad de las tipologías presentes en el portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá. Para cada tipología se presentan tres curvas, el modelo real (rojo), diseño alto (azul) y diseño bajo (verde). El modelo real corresponde a un puente arquetipo con características y parámetros taxonómicos principales representativos de las condiciones reales de los puentes en Bogotá, según la recopilación de información de planos, levantamiento en campo, y revisión de registros fotográficos. Las variaciones en el parámetro taxonómico de nivel de diseño sísmico son representadas mediante los modelos de diseño alto y bajo, teniendo en cuenta el cumplimiento total del código en el diseño alto, y la presencia de las deficiencias de todos sus componentes para el diseño bajo. Estos modelos pretenden servir de límites superior e inferior para acotar el rango posible de las funciones de vulnerabilidad que se puedan generar por una variación de los parámetros taxonómicos secundarios.

Figura 6-69. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología

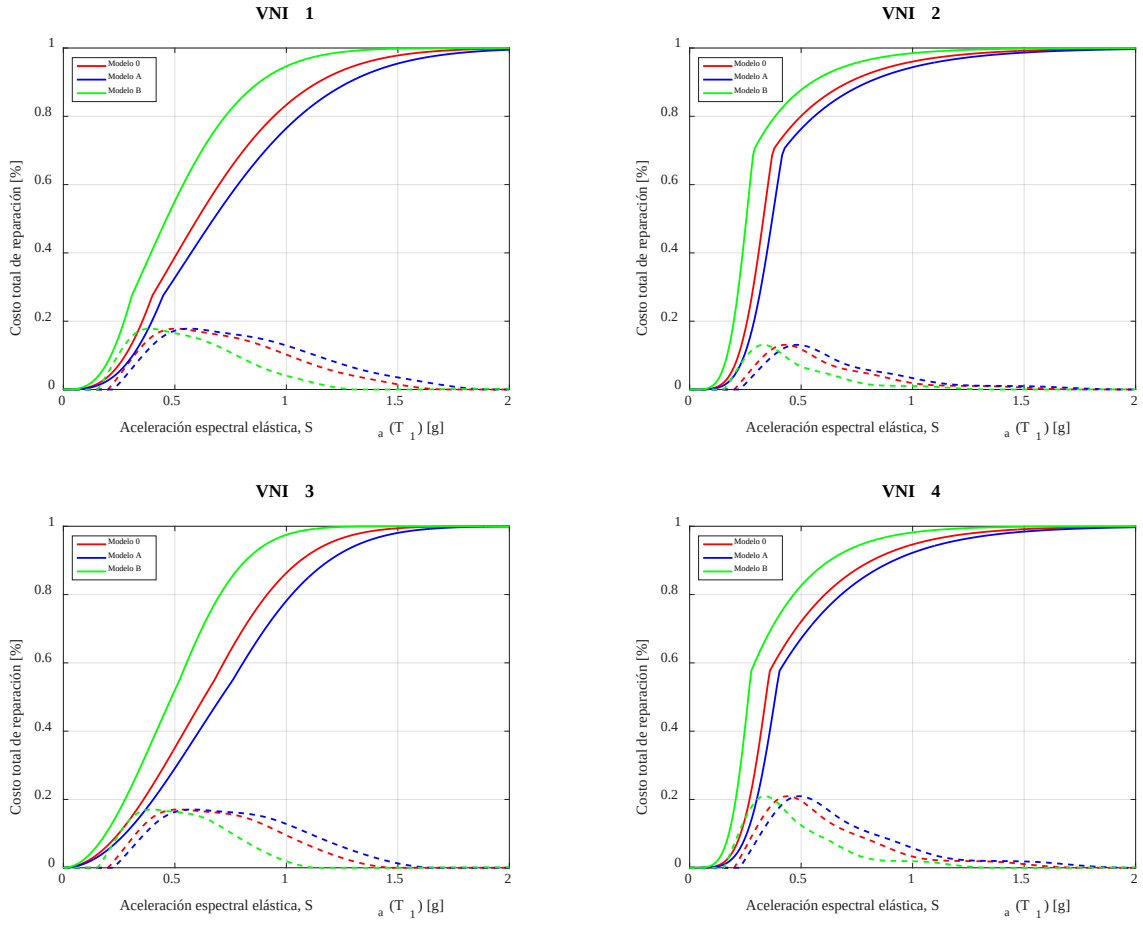
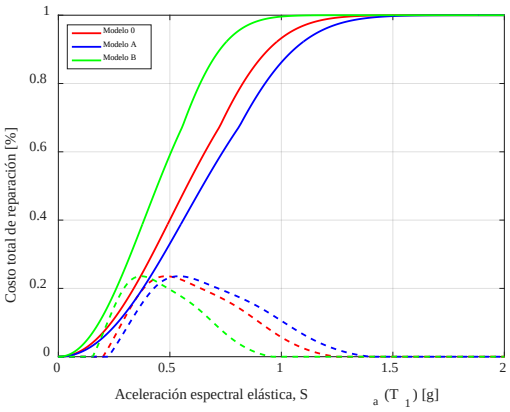
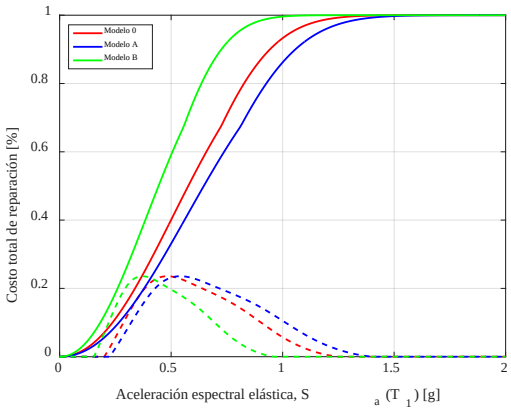


Figura 6-69. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología

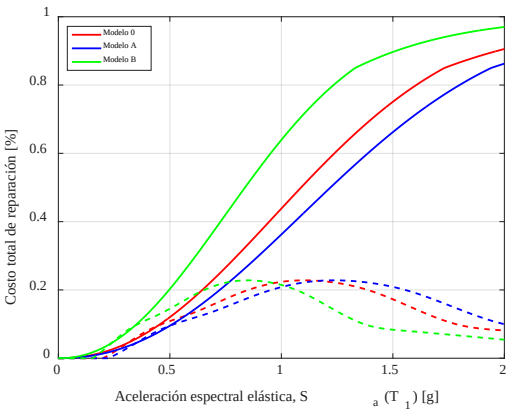
VMH 1



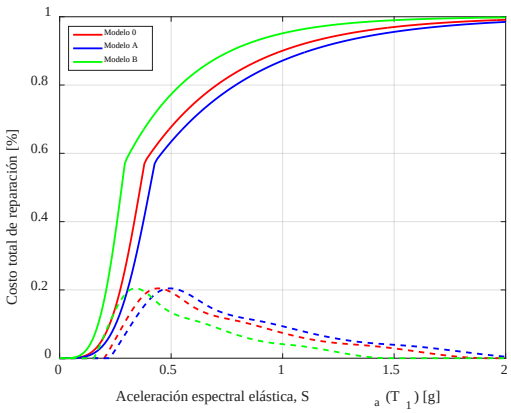
VMH 2



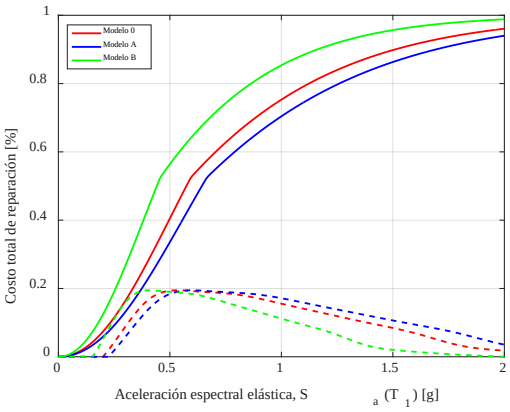
VMH 3



VMH 4



VNH 1



VNH 2

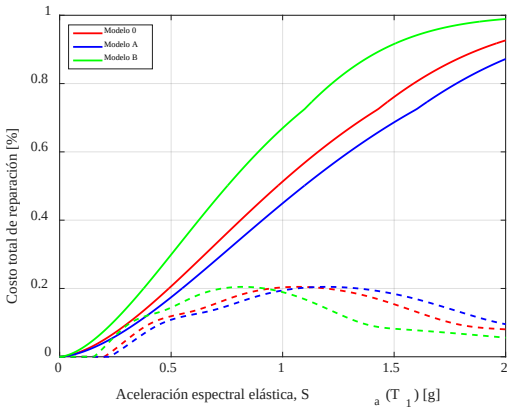


Figura 6-69. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología

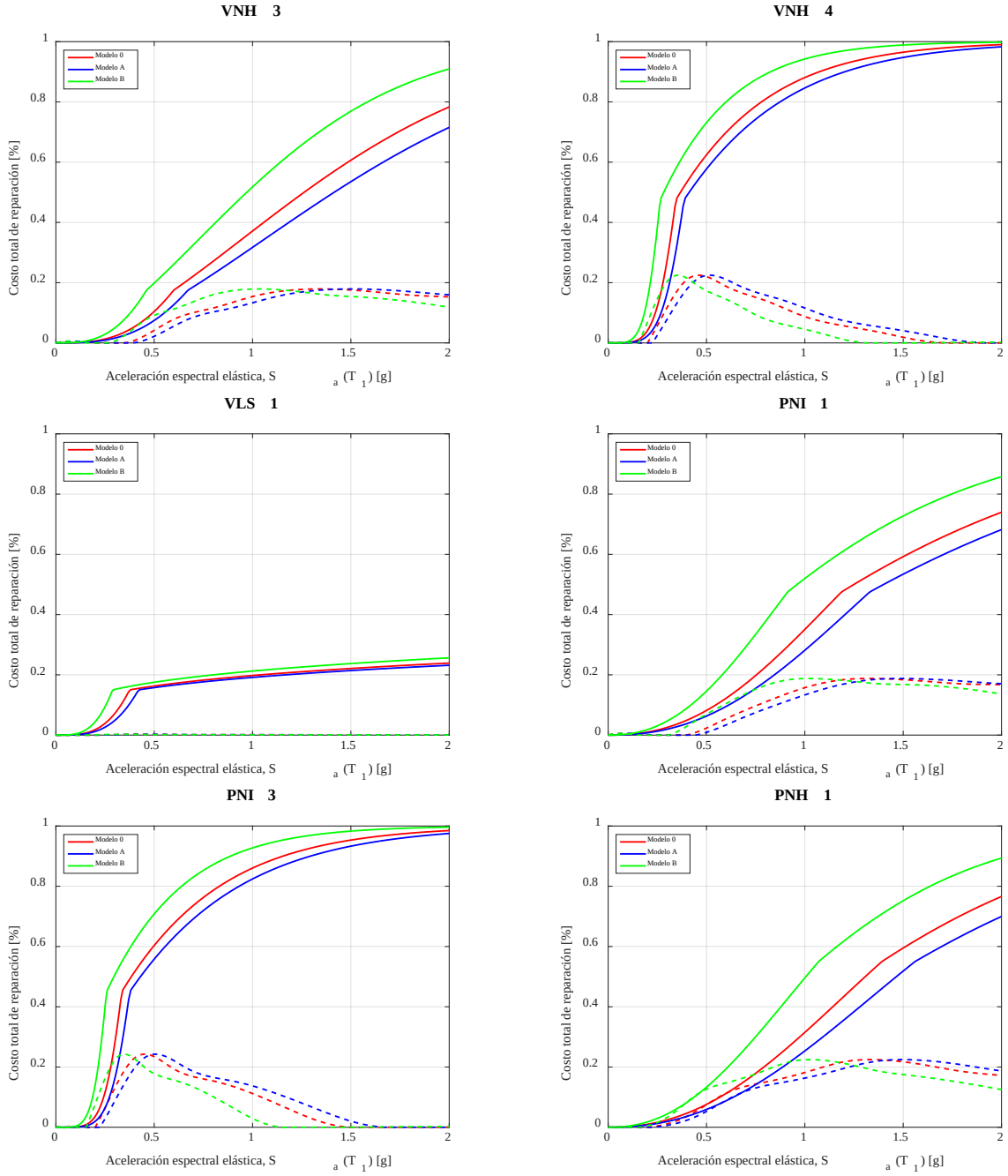


Figura 6-69. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología

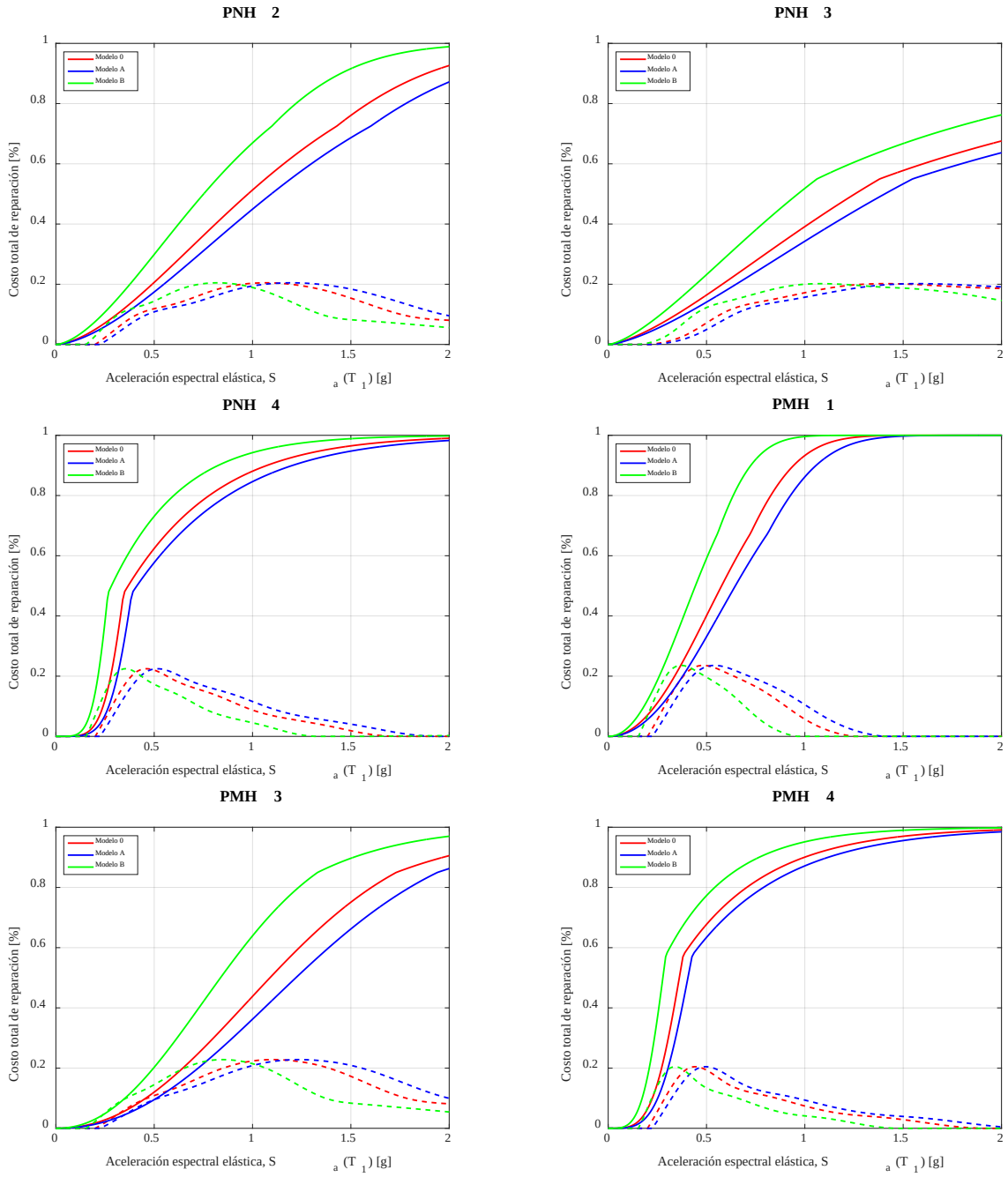
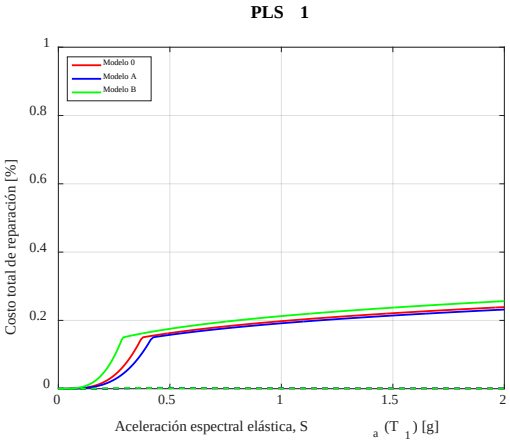


Figura 6-69. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología



6.10.1 Análisis de sensibilidad

En el numeral 6.2.2 se definen los parámetros taxonómicos utilizados en la base de datos para clasificar cada puente. Estos parámetros se encuentran enumerados en la Tabla 6-1. La clasificación taxonómica se utiliza como criterio para asignar a cada puente una función de vulnerabilidad sísmica particular. Las funciones de vulnerabilidad fueron calculadas inicialmente para puentes arquetipo con una configuración típica, generados a partir de información obtenida de planos de construcción. Se obtuvieron funciones de vulnerabilidad básicas para cada una de las tipologías identificadas con base en los dos primeros parámetros taxonómicos: sistema estructural principal y nivel de diseño sísmico. Con el fin de identificar la influencia de los demás parámetros taxonómicos en la vulnerabilidad sísmica, se realizó un análisis de sensibilidad que involucró el cálculo de funciones de vulnerabilidad a partir de modelos estructurales en los que se consideraron variaciones en otros parámetros. Se utilizó como modelo base el modelo desarrollado para la tipología VNI_3, debido a que esta tipología es la más representativa para puentes de gran envergadura (se excluyen puentes de luz simple y box culvert), y adicionalmente representa la mayor área construida y valor expuesto del portafolio. Estas funciones de vulnerabilidad fueron comparadas posteriormente con las obtenidas previamente para los puentes arquetipo básicos y se determinaron factores de relación entre las funciones básicas y las funciones con variaciones o factores de afectación.

Los parámetros para los que se investigó la sensibilidad, siguiendo la nomenclatura indicada en la Tabla 6-1, son: (3) tipo de suelo, (4) número de luces, (5) cantidad de elementos verticales por eje, (6) tipo de cimentación, (7) ángulo de esviaje, (9) curvatura horizontal, (10) curvatura vertical y (12) cantidad de elementos verticales por eje. A continuación, se describen las variaciones consideradas para cada uno de los parámetros y se presenta la comparación entre la función de vulnerabilidad del puente arquetipo y la respectiva función para el puente con variación en uno de los parámetros. En la Tabla 6-14 se presentan los factores de afectación para aplicar a las funciones de vulnerabilidad básicas, para considerar los parámetros taxonómicos diferentes al sistema estructural principal y al nivel de diseño sísmico. Los factores de afectación multiplican a la coordenada de intensidad sísmica de las funciones de vulnerabilidad para desplazarlas a la izquierda o derecha y hacerlas más o menos vulnerables. Factores de afectación menores

que 1.0 indican un incremento de la vulnerabilidad, mientras que factores mayores que 1.0 indican reducción en la vulnerabilidad.

6.10.1.1 Tipo de suelo

El modelo base (VNI3_0) fue analizado con un grupo de 33 señales, de las cuales 11 corresponden a roca, 11 corresponden a suelo intermedio y 11 corresponden a suelo blando. Para evaluar la influencia del tipo de suelo en la vulnerabilidad sísmica, se generaron tres modelos nuevos con las mismas propiedades que el modelo base, pero fueron analizados independientemente para grupos de 33 señales en roca (modelo VNI3_R), 33 señales en suelo intermedio (modelo VNI3_I) y 33 señales en suelo blando (modelo VNI3_L). Adicionalmente, se realizó un análisis para el grupo completo de 99 señales (modelo VNI3_N), con el fin de evaluar la influencia de la cantidad de señales. En la Figura 6-70 se muestran las funciones de vulnerabilidad obtenidas para los tres tipos de suelos en comparación con el modelo base. Como se observa en la gráfica, el suelo blando tiene una influencia negativa en la vulnerabilidad sísmica, mientras que el suelo duro tiene el efecto contrario. La vulnerabilidad para suelo intermedio resulta muy similar a la del modelo base. En la gráfica también se observa que el considerar una mayor cantidad de señales en el análisis no tiene una gran influencia en el resultado. Los factores de afectación por tipo de suelo se resumen más adelante en la Tabla 6-14.

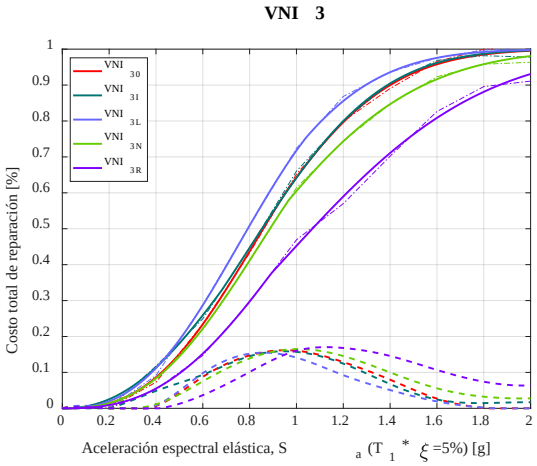


Figura 6-70. Vulnerabilidad sísmica con diferentes tipos de suelo

6.10.1.2 Cantidad de luces

El modelo estructural básico representa a un puente de siete luces. Para considerar la influencia de la cantidad de luces en la vulnerabilidad sísmica, se generaron cuatro modelos adicionales, con 3, 5, 9 y 11 luces. En la Figura 6-71 se presenta el modelo en la obtención de la función de vulnerabilidad básica para la tipología más representativa. En la Figura 6-72 se muestran los modelos generados con diferentes cantidades de luces.

En la Figura 6-73 se presentan las funciones de vulnerabilidad obtenidas para los puentes con menor y mayor cantidad de luces respectivamente. En la Figura 6-74 y en la Tabla 6-14 se presenta la relación obtenida para el factor de afectación por cantidad de luces.

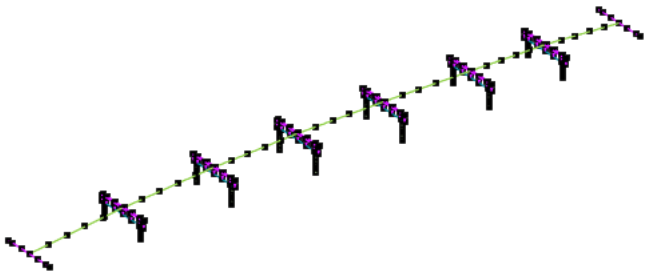
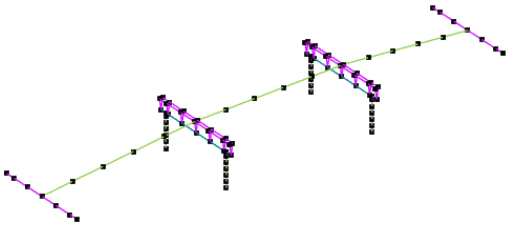
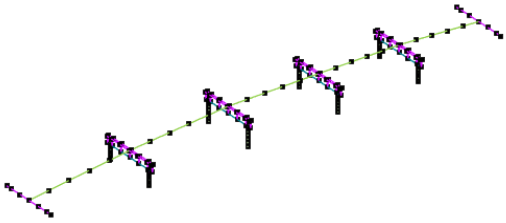


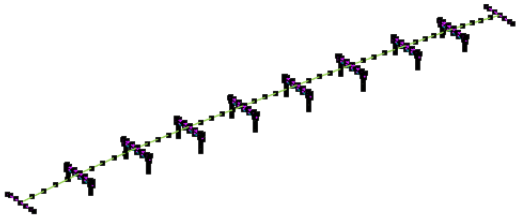
Figura 6-71. Modelo básico VNI_3_0 – 7 luces



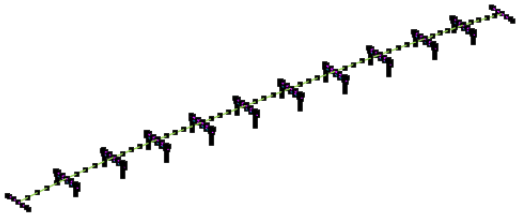
Modelo VNI_3_K - 3 luces



Modelo VNI_3_D - 5 luces

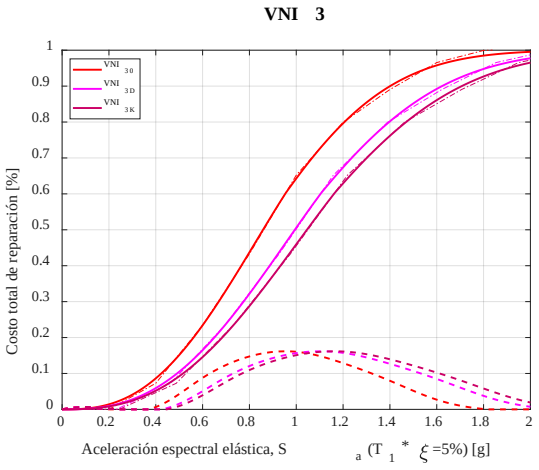


Modelo VNI3_C - 9 luces

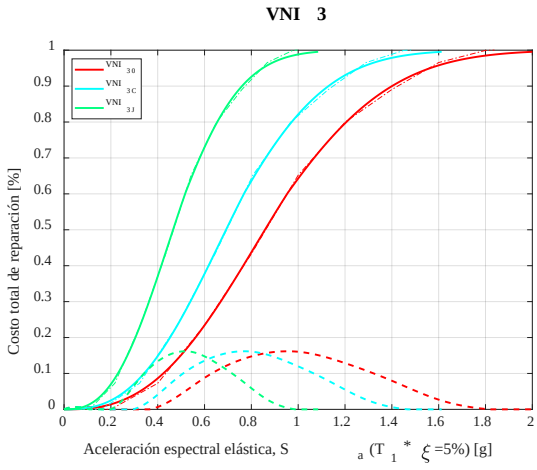


Modelo VNI3_J - 11 luces

Figura 6-72. Modelos con variaciones en la cantidad de luces



Puentes con menos luces



Puentes con más luces

Figura 6-73. Cantidad de luces y vulnerabilidad sísmica

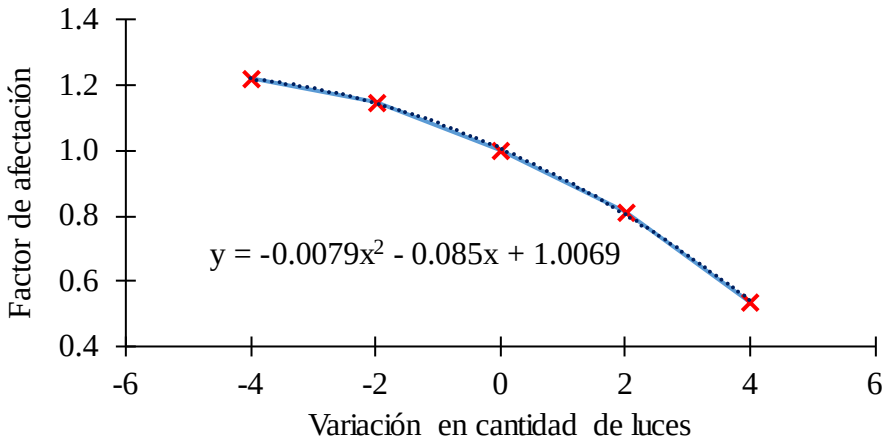


Figura 6-74. Factor de afectación por cantidad de luces

6.10.1.3 Cantidad de elementos verticales por eje

Para considerar el efecto de la cantidad de columnas por pórtico, se generó un modelo estructural con tres columnas por pórtico y tablero más ancho (Figura 6-75). En la Figura 6-76 se presenta la comparación de las funciones de vulnerabilidad para el puente arquetipo, con dos columnas por pórtico, y el puente con tres columnas por pórtico.

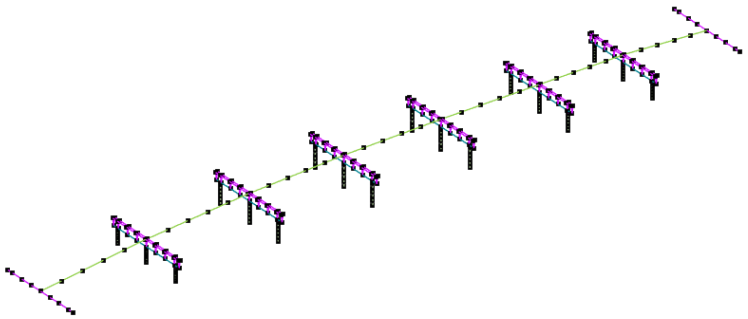


Figura 6-75. Modelo con tres columnas por pórtico

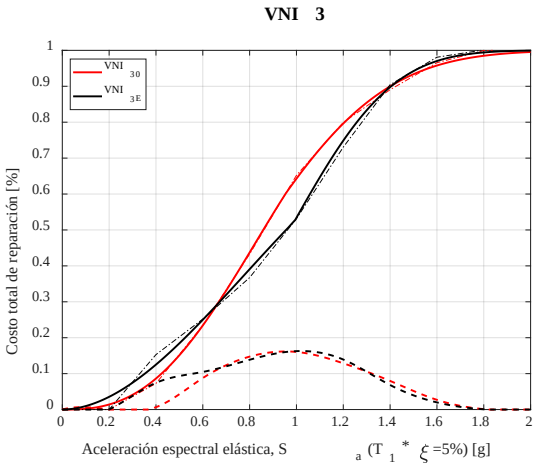
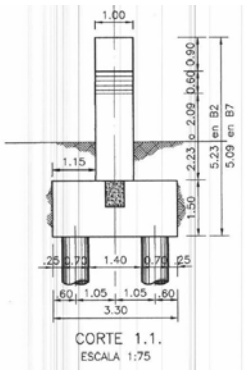


Figura 6-76. Vulnerabilidad sísmica por cantidad de columnas por pórtico

6.10.1.4 Tipo de cimentación

El modelo base fue generado con consideración de base empotrada. Con el fin de verificar la influencia de la interacción dinámica suelo-estructura, es decir, considerar la flexibilidad y el amortiguamiento del sistema suelo-cimentación, se generó un modelo apoyado sobre resortes y amortiguadores. Las rigideces y amortiguamientos del sistema suelo-cimentación fueron obtenidas con el programa Dynapile y se calcularon para un grupo de pilotes típico con 70 cm de diámetro, 30m de longitud y configuración de 2 x 2, sobre un perfil de suelo intermedio con velocidad de onda de corte v_s = 200m/s, para la frecuencia natural del puente. En la Figura 6-77 se presenta la geometría de la cimentación típica considerada para el puente modelado, mientras que en la Figura 6-78 se muestra el modelo en el programa Dynapile.

En la Figura 6-79 se presenta la comparación entre la función de vulnerabilidad obtenida para el modelo base (VNI3_0) y el modelo que considera la flexibilidad y el amortiguamiento del sistema suelo-cimentación (VNI_0_M). Como se observa en la figura, la influencia de esta consideración es baja, por lo que la se valida la consideración de base empotrada.



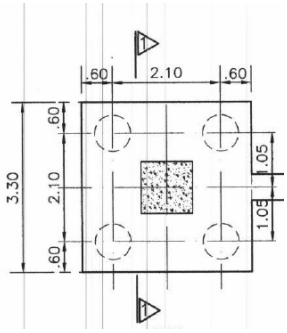


Figura 6-77. Cimentación típica

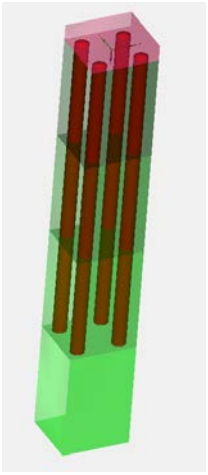


Figura 6-78. Modelo en Dynapile

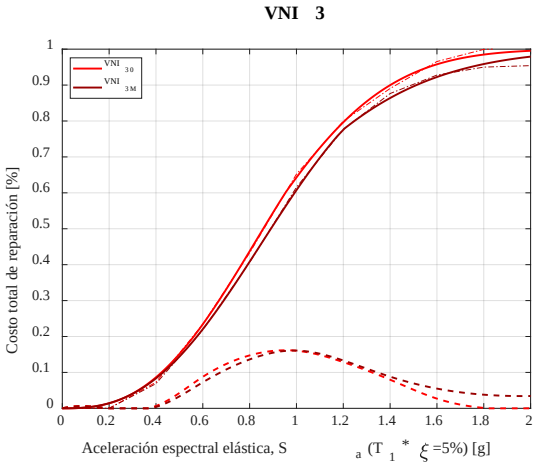


Figura 6-79. Vulnerabilidad sísmica con interacción dinámica suelo-estructura

6.10.1.5 Ángulo de esviaje, curvatura horizontal y curvatura vertical

Para estudiar la influencia de la presencia de esviaje y de curvaturas horizontales y verticales, se generaron tres modelos adicionales: un modelo con esviaje de 30° (VNI3_G), un modelo con curvatura horizontal con R = 100 m (VNI3_H) y un modelo sin curvatura vertical (VNI3_F), teniendo en cuenta que el modelo base tenía este tipo de curvatura. En la Figura 6-80 se muestran los modelos mencionados. En la Figura 6-81 se presentan las funciones de vulnerabilidad obtenidas a partir de los modelos con variación en los parámetros mencionados, en comparación con la vulnerabilidad para el puente base. En la Tabla 6-14 se presentan los factores de afectación calculados para estos tres parámetros taxonómicos.

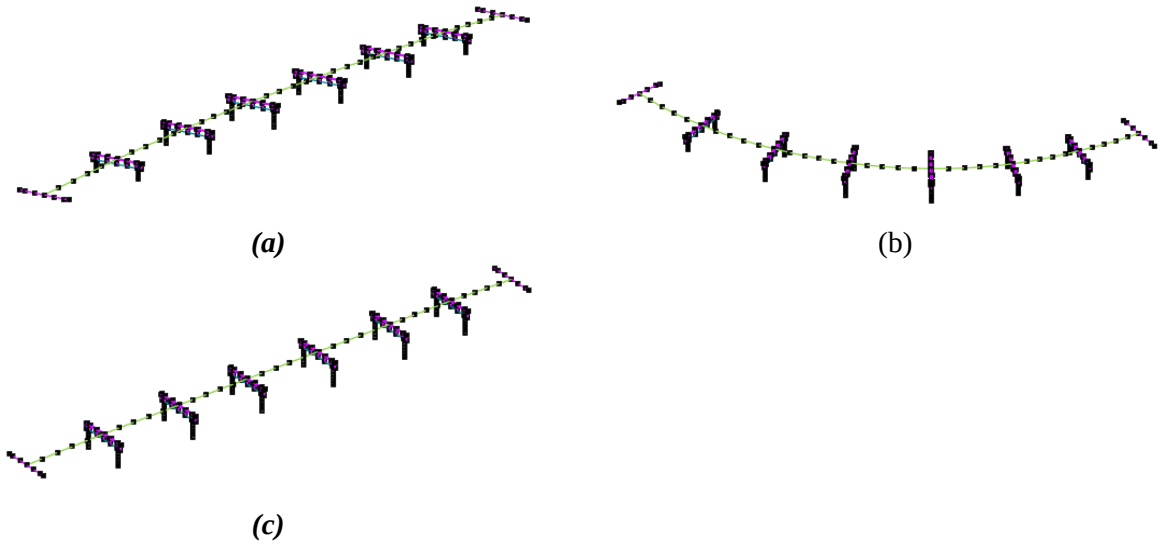


Figura 6-80. (a) Modelo con esviaje, (b) Modelo con curvatura horizontal y (c) Modelo sin curvatura vertical

(Espacio en blanco intencional)

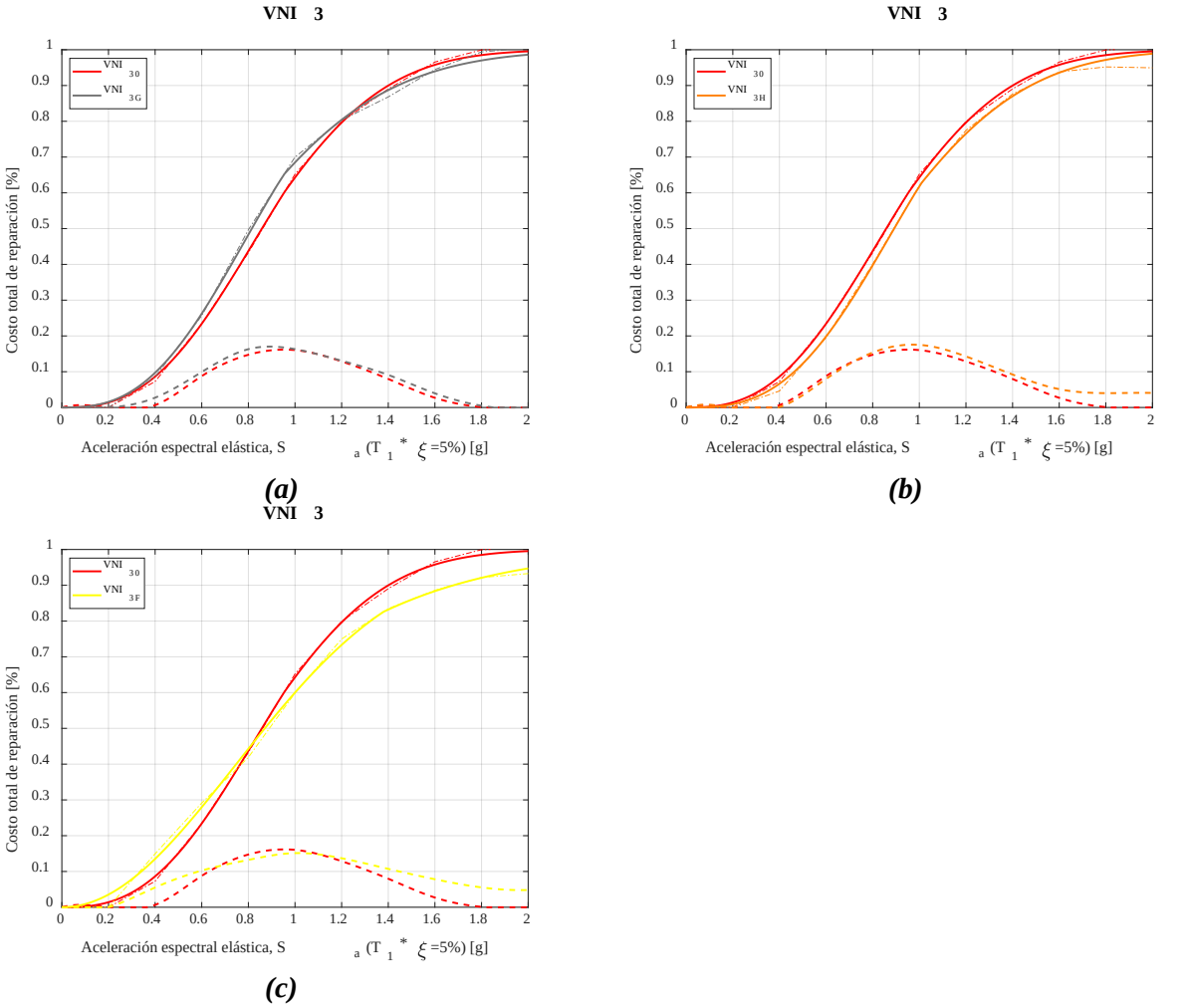


Figura 6-81. Vulnerabilidad para puentes con (a) esviaje, (b) curvatura horizontal y (c) sin curvatura vertical

6.10.2 Tipologías particulares

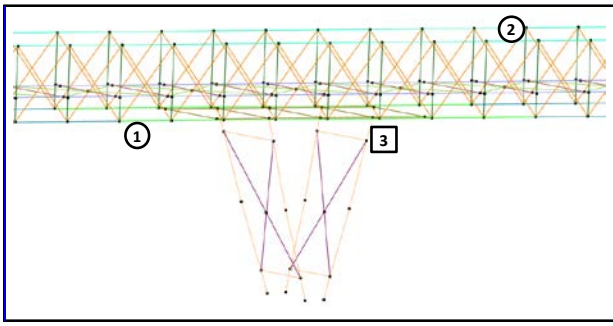
6.10.2.1 Puente Prototipo Bogotá

Para el análisis de los puentes Prototipo Bogotá se realizó un modelo tridimensional detallado no lineal que se resume en la Figura 6-63. En este modelo se consideran los siguientes elementos susceptibles a daño:

- Apoyo articulado en la base de la subestructura
- Columna metálica
- Diagonal metálica
- Conexión articulada de la subestructura y la superestructura
- Viga de apoyo
- Cordón inferior cercha superestructura
- Cordón superior cercha superestructura

- Tensores en superestructura
- Viguetas

A partir de los análisis realizados se pudo establecer que los elementos críticos son el cordón inferior, el cordón superior y la conexión articulada de la subestructura y la superestructura. Estos elementos y su conectividad en el modelo se pueden observar en la Figura 6-82.



	Componentes y conectividad
1	Cordón inferior
2	Cordón superior
3	Conexión articulada
3	Conexión articulada

Figura 6-82. Elementos susceptibles a daño en Puente Prototipo Bogotá

A partir de este se realizó un análisis incremental dinámico con el fin de caracterizar el comportamiento estructural esperado. De la Figura 6-83 a la Figura 6-85 se pueden ver los parámetros de demanda sísmica obtenidos y el límite de capacidad de cada uno de los elementos. En los resultados se puede identificar que la demanda nunca excede la capacidad en ninguno de los sismos analizados.

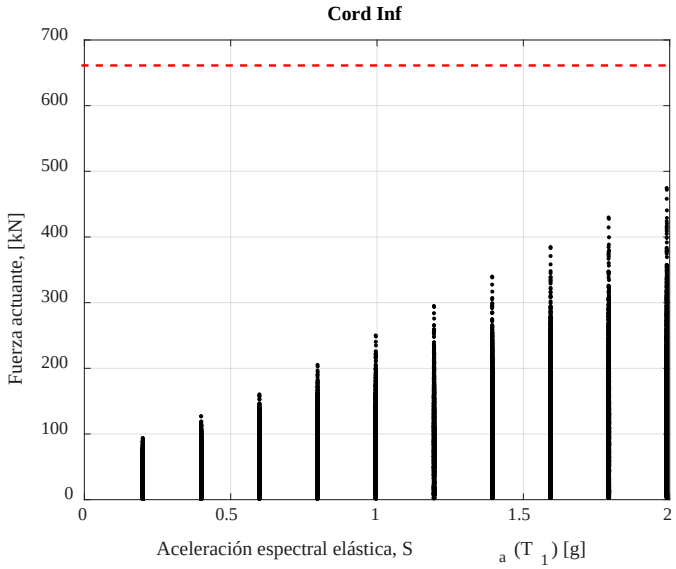


Figura 6-83. Fuerza actuante en el cordón inferior

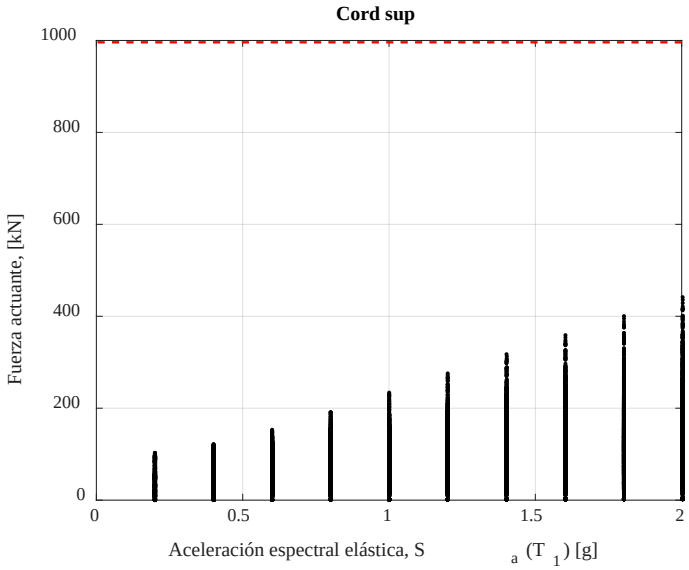


Figura 6-84. Fuerza actuante en el cordón superior

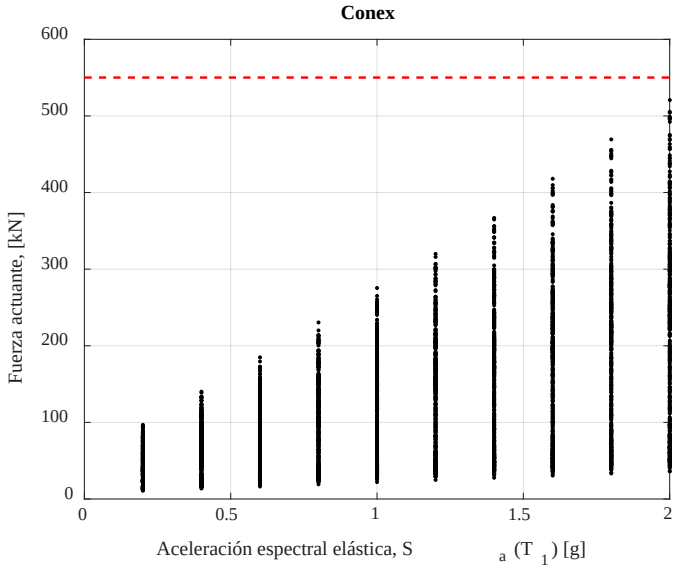


Figura 6-85. Fuerza actuante en las conexiones de elementos de la subestructura

Teniendo en cuenta estos resultados es posible asumir que los puentes Prototipo Bogotá se mantienen en el rango lineal para aceleraciones espectrales alrededor de 2.0g. Lo anterior implica que los daños esperados en este tipo de estructuras serán muy bajos. Por esta razón, para el análisis probabilista del riesgo se asigna una función de no daño, como se puede ver en la Figura 6-86.

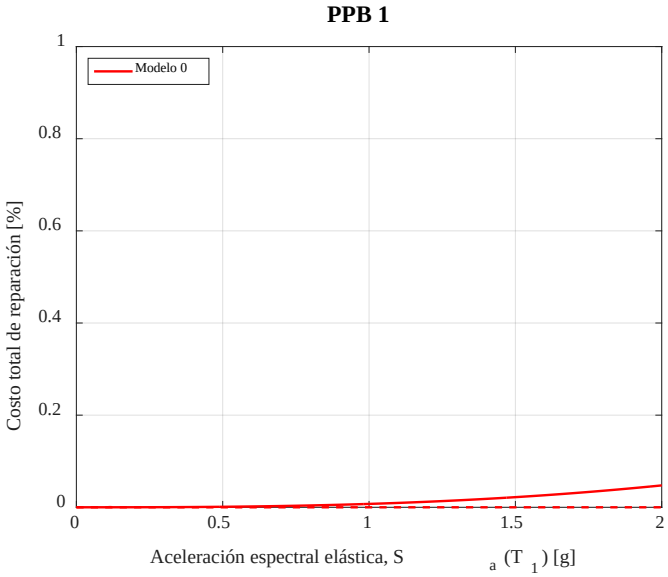


Figura 6-86. Función de vulnerabilidad puente Prototipo Bogotá (PPB_1)

6.10.2.2 Box Culvert

Los Box Culvert son un caso particular del portafolio pues son estructuras poco vulnerables a eventos sísmicos. Se ha visto en diferentes casos la poca o nula afectación frente a este tipo de fenómenos. En la Tabla 6-11 se puede identificar los daños reportados para diferentes eventos y las características de cada uno de estos.

Tabla 6-11. Daños reportados en Box Culverts (Adaptado de Youd y Beckman, 1996)

N	Ubicación	PGA (g)	d (m)	Dd (m)	Daño observado
2	Route 405 Mayall St.	0.8			Fisuras transversales en piso y muros
3	**Route 405 Superior St**	**0.4**			Sin daño
4	**Route 405 Tupper St**	**0.4**			Sin daño
5	**Route 405 Rayen St**	**0.4**			Sin daño
6	**Route 101 Etiwanda St**	**0.4**			Sin daño
7	Bee Canyon drain Balboa and Jensen Plant		0.9		Separación de las juntas y descascaramiento
9	Conduit, Jensen Filtration Plant			0.075	Fracturas y descascaramiento severo
10	San Fernando Road	0.5	0.3		Desplazamiento (50 mm) de las juntas
13	Morrell Road Cutoff	>0.4			Muros fracturados horizontalmente y pandeados hacia adentro
14	Meadowlark Avenue culvert, Bee Canyon	0.4			Fisuras horizontales menores
15	Simi Arroyo at Yosemite St. Simi Valley	0.4			Fisuras horizontales menores en muros exteriores
16	Simi Arroyo at Stow St Simi Valley	0.4			Fisuras horizontales menores en muros
17	Weldon Canyon railroad	0.5			Fractura de juntas muros-techo

Para determinar el nivel de daño de cada estructura se realizó un análisis de precios unitarios que incluye las actividades de cada una de las reparaciones, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 6-12. En esta tabla se puede identificar que los daños reportados en la literatura oscilan entre el 1% y el 4% del valor de reposición de la estructura.

Tabla 6-12. Valor de reparación de daños

Precios unitarios daños			
Daño	**APUs**	**COSTO**	**% Reparación**
Fisuramiento	$ 150,167	$ 14,416,032	4%
Desplazamiento de las juntas	$ 76,273	$ 2,745,828	1%
Descascaramiento/fractura de juntas	$ 587,594	$ 56,409,024	16%
Fracturación severa	$ 2,572,142	$ 246,925,632	69%
Colapso	-	$ 356,232,000	100%

Por otro lado, se realizó un análisis de Pushover a una estructura típica con el fin de caracterizar el comportamiento estructural, el modelo utilizado se describe en la Figura 6-55. Adicionalmente, se realizó un análisis incremental estático simplificado, convirtiendo la estructura en un elemento de un grado de libertad con el fin de identificar las aceleraciones en las cuales la estructura se mantiene en el rango lineal. La curva de Pushover y los resultados obtenidos se pueden identificar en la Figura 6-87.

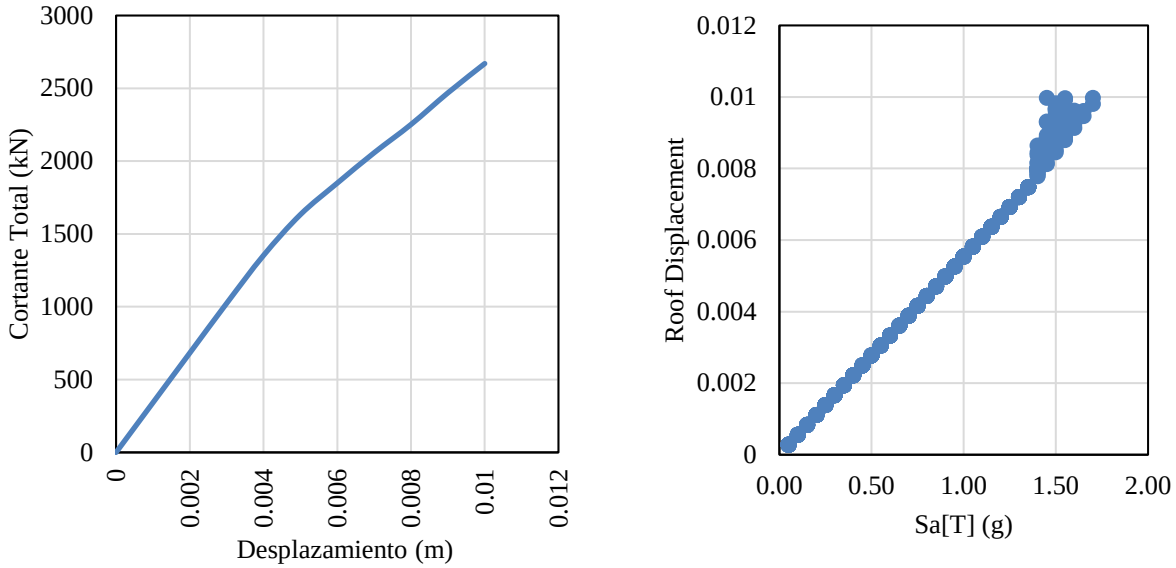


Figura 6-87. Análisis no lineal estático del Box Culvert

A partir de los resultados anteriores y a partir de la evidencia de daños, se generaron mediante Funvul Bridges V1.0 las curvas de vulnerabilidad para los diferentes niveles de diseño. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 6-88.

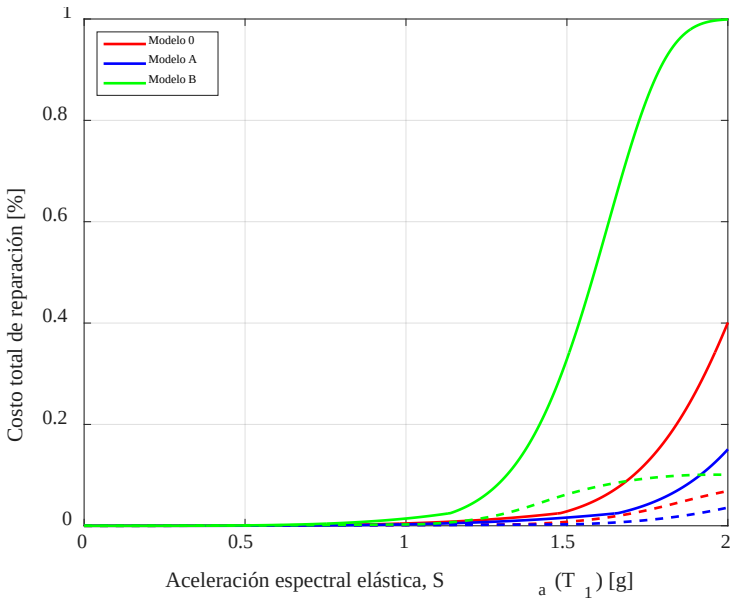


Figura 6-88. Curva de vulnerabilidad Box Culvert (VBC_1 y PBC_1)

6.10.2.3 Arco

En total se identificaron 8 puentes tipo arco que se dividen en dos categorías, puentes de acero (4) y puentes en concreto (4). En la Figura 6-89 se puede identificar ejemplos de las tipologías indicadas.

A partir de una revisión de la información existente para este tipo de puentes y del criterio de expertos se determinó que el comportamiento estructural de los puentes en acero es similar al comportamiento de los puentes vehiculares de una luz (VLS_1). Por otro lado, el comportamiento de los puentes en concreto se relaciona con el comportamiento de un Box Culvert (VBC_1). Por esta razón, se asignan las funciones de vulnerabilidad VLS_1 y VBC_1 a las tipologías VAA_1/PAA_1 y VAC_1/PAC_1 respectivamente.

Arco en acero (VAA_1)

Arco en concreto (VAC_1)

Figura 6-89. Tipología Arco

6.10.2.4 Atirantado

En total se tienen 10 puentes atirantados en el portafolio, estos puentes fueron analizados individualmente con el objetivo de identificar el tipo de conexión subestructura y superestructura y la conexión de estas. El comportamiento esperado en los puentes atirantados es similar al de las tipologías analizadas en el numeral 6.10.1, sin embargo suelen ser más flexibles y por lo tanto la vulnerabilidad puede variar. Para considerar este efecto se seleccionaron las tipologías equivalentes y fueron afectadas por el factor correspondiente al número de luces equivalente de cada puente. El algoritmo de generación utilizado se puede observar en la Figura 6-90.

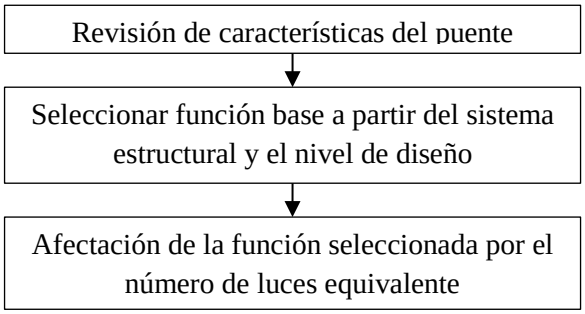


Figura 6-90. Algoritmo de generación de funciones de vulnerabilidad para puentes atirantados

En la Tabla 4-19 se puede identificar la tabla de correlación de cada puente atirantado con el sistema de sub y superestructura.

Tabla 6-13. Correlación de puentes atirantados y funciones base

PKID	SE Asignado	Función Base
22149821	PAT_1	VNH_3
22154893	PAT_1	VNH_1
22153908	PAT_1	VNH_3
22155621	PAT_1	VNH_1
24119261	PAT_1	VNH_1
24119262	PAT_1	VNH_1
22160001	PAT_1	VNH_1
24119477	PAT_1	VNH_3
22151865	PAT_1	VNH_3
22160002	PAT_1	VNH_1

6.10.3 Metodología de asignación

A partir de lo expuesto en el numeral anterior es posible identificar los factores de afectación de cada uno de los parámetros taxonómicos. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 6-14, en esta se resumen los factores finales de afectación de las curvas.

Tabla 6-14. Factores de afectación por elemento taxonómico

No.	Parámetro de vulnerabilidad sísmica	Factor
3	**Tipo de suelo**	Suelo Intermedio: 0.98 Suelo Blando: 0.91 Suelo Duro: 1.25
4	**Número de luces**	Factor de afectación = $-0.0079 * X^2 - 0.085 * X + 1.0069$ en donde $X = Número\ de\ luces\ más\ o\ menos$
5	**No. de elementos verticales en el eje**	Mayor número de columnas: 1.05
6	**Tipo de cimentación**	No aplica
7	**Ángulo de Esviaje**	Esviaje: 0.96
8	**Estado estructural**	Bueno: 1.12 Aceptable: 1.00 Regular: 1.00 Malo: 0.77
9	**Curvatura horizontal**	Curvatura horizontal: 0.95
10	**Curvatura vertical**	Curvatura vertical: 0.99
11	**Reforzamiento sísmico**	Reforzado: 1.12
12	**No. de elementos horizontales**	No aplica

Teniendo en cuenta estos factores cada una de las tipologías se afecta a partir de su clasificación taxonómica. En primer lugar, se toma una función base a partir del sistema estructural y la clasificación del nivel de diseño. Una vez se tiene esta función se identifican los factores que podrían afectar el puente específico según los parámetros de la taxonomía y se multiplican entre sí. Este factor único por puente se utiliza para afectar la función elegida inicialmente, la función resultante se asigna para el análisis de riesgo sísmico. Esta metodología se resume en la Figura 6-91.

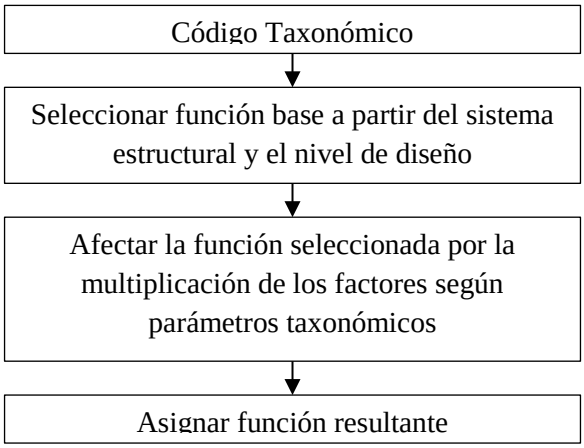


Figura 6-91. Algoritmo de asignación de funciones de vulnerabilidad

Este algoritmo se aplica a la totalidad de puentes del portafolio con el fin de caracterizar la vulnerabilidad sísmica de cada elemento. En total se generaron más de 250 funciones diferentes, estas se pueden observar en la Figura 6-92.

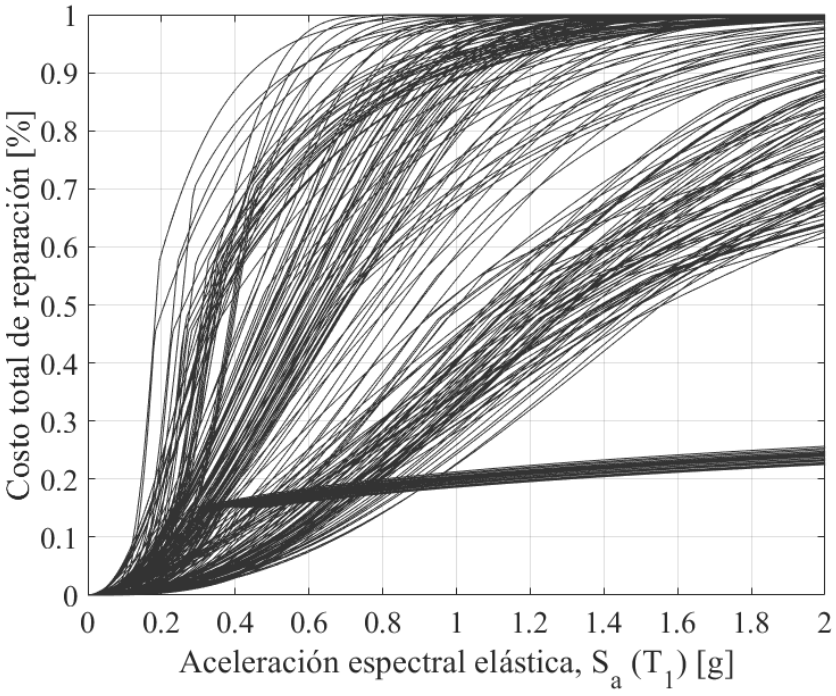


Figura 6-92. Catálogo funciones de vulnerabilidad

CAPITULO
7

7 EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO

7.1 GENERALIDADES

La evaluación probabilista del riesgo consiste en determinar la función de distribución de probabilidad de diferentes estados de daño y las correspondientes pérdidas económicas para un portafolio determinado de elementos de infraestructura localizado en un área definida de análisis y ante una amenaza sísmica específica. De acuerdo con esto, para la evaluación del riesgo se requiere un modelo de amenaza sísmica, una base de datos de exposición de elementos de infraestructura expuestos y un conjunto de funciones de vulnerabilidad que permitan valorar el nivel de daños y sus correspondientes costos de reparación, lo cual corresponde al impacto de diferentes eventos sísmicos sobre los componentes de infraestructura.

La amenaza sísmica se modela mediante un conjunto de eventos mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos que representan eventos sísmicos particulares factibles de presentarse dentro del área de influencia de análisis (diferentes ubicaciones y magnitudes). Cada uno de estos eventos, también llamados escenarios estocásticos, tiene asociada una frecuencia anual de ocurrencia específica, de acuerdo con la curva de recurrencia de magnitudes que resulta del análisis de frecuencia de eventos históricos en la zona de estudio. Cada escenario sísmico se representa mediante la distribución geográfica de diferentes parámetros de intensidad sísmica tales como la aceleración máxima esperada del terreno, PGA, o la aceleración espectral para un periodo estructural determinado, Sa (T). Los valores de intensidad sísmica incluyen los efectos de la respuesta dinámica de los suelos en cada una de las ubicaciones de análisis. Cada escenario se representa mediante el valor medio del parámetro de intensidad y su desviación estándar con el fin de reconstruir su función de densidad de probabilidad en el proceso de cálculo probabilista.

La base de datos de exposición corresponde a la información georreferenciada de cada uno de los puentes de la ciudad incluyendo los parámetros que se requieren para la evaluación del riesgo y la caracterización de su comportamiento. La base de datos de los puentes fue explicada en detalle en los Capítulos 4, 5 y 6. Esta incluye la información correspondiente a los 1006 puentes según lo descrito anteriormente. Para efectos de la evaluación probabilista del riesgo los campos de información específicos que se requieren son los siguientes:

- Identificación del puente según PKID
- Localización geográfica
- Valoración económica del puente (valor físico expuesto o valor de reposición a nuevo)
- Taxonomía para asignación de la función de vulnerabilidad

Por otro lado, la vulnerabilidad sísmica estructural de cada una de las tipologías identificadas de puentes se representa mediante una función que relaciona el valor medio estimado de reparación y su varianza (expresado como porcentaje del valor de reposición total del puente) con una medida de intensidad sísmica. Para el presente caso, las medidas de intensidad seleccionadas para el análisis corresponden a la aceleración máxima del terreno, PGA, para los Box Culverts y arcos en concreto, y la intensidad asociada a un periodo estructural sobre un espectro elástico de respuesta en aceleración con un amortiguamiento con respeto al crítico de 5% para los demás puentes. En particular, los puentes de una sola luz y los arcos en acero son evaluados para el Sa a un periodo estructural de 0.3 seg (Sa(T=0.3)), mientras que todas las demás tipologías son asociadas a la intensidad del Sa a un periodo estructural de 0.5 seg (Sa(T=0.5)). En el numeral 6.10 del se presentan las curvas de vulnerabilidad para las tipologías de los puentes representativos de la base datos.

La evaluación del riesgo sísmico probabilista permite estimar, para cada uno de los componentes de la base de datos de exposición, la distribución de probabilidad de las pérdidas económicas. Simultáneamente se evalúa dicha distribución para cada uno de los escenarios estocásticos planteados. Finalmente, con base en estos resultados se plantean una serie de métricas de riesgo para todo el portafolio de componentes como son la pérdida anual esperada (PAE) y la curva de pérdidas máximas probables (PMP) para diferentes períodos de retorno. En el presente caso, el estudio se limita a la evaluación de las pérdidas directas asociadas a los eventuales costos de reparación y/o reposición del puente, de acuerdo con las estimaciones de costos realizada en el Capítulo 5. No se evalúan en el presente caso pérdidas indirectas debidas a la interrupción del funcionamiento o lucro cesante ni las pérdidas consecuenciales sobre terceros, debidas a la eventual interrupción o afectación en la movilidad urbana de la ciudad en caso de desastre.

El procedimiento general adoptado para la evaluación del riesgo probabilista del portafolio de puentes de la ciudad se resume en la Figura 1-1. Más detalles del procedimiento se pueden consultar en Yamin et al. (2013). El riesgo sísmico probabilista se calcula utilizando la plataforma CAPRA-GIS (www.ecapra.org).

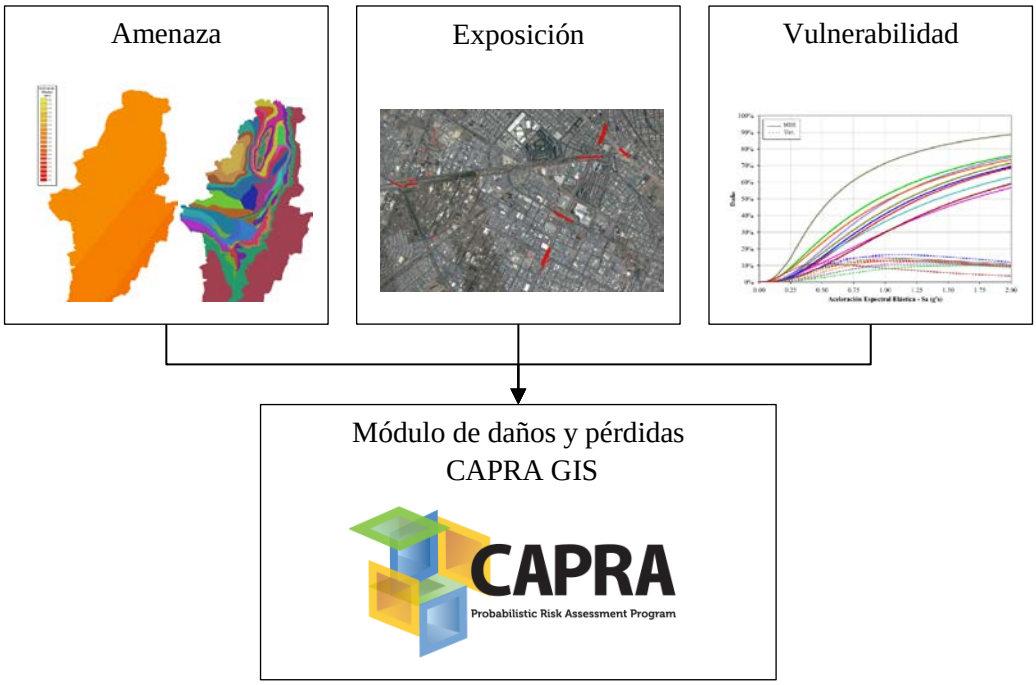


Figura 7-1. Metodología riesgo sísmico

7.2 PORTAFOLIO DE EXPOSICIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO

7.2.1 Información general

Para efectos de la evaluación del riesgo sísmico, se consideran únicamente aquellas estructuras que son susceptibles a daño y que pueden analizarse desde el punto de la ingeniería. De acuerdo con lo explicado en el numeral 4.2, se excluyen del análisis de riesgo las estructuras de la base de datos que no se clasifican como puentes y corresponden a la categoría Otros (Túneles, Alcantarillas, o estructuras Vernaculares). La base de datos de exposición final para efectos del análisis de riesgo está representada por los parámetros indicados en la Tabla 7-1. La valoración del portafolio definitivo para el análisis de riesgo se presenta en la Figura 7-2.

Tabla 7-1. Caracterización de la exposición por uso

Uso	Número de puentes	Dist. Porcentual (%)	Área Construida (m^2)	Dist. Porcentual (%)	Valor expuesto (COPS millones)	Dist. Porcentual (%)
Vehiculares	554	57.77	552,330	88.16	$ 3,355,341	83.66
Peatonales	405	42.23	74,198	11.84	$ 655,461	16.34
TOTAL	**959**	**100.00**	**626,528**	**100.00**	**$ 4,010,802**	**100.00**

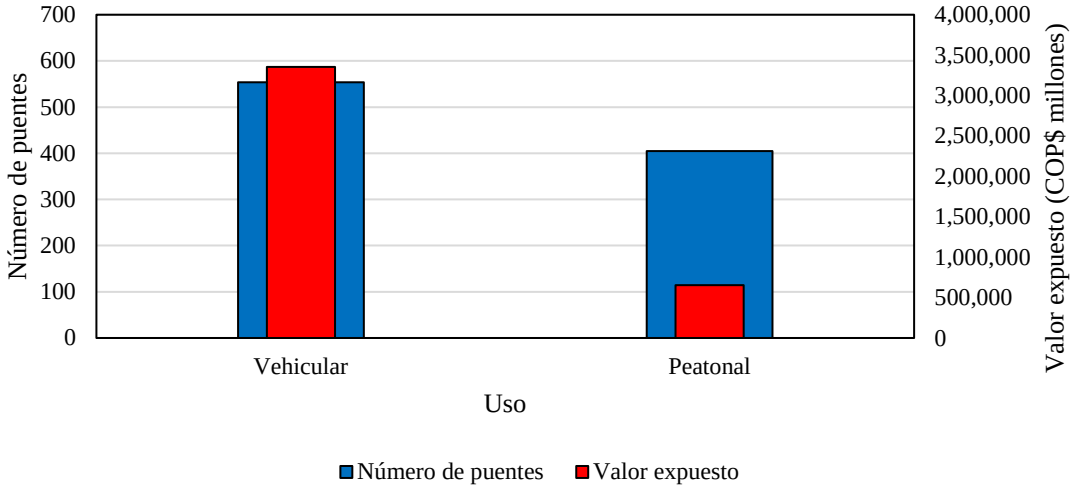


Figura 7-2. Número de puentes y valor expuesto por uso estructural

Dentro del portafolio de exposición conformado para el análisis de riesgo, los puentes Vehiculares acumulan el 88% del área construida y el 84% del valor económico expuesto del portafolio completo. Aunque los puentes Peatonales representan en número el 42% del inventario de la base de datos de exposición, agrupan únicamente el 12% del área construida y el 16% del valor económico expuesto. Las diferencias encontradas en la distribución porcentual de los atributos usados para caracterizar los puentes entre los grupos de uso Vehicular y Peatonal evidencian la necesidad de un análisis particular para cada uno de ellos.

Los mapas de distribución de los puentes de la ciudad según su valoración económica se muestran en la Figura 7-3.

(Espacio en blanco intencional)

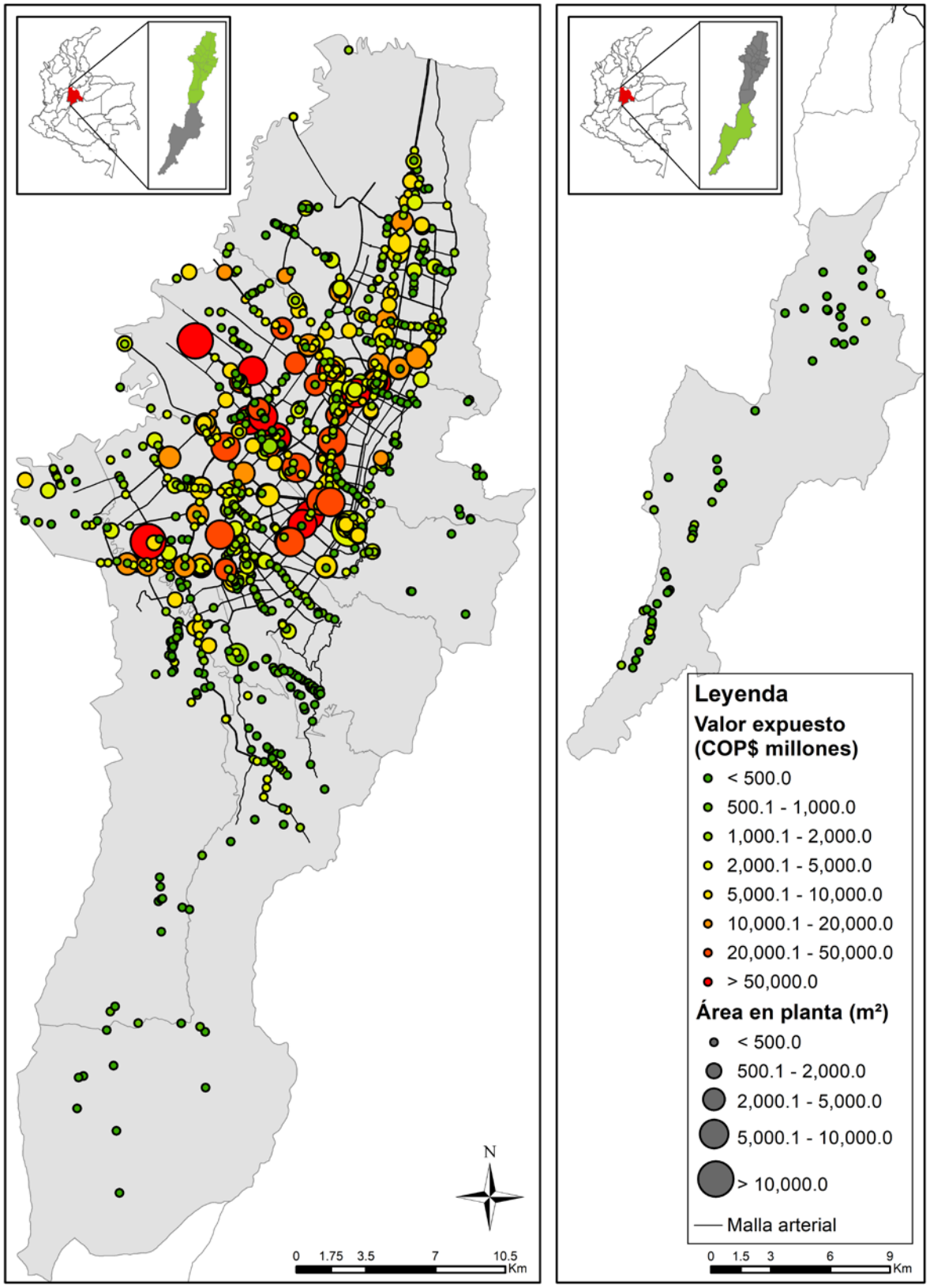


Figura 7-3. Distribución geográfica del valor expuesto

7.2.2 Caracterización de puentes vehiculares

La caracterización del grupo de puentes vehiculares se presenta en la Tabla 7-2. En esta tabla los puentes se encuentran agrupados según la tipología del sistema estructural principal. Los valores presentados en las tablas se muestran de manera gráfica en las Figura 7-4 y Figura 7-5. En la Figura 7-6 se presenta la distribución geográfica de los puentes vehiculares.

Tabla 7-2. Caracterización de la exposición de los puentes Vehiculares

Tipología	Número	Dist. Porcentual (%)	Área Construida (m^2)	Dist. Porcentual (%)	Valor expuesto (COPS millones)	Dist. Porcentual (%)
VAA_1	3	0.3	1,802	0.3	$ 12,423	0.3
VAC_1	3	0.3	482	0.1	$ 2,650	0.1
VBC_1	182	19.0	70,578	11.3	$ 339,354	8.5
VLS_1	216	22.5	48,107	7.7	$ 322,013	8.0
VMH_1	11	1.1	17,803	2.8	$ 84,477	2.1
VMH_2	5	0.5	11,512	1.8	$ 61,761	1.5
VMH_3	19	2.0	61,713	9.8	$ 314,621	7.8
VMH_4	7	0.7	6,423	1.0	$ 35,018	0.9
VNH_1	19	2.0	52,353	8.4	$ 261,994	6.5
VNH_2	11	1.1	40,814	6.5	$ 234,883	5.9
VNH_3	14	1.5	40,137	6.4	$ 227,037	5.7
VNH_4	1	0.1	530	0.1	$ 2,160	0.1
VNI_1	4	0.4	16,574	2.6	$ 139,033	3.5
VNI_2	8	0.8	16,851	2.7	$ 105,742	2.6
VNI_3	46	4.8	159,295	25.4	$ 1,170,560	29.2
VNI_4	5	0.5	7,356	1.2	$ 41,617	1.0
TOTAL	**554**	**57.8**	**552,330**	**88.2**	**$ 3,355,341**	**83.7**

La mayor parte de los puentes Vehiculares se encuentran clasificados como VBC_1 y VLS_1 que corresponden a Box Culverts y puentes de una sola luz, respectivamente. No obstante, la mayor parte del área construida y el valor expuesto corresponde a los puentes No monolíticos Isostáticos apoyados sobre pórticos (VNI_3). Así mismo las tipologías VMH_3, VNH_1, VNH_2 y VNH_3 presentan porcentajes de área construida y valor físico expuesto importantes si se comparan con el número de puentes pertenecientes a cada una de ellas. Las anteriores cinco tipologías Vehiculares mencionadas acumulan el 57% de los metros cuadrados en planta construidos y el 55% del valor de reposición de los puentes de Bogotá, y son por ende las estructuras de mayor aporte en métricas del riesgo como la PAE y la PMP.

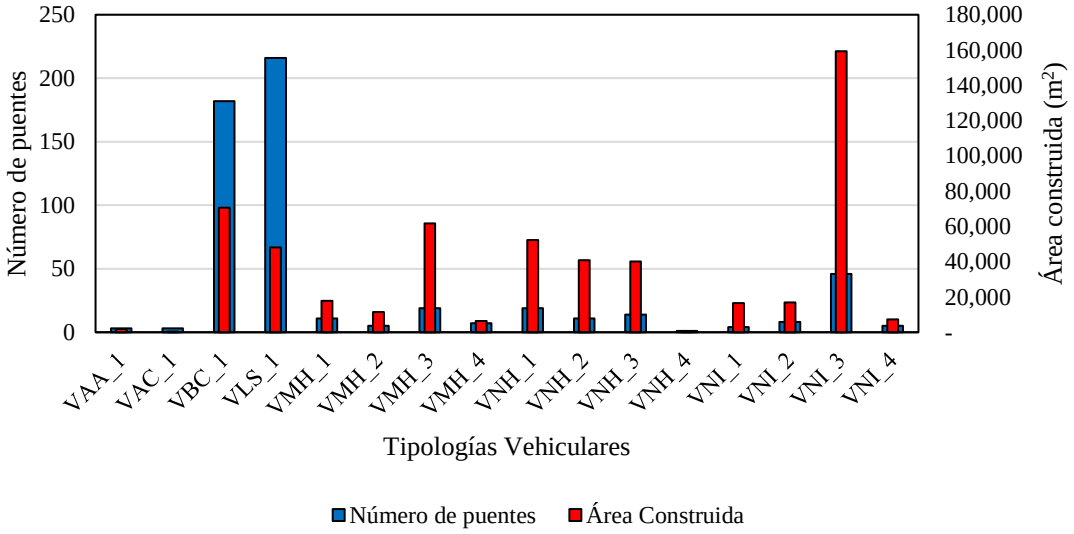


Figura 7-4. Número de puentes y área construida para las tipologias Vehiculares

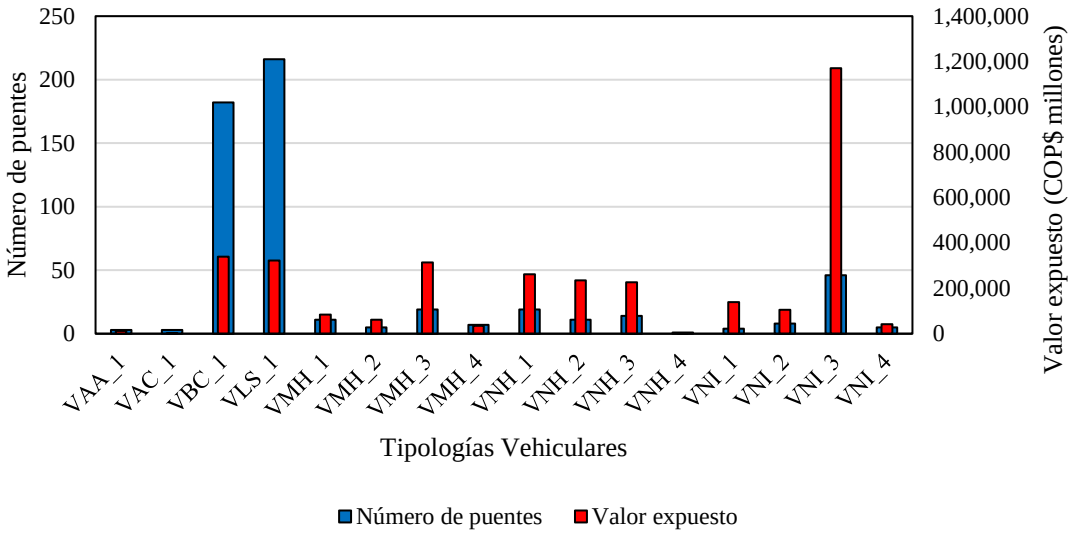


Figura 7-5. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías Vehiculares

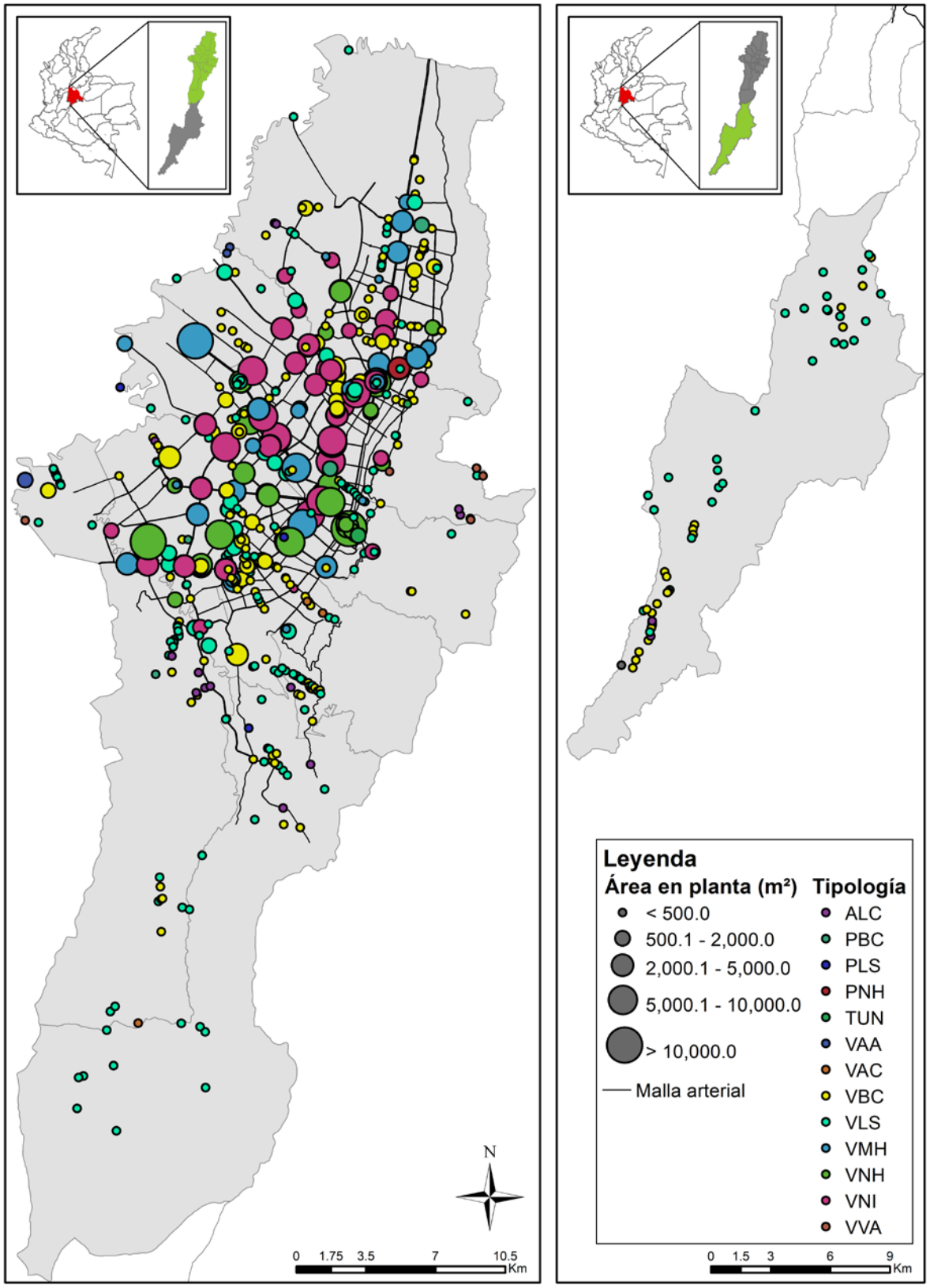


Figura 7-6. Distribución geográfica de las tipologías Vehiculares

7.2.3 Caracterización de puentes peatonales

La caracterización del grupo de puentes peatonales se presenta en la Tabla 7-3. En esta tabla los puentes se encuentran agrupados según la tipología del sistema estructural principal. Los valores presentados en las tablas se muestran de manera gráfica en la Figura 7-7 y Figura 7-8. En la Figura 7-9 se presenta la distribución geográfica de los puentes peatonales.

Tabla 7-3. Caracterización de la exposición de los puentes Peatonales

Tipología	Número	Dist. Porcentual (%)	Área Construida (m^2)	Dist. Porcentual (%)	Valor expuesto (COPS millones)	Dist. Porcentual (%)
PAA_1	1	0.1	29	0.0	$ 2,241	0.1
PAC_1	1	0.1	5	0.0	$ 15	0.0
PBC_1	16	1.7	3,469	0.6	$ 15,913	0.4
PLS_1	151	15.7	7,375	1.2	$ 122,732	3.1
PMH_1	11	1.1	1,374	0.2	$ 10,340	0.3
PMH_3	6	0.6	11,001	1.8	$ 34,776	0.9
PNH_1	20	2.1	6,127	1.0	$ 44,945	1.1
PNH_2	2	0.2	603	0.1	$ 4,443	0.1
PNH_3	19	2.0	2,716	0.4	$ 35,467	0.9
PNH_4	2	0.2	62	0.0	$ 789	0.0
PNI_1	43	4.5	7,396	1.2	$ 50,988	1.3
PNI_3	11	1.1	1,632	0.3	$ 15,568	0.4
PPB_1	112	11.7	29,422	4.7	$ 293,122	7.3
PAT_1	10	1.0	2,989	0.5	$ 24,121	0.6
TOTAL	**405**	**42.2**	**74,198**	**11.8**	**$ 655,461**	**16.3**

En cuanto a los puentes Peatonales, los puentes de una sola luz (PLS_1) presentan la mayor cantidad de estructuras dentro del inventario, seguidos por la tipología Prototipo Bogotá (PPB_1). Por otro lado, las tipologías PPB_1 y PNH_1 acumulan la mayor cantidad de área en planta de los puentes Peatonales, y las clasificaciones PPB_1 y PLS_1 agrupan la mayor parte del valor total de los puentes peatonales. Aunque estas tres tipologías son las más importantes dentro de los puentes peatonales del inventario, solo representan el 7% del área y el 12% del valor expuesto de todo el inventario de puentes de la ciudad.

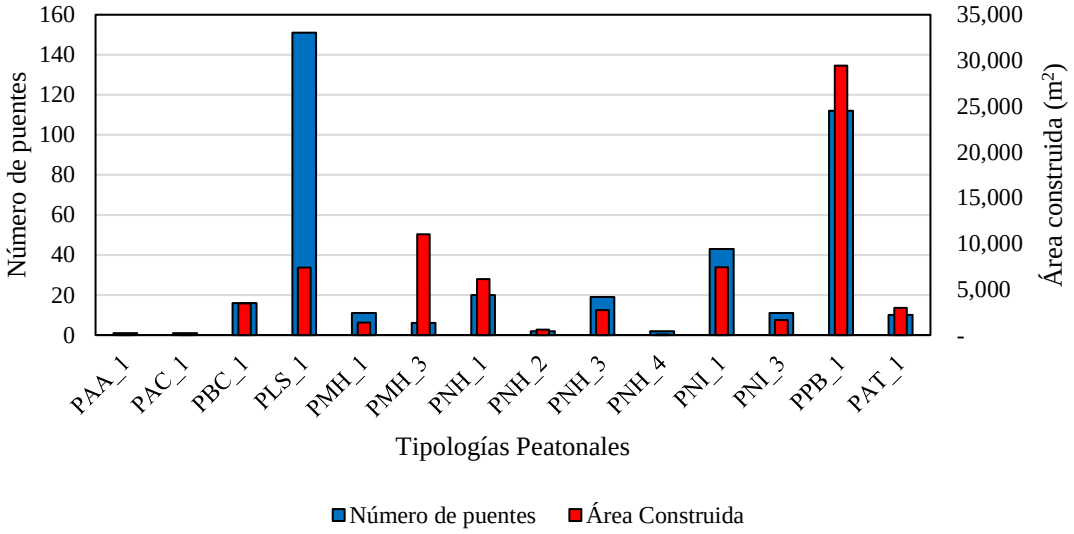


Figura 7-7. Número de puentes y área construida para las tipologías Peatonales

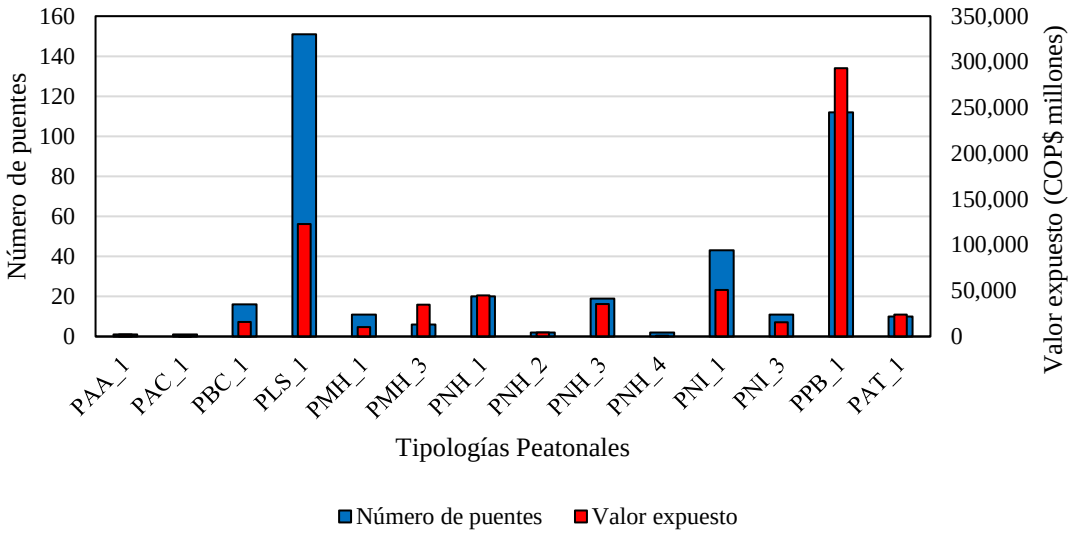


Figura 7-8. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías Peatonales

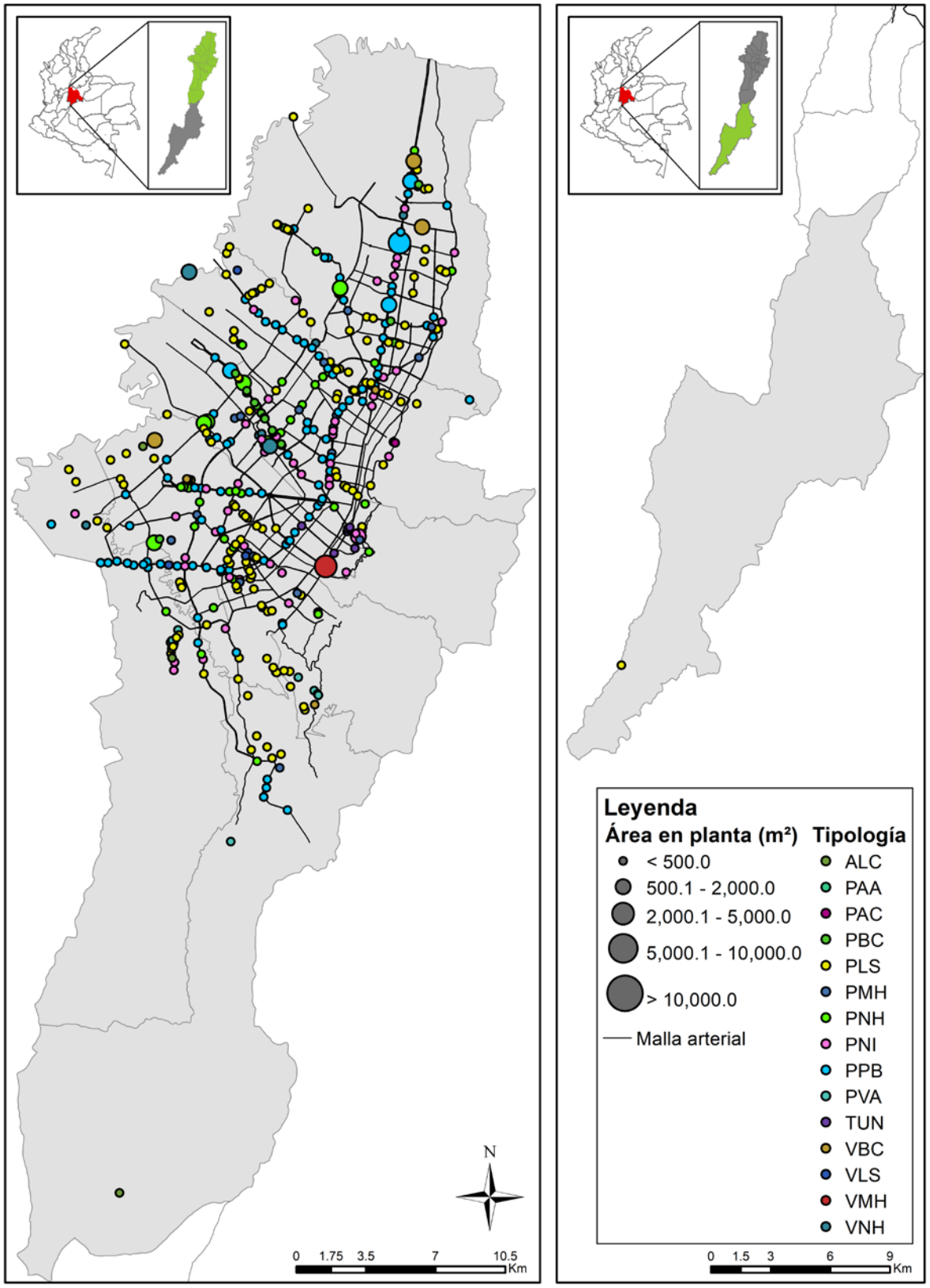


Figura 7-9. Distribución geográfica de las tipologías Peatonales

7.2.4 Agrupación según mallas viales

Por otro lado, se totaliza la exposición de puentes vehiculares y peatonales de acuerdo con su clasificación en las cuatro mallas viales de análisis: Arterial Vital, Arterial No Vital, Intermedia y Local, y Rural. Las mallas viales combinan el subsistema vial en el cual se encuentra el puente y la clasificación otorgada a los puentes de acuerdo a la definición de la Red de Emergencia de Bogotá, imponiendo un nivel de importancia a los puentes que pertenecen a cada subgrupo. En la Tabla 7-4 se resumen los valores de exposición y en la Figura 7-10, Figura 7-11 y Figura 7-12 se presentan los resúmenes de la exposición en formato gráfico.

Tabla 7-4. Caracterización de la exposición de los puentes en las mallas viales de análisis

Malla vial	No. Puentes Vehicular	No. Puentes Peatonal	Área Constr. (m^2) Vehicular	Área Constr. (m^2) Peatonal	Valor expuesto Vehicular (COP$ millones)	Valor expuesto Peatonal (COP$ millones)
Arterial Vital	257	212	457,529	58,893	2,848,072	472,793
Arterial No Vital	52	32	37,914	5,750	180,544	35,981
Intermedia y Local	166	159	51,203	9,340	290,504	143,007
Rural	79	2	5,684	215	36,221	3,679
TOTAL	**554**	**405**	**552,330**	**74,198**	**$ 3,355,341**	**$ 655,461**

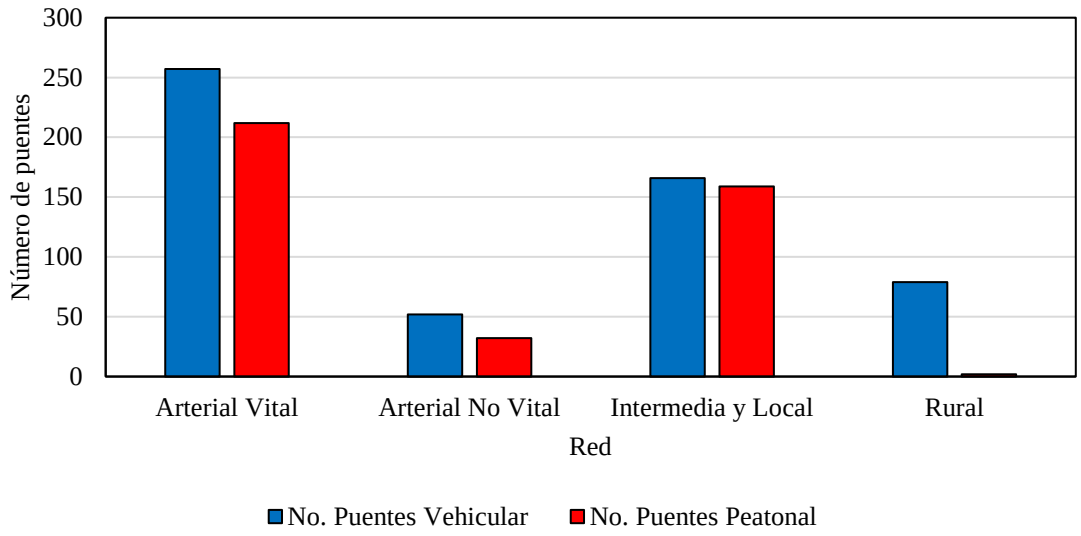


Figura 7-10. Número de puentes asociados a cada red de análisis

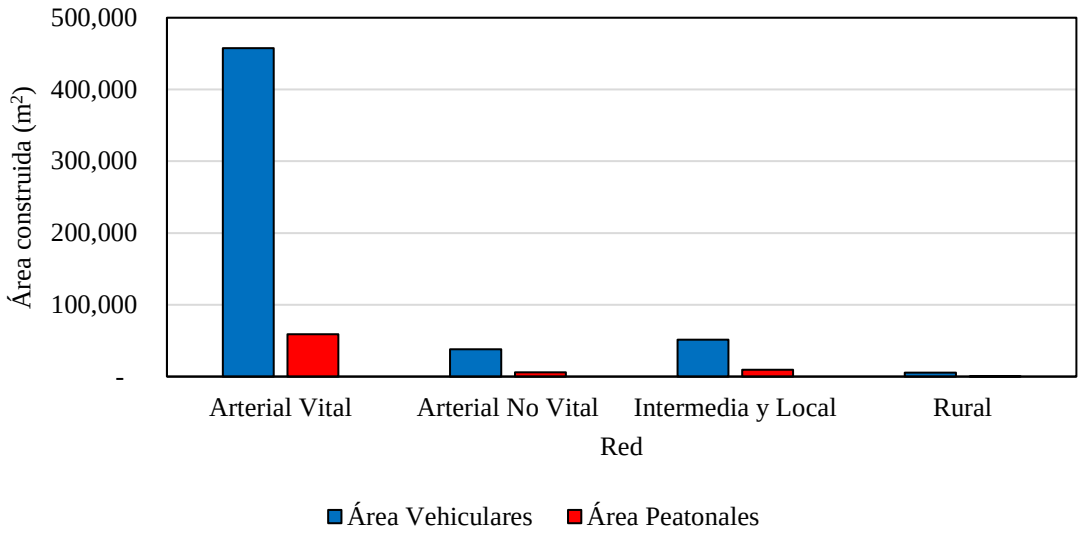


Figura 7-11. Área en planta asociada a cada red de análisis

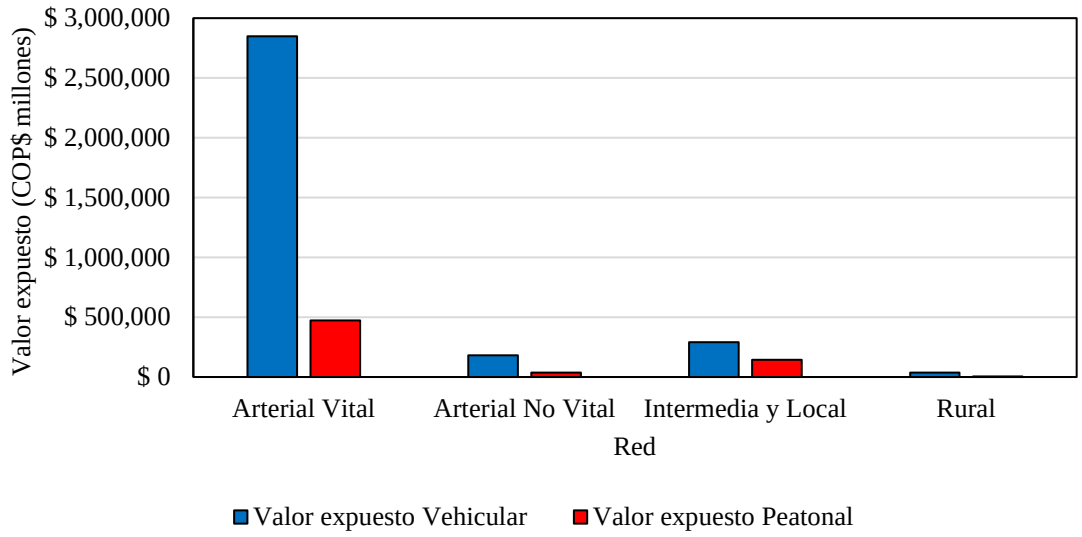


Figura 7-12. Valor expuesto asociado a cada red de análisis

Como se observa en las figuras presentadas, la red Arterial Vital cuenta con el mayor número de puentes, tanto vehiculares como peatonales, seguida por la red Intermedia y Local. El área construida y el valor expuesto de las redes Arterial No Vital, Intermedia y Local, y Rural agrupan alrededor de 18% de los metros cuadrados totales y el 17% del costo total de los puentes en todas las mallas viales. Se espera que la red Arterial Vital concentre las mayores pérdidas económicas en el análisis del riesgo sísmico puesto que su valor expuesto representa el 83% del costo total de todos los elementos expuestos. La distribución de los puentes dentro de las mallas viales se presenta en la Figura 7-13.

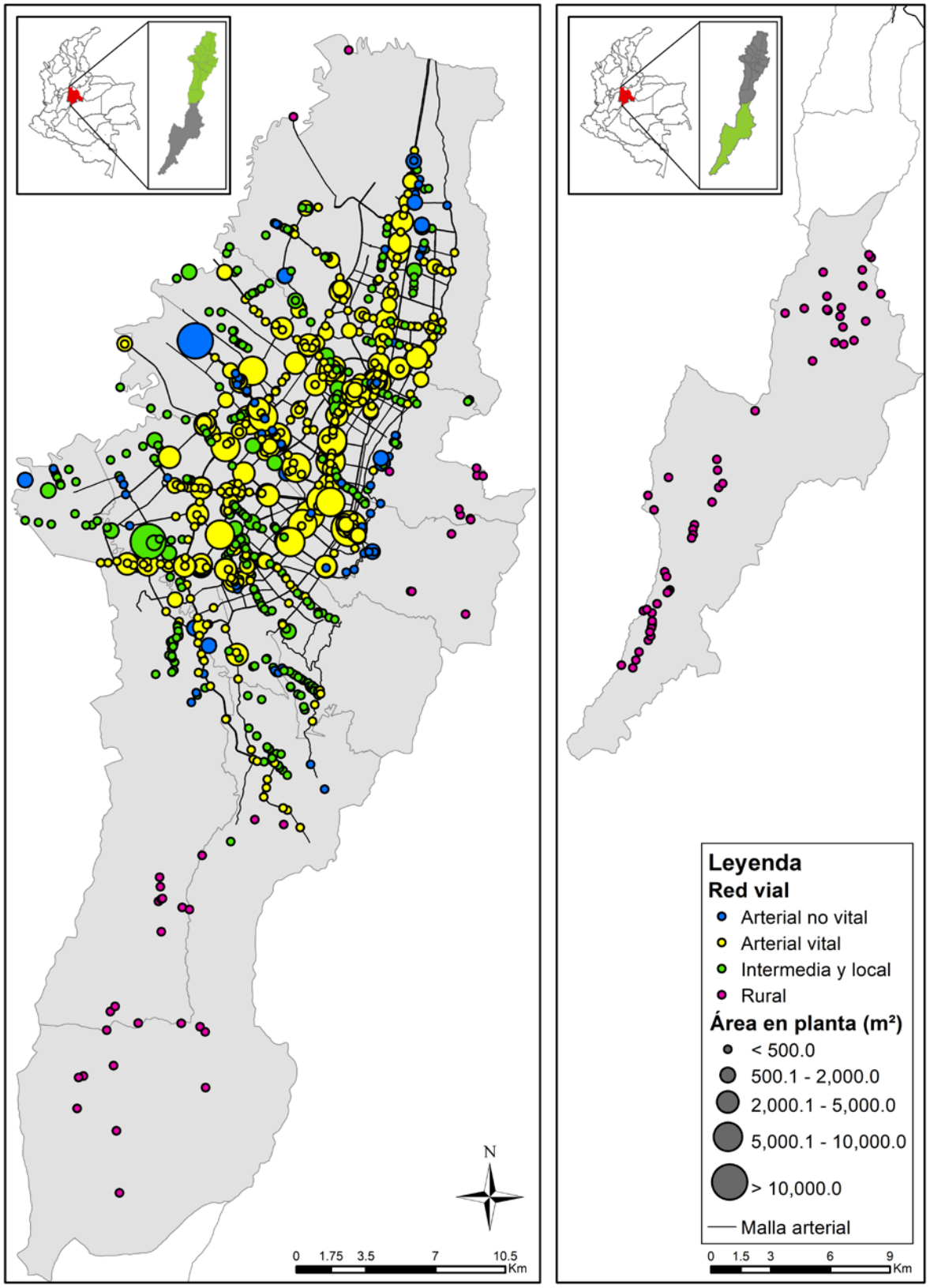


Figura 7-13. Distribución geográfica de los puentes bajo la clasificación de la Malla vial

7.3 RIESGO SÍSMICO PARA EL PORTAFOLIO GENERAL DE PUENTES

El riesgo sísmico del sistema de puentes de la ciudad se representa mediante las pérdidas máximas probables (PMP) y las pérdidas anuales esperadas (PAE) en términos absolutos (COP$ millones) o en términos relativos (‰ - al millar). La Figura 7-14 presenta la curva de pérdida máxima probable para el portafolio completo de puentes de la ciudad. La Tabla 7-5 presenta el resumen de la pérdida anual esperada en millones de pesos y la pérdida anual esperada relativa, así como las pérdidas máximas probables para algunos periodos de retorno representativos. Los resultados de la evaluación probabilista del riesgo pueden ser visualizados como mapas de distribución de PAE absoluta y PAE relativa. La Figura 7-15 y Figura 7-16 presentan las distribuciones geográficas de la PAE absoluta y relativa, respectivamente para el portafolio de exposición. En estas figuras se puede observar como las mayores pérdidas absolutas se presentan en los puentes de mayor área puesto que estos poseen, en general, un mayor valor expuesto. Sin embargo, las mayores pérdidas relativas no se generan necesariamente para estos puentes, ya que existen puentes con un menor valor expuesto pero ubicados en zonas de mayor amenaza sísmica o que tienen una mayor vulnerabilidad relativa, por lo cual las pérdidas con respecto al valor del puente son mayores.

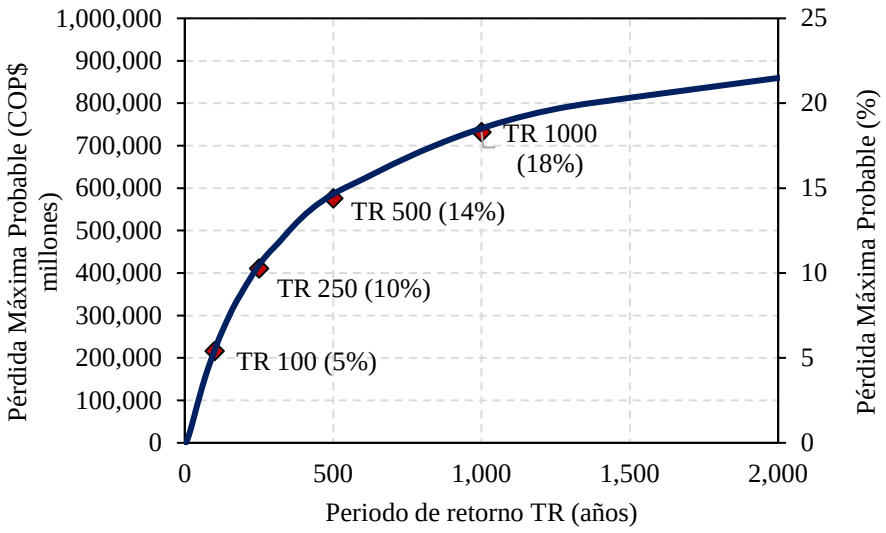


Figura 7-14. Curva de Pérdida Máxima Probable (PMP)

Tabla 7-5. Pérdida anual esperada y pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno

Valor Total Expuesto	COP$ millones	4,010,802
Pérdida Anual Esperada (PAE)	COP$ millones	9,240
	‰	2.30
PMP		
Periodo de retorno (TR)	**%**	**COP$ millones**
100	5.39	216,164
250	10.23	410,451
500	14.35	575,673
1000	18.25	731,842

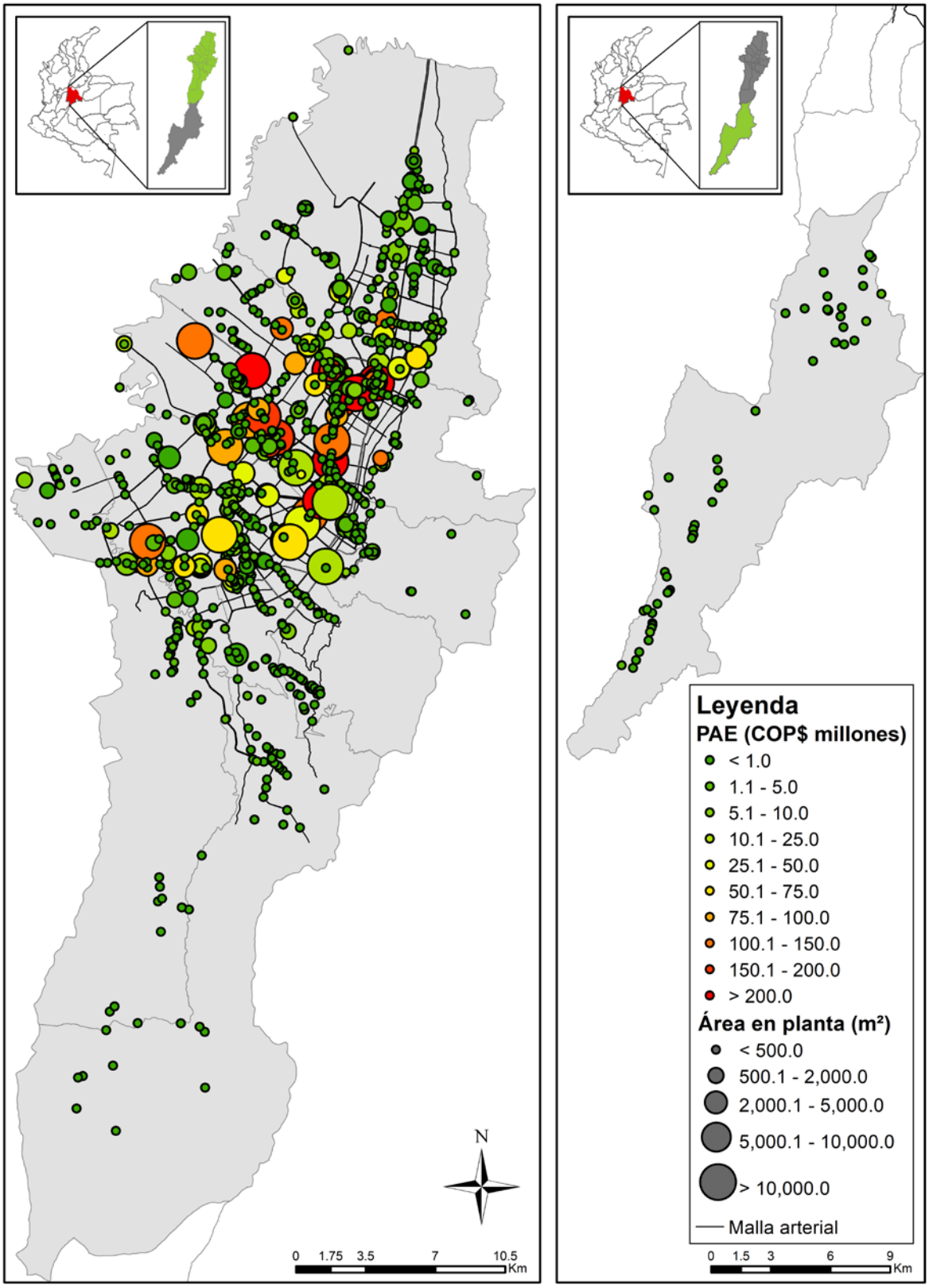


Figura 7-15. Distribución geográfica de la PAE absoluta para el portafolio de puentes de Bogotá

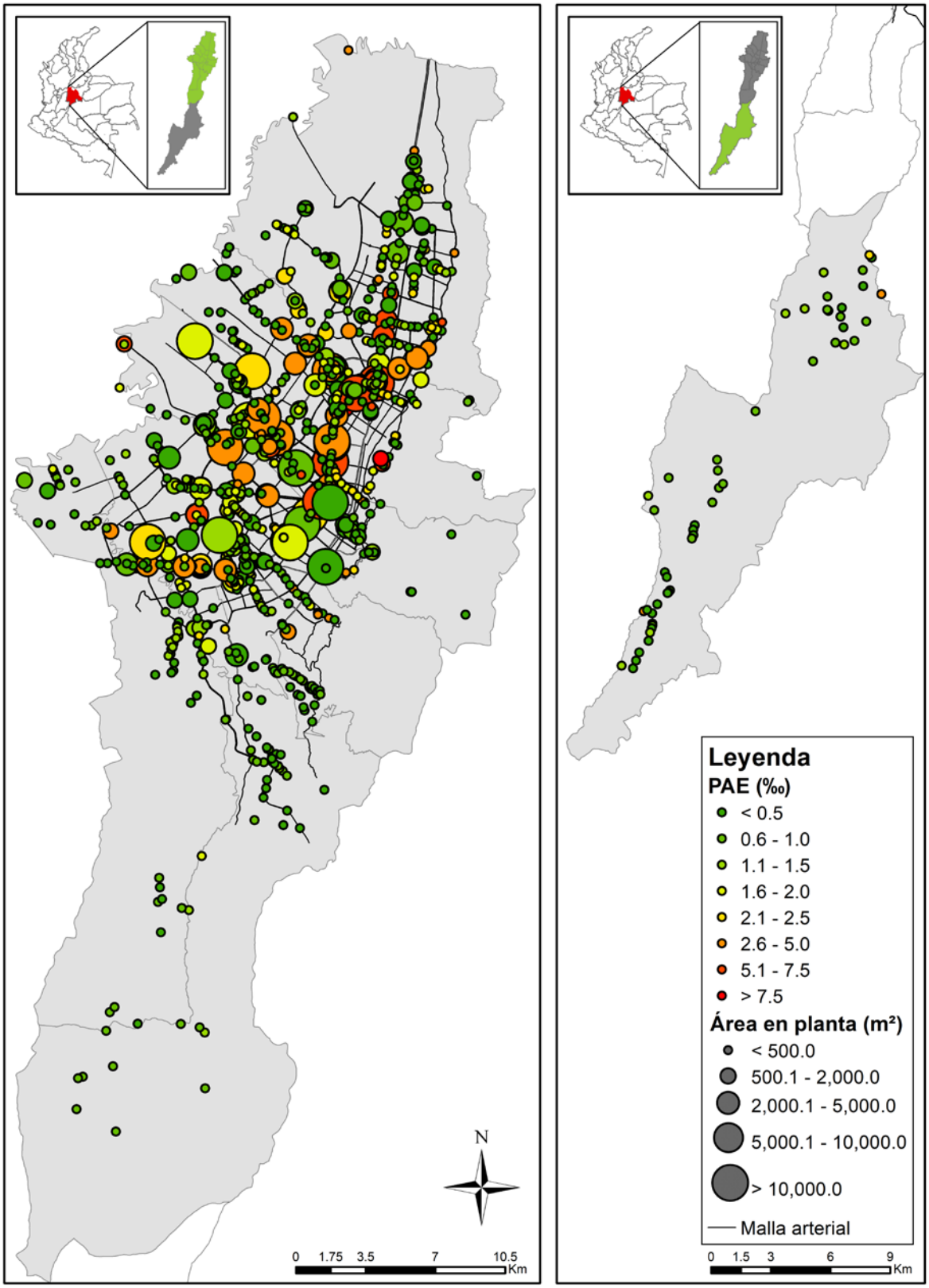


Figura 7-16. Distribución geográfica de la PAE relativa para el portafolio de puentes de Bogotá

La distribución de la PAE absoluta y PAE relativa de los puentes agrupados en los usos Vehicular y Peatonal se evidencian en la Tabla 7-6 y la Figura 7-17. Los puentes Vehiculares presentan valores globales de pérdida considerablemente mayores a los asociados a los puentes Peatonales, lo que se debe principalmente a un mayor valor expuesto dado que estos puentes son de mayor tamaño. Como se mencionó anteriormente, las estructuras clasificadas bajo el uso Otros no se tienen en cuenta dentro del análisis del riesgo sísmico (presentan un valor de PAE de 0). Los mapas de distribución de PAE absoluta y relativa para los puentes Vehiculares se presentan en la Figura 7-18 y Figura 7-19, y para los Peatonales en la Figura 7-20 y Figura 7-21. En estas figuras se puede observar que los puentes Vehiculares presentan pérdidas absolutas mayores con respecto a los puentes Peatonales, pero esto no implica necesariamente mayores pérdidas relativas puesto que hay puentes Peatonales que pueden ser más vulnerables y por ende generan mayores pérdidas relativas con respecto al valor expuesto de cada puente.

Tabla 7-6. PAE absoluta y relativa por Uso para el portafolio general

Uso	Número	Pérdida Anual Esperada (COPS millones)	Pérdida Anual Esperada (‰)	Valor expuesto (COPS millones)
Vehicular	554	$ 8,867	2.64	$ 3,355,341
Peatonal	405	$ 374	0.57	$ 655,461
TOTAL	**959**	**$ 9,240**	**2.30**	**$ 4,010,802**

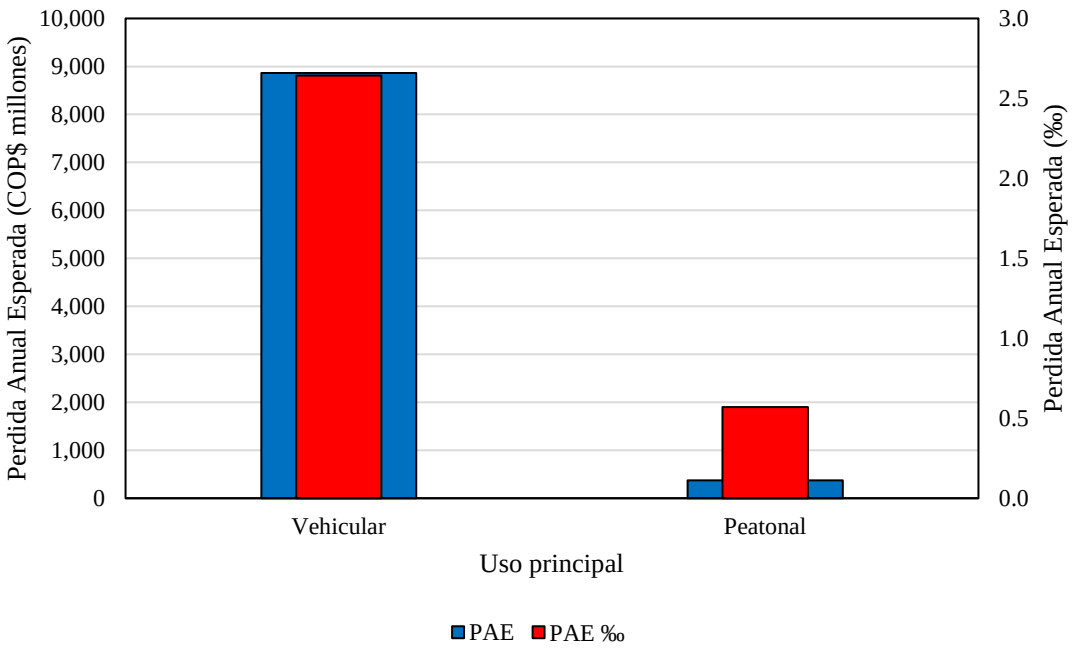


Figura 7-17. PAE absoluta y relativa del portafolio general por Usos

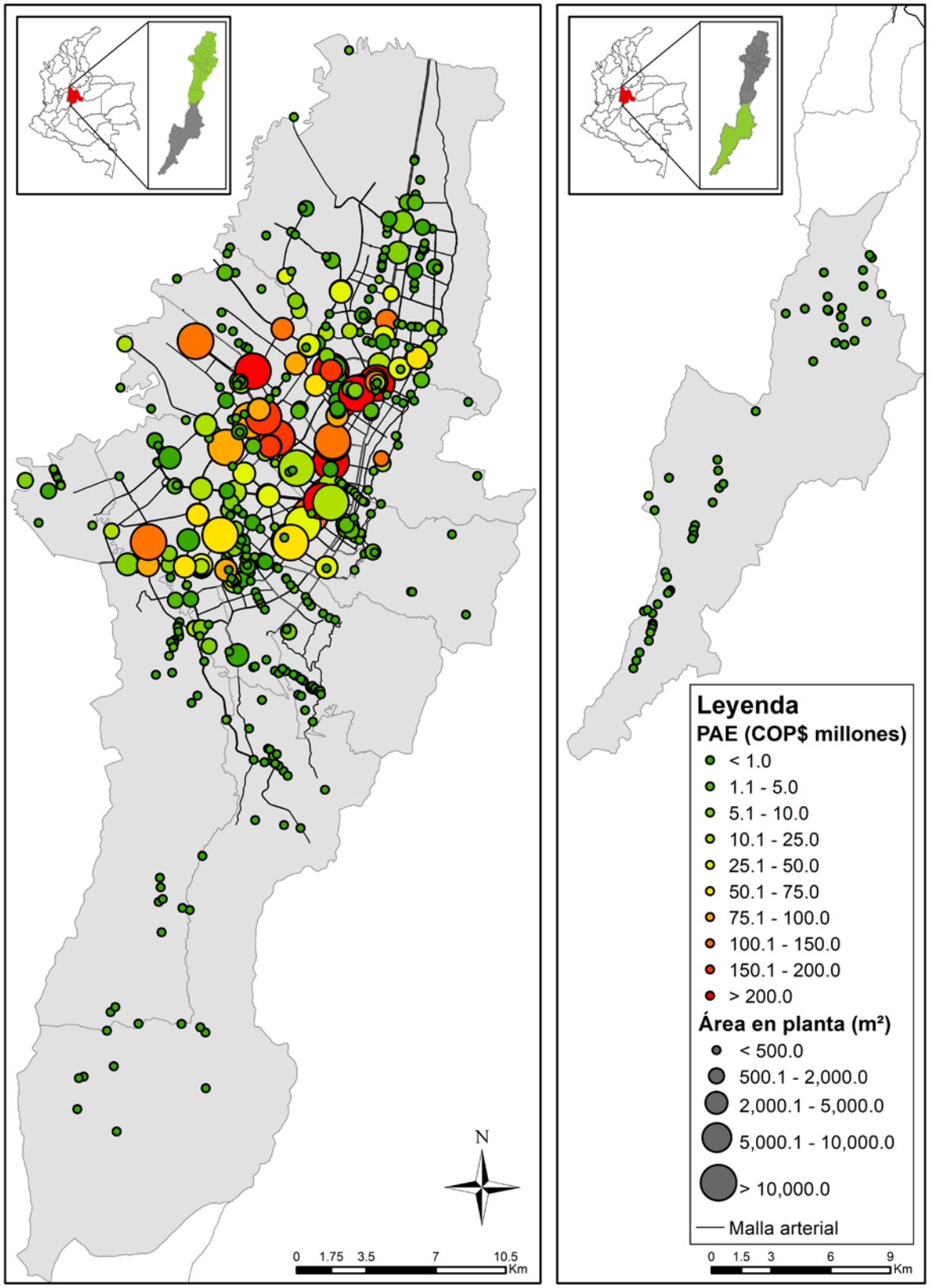


Figura 7-18. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes Vehiculares

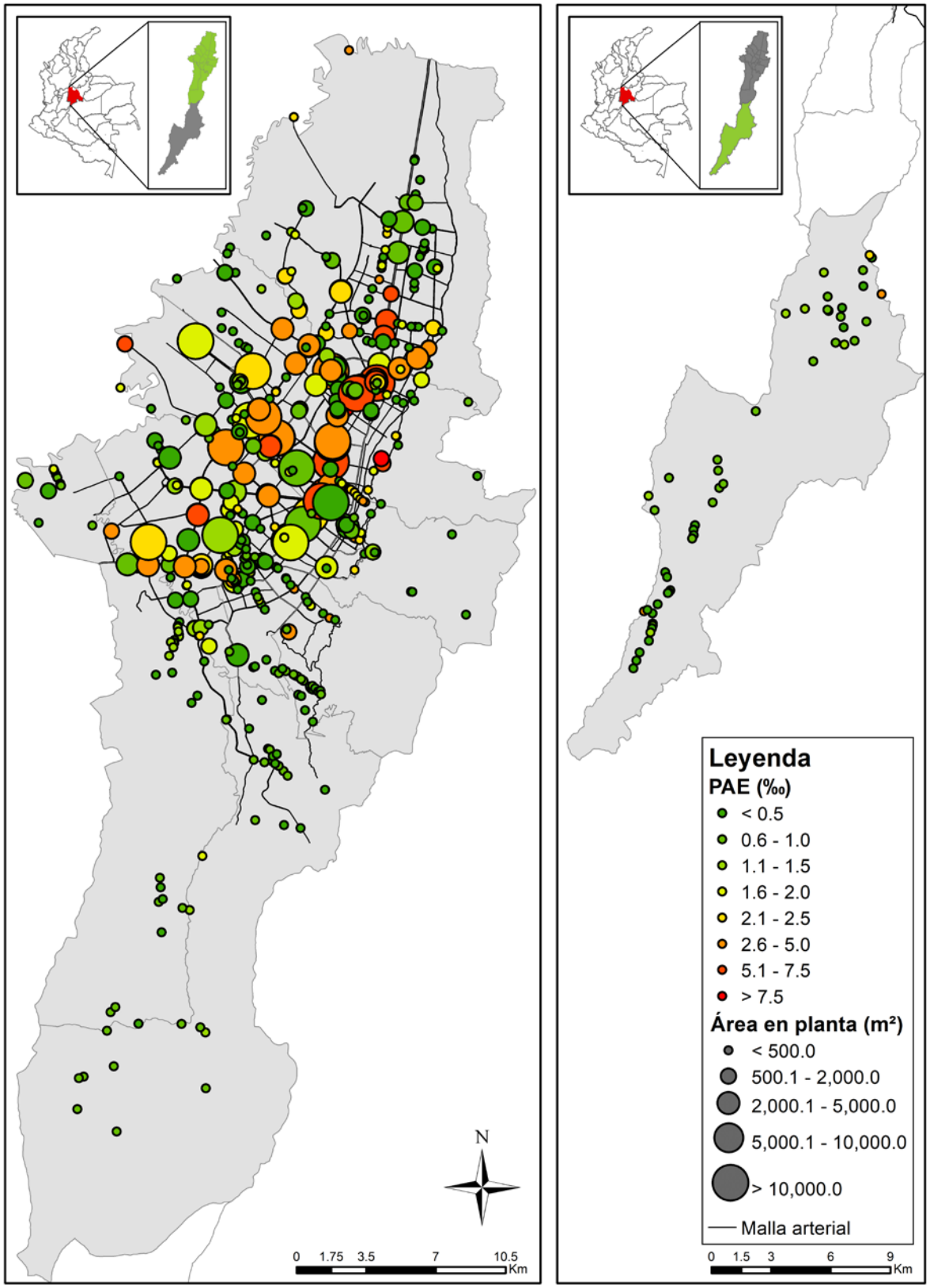


Figura 7-19. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes Vehiculares

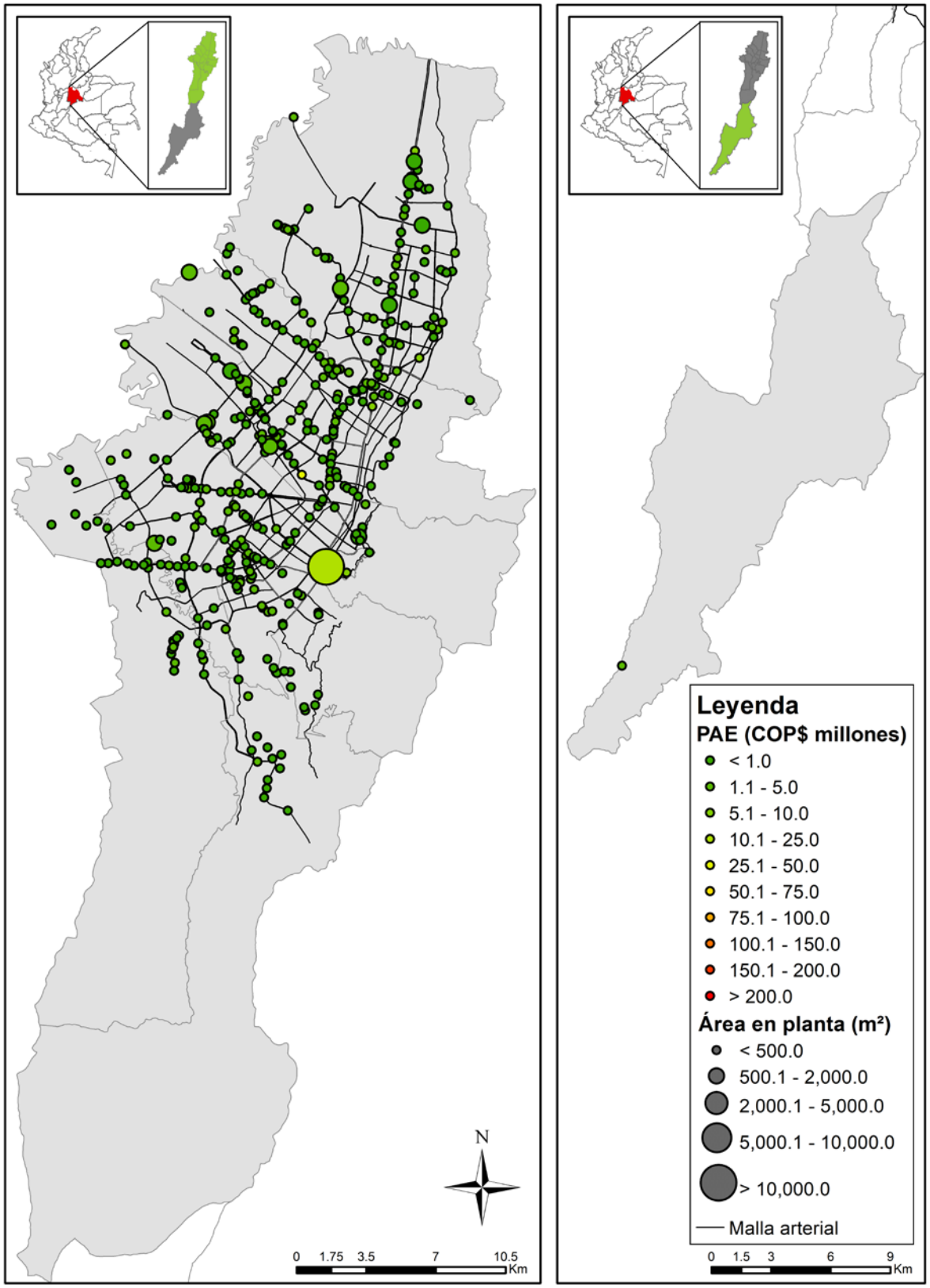


Figura 7-20. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes Peatonales

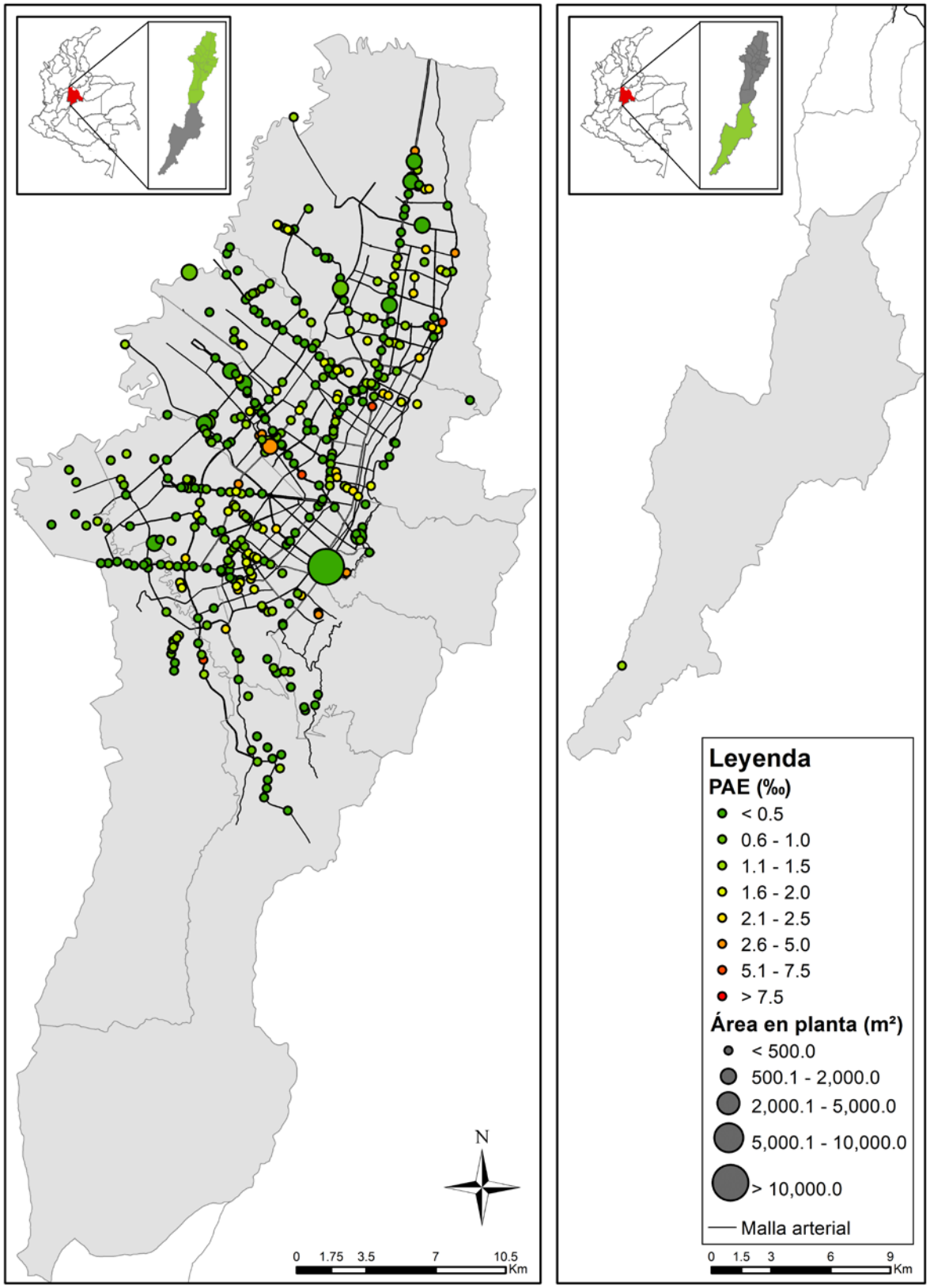


Figura 7-21. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes Peatonales

7.4 RIESGO SÍSMICO POR TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES Y MALLA VIAL

Los resultados de la evaluación del riesgo en términos de la PAE para los usos Vehicular y Peatonal se agrupan por tipologías, lo que permite identificar en cuales tipologías se concentra en mayor medida el riesgo sísmico. La Figura 7-22 y Figura 7-23 presentan la pérdida anual esperada absoluta y relativa para cada una de las tipologías de puentes definidas, para los puentes de uso Vehicular y Peatonal respectivamente.

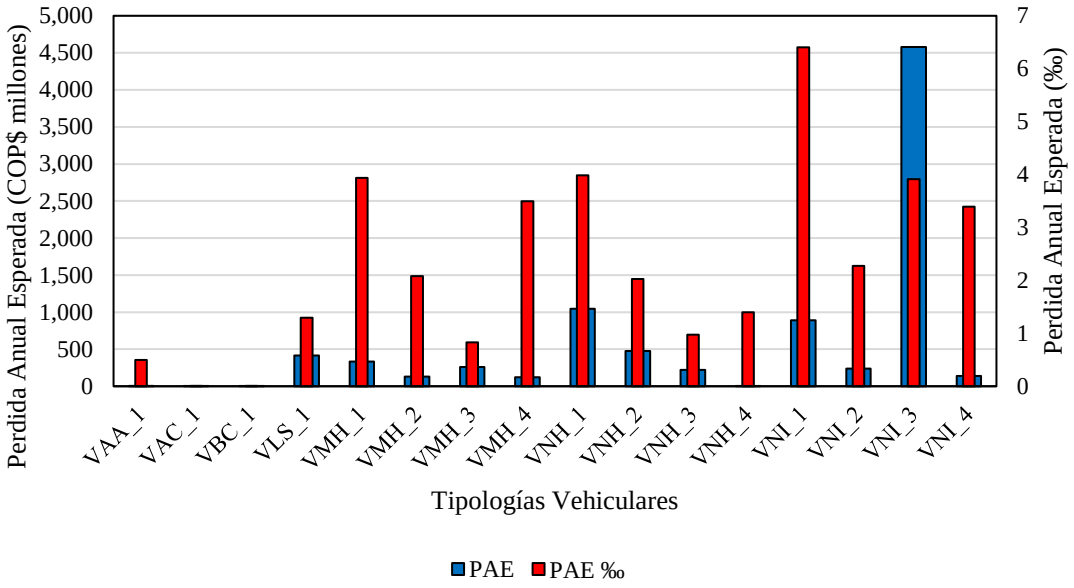


Figura 7-22. PAE absoluta y relativa para las tipologías Vehiculares

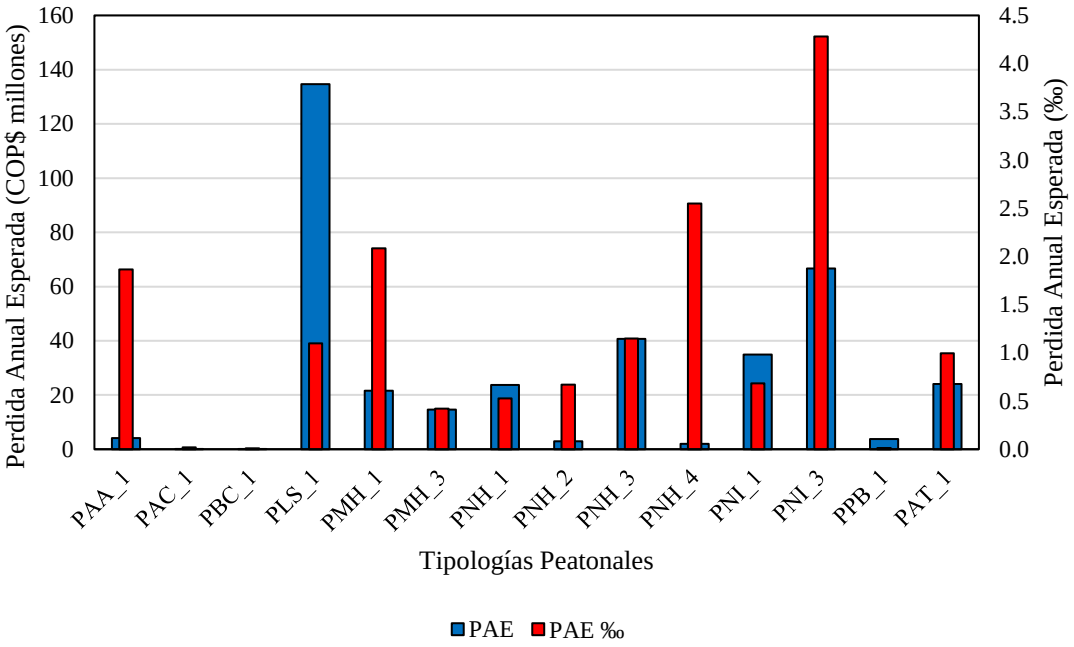


Figura 7-23. PAE absoluta y relativa para las tipologías Peatonales

Se observa que en el caso de los puentes Vehiculares las tipologías más vulnerables al riesgo sísmico son VNI_1, VNH_1 y VMH_1 presentando valores de PAE relativa de 6.4‰, 4.0‰ y 3.9‰, respectivamente. La pérdida económica absoluta más alta tiene un valor de COP$4,579 millones y está asociada a la tipología con la mayor área construida y el mayor valor físico expuesto, la VNI_3. Este valor de PAE representa el 4‰ del valor total de los puentes clasificados bajo ese comportamiento estructural, lo que implica que son tipologías con una vulnerabilidad media dentro de los puentes vehiculares. Por otro lado, la pérdida económica relativa más alta se presenta para la tipología VNI_1 con un valor de 6.5‰. Por último, la tipología con menor PAE relativa dentro de los puentes vehiculares corresponde a la tipología VBC_1, con una perdida relativa de 0.01‰, debido a su baja vulnerabilidad sísmica.

Para los puentes Peatonales, la tipología PLS_1 presenta los valores máximos de pérdida absoluta física (COP$134.6 millones), mientras que las tipologías PNH_4 y PNI_3 presentan los mayores valores de PAE relativa (2.55‰ y 4.28‰, respectivamente). Las tipologías PMH_1 y PAA_1 presentan también valores de PAE relativa altas con respecto a las demás tipologías (2.08‰ y 1.87‰, respectivamente), lo que indica una diferencia importante en las vulnerabilidades de dichas tipologías. Finalmente, la tipología con menor PAE relativa dentro de los puentes peatonales corresponde a la tipología PBC_1, con una perdida relativa de 0.01‰, debido a su baja vulnerabilidad sísmica.

Los resultados agrupados por el tipo de malla vial se presentan en la Figura 7-24 para los puentes vehiculares, y en la Figura 7-25 para los puentes peatonales. Se presentan además los resultados correspondientes a la distribución de tipologías vehiculares y peatonales para cada Malla vial (ver Figura 7-26 a Figura 7-33).

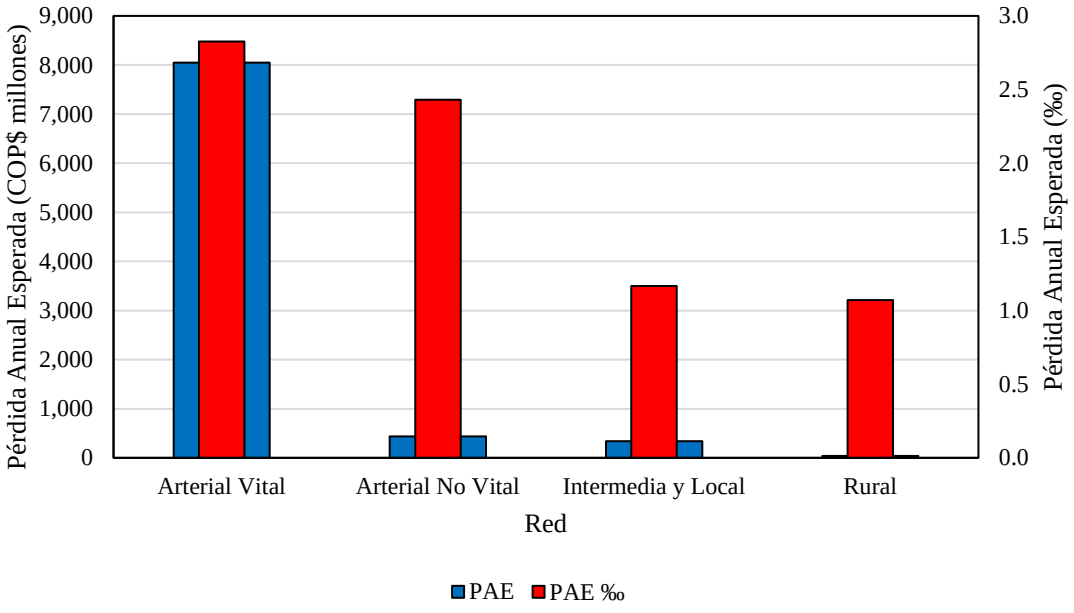


Figura 7-24. PAE absoluta y relativa de los puentes Vehiculares según la Malla vial

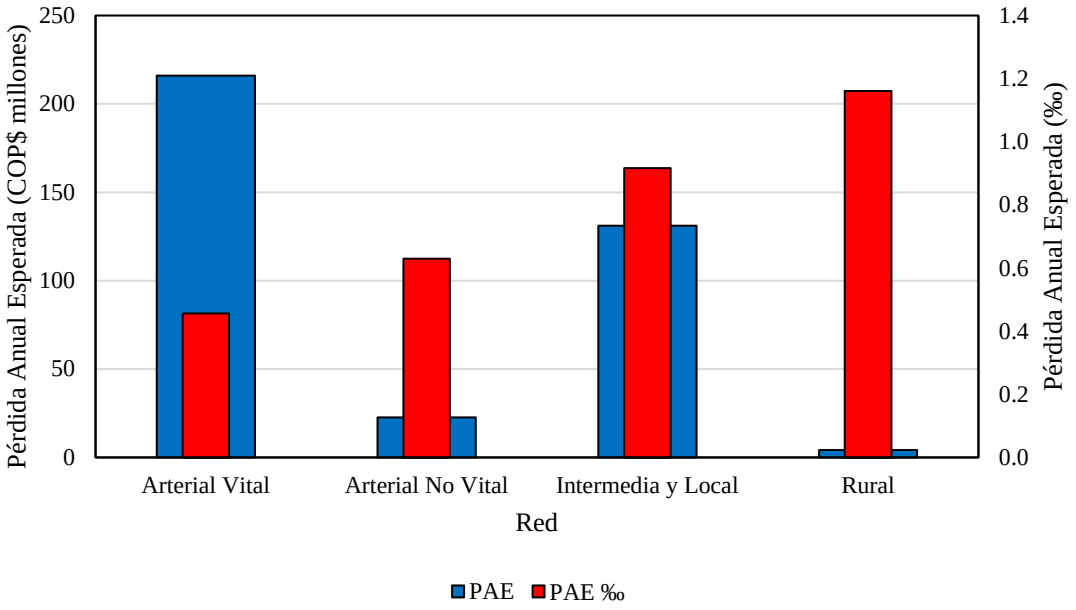


Figura 7-25. PAE absoluta y relativa de los puentes Peatonales según la Malla vial

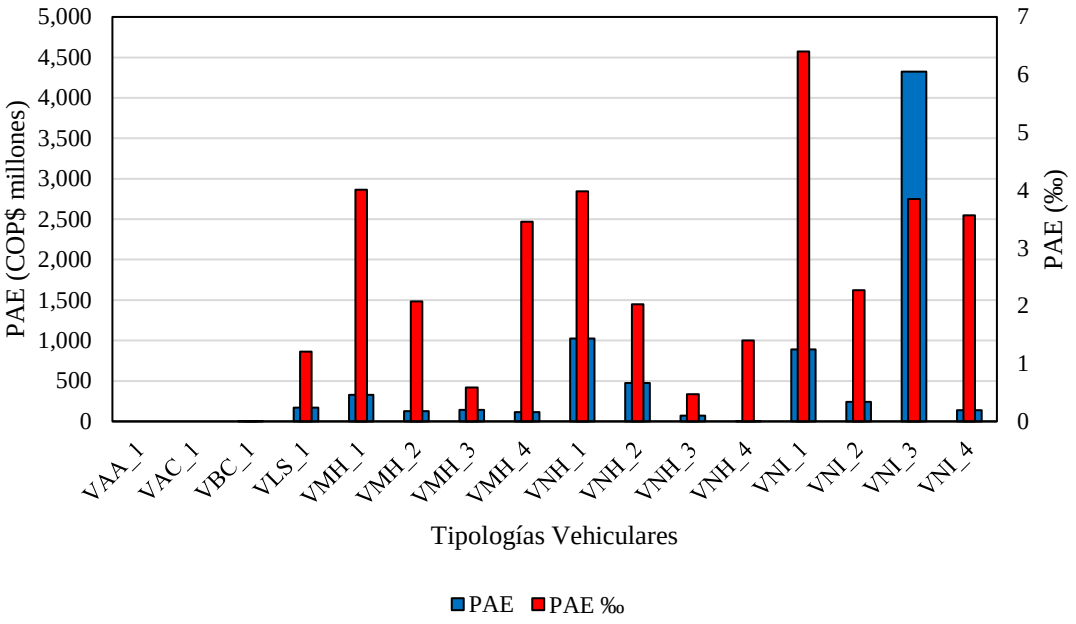


Figura 7-26. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Arterial Vital

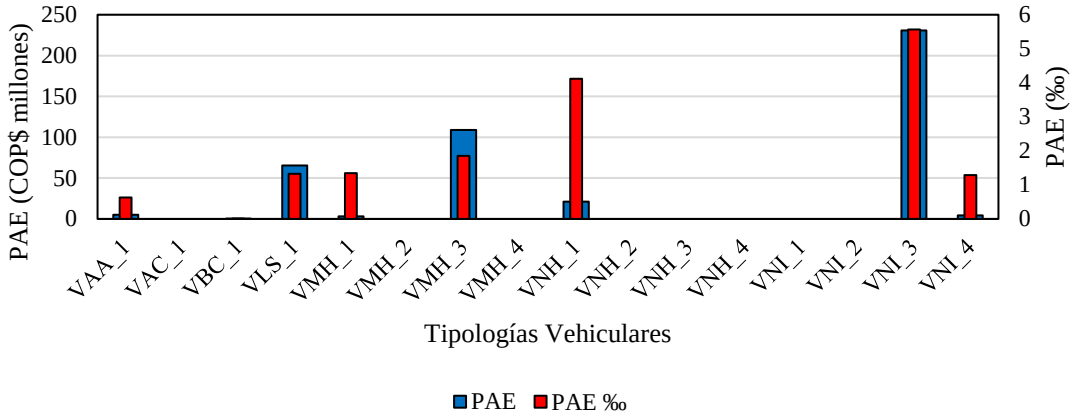


Figura 7-27. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Arterial No Vital

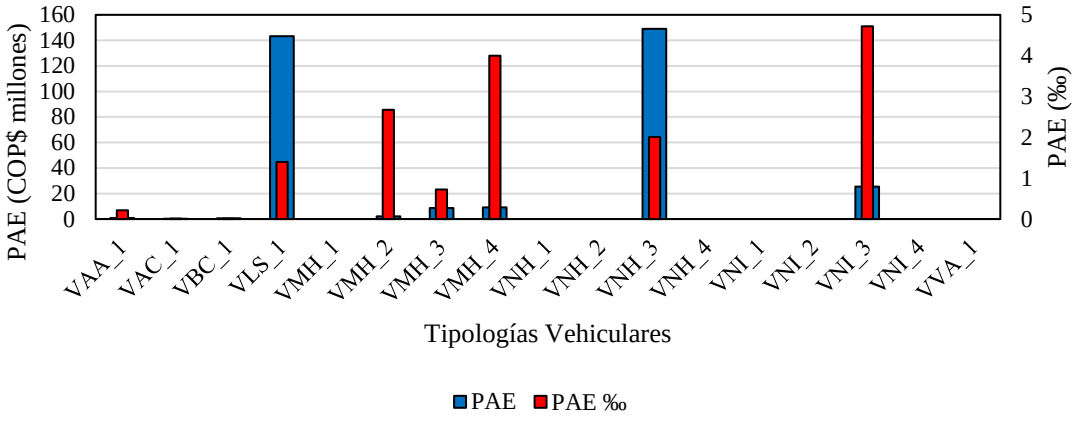


Figura 7-28. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Intermedia y Local

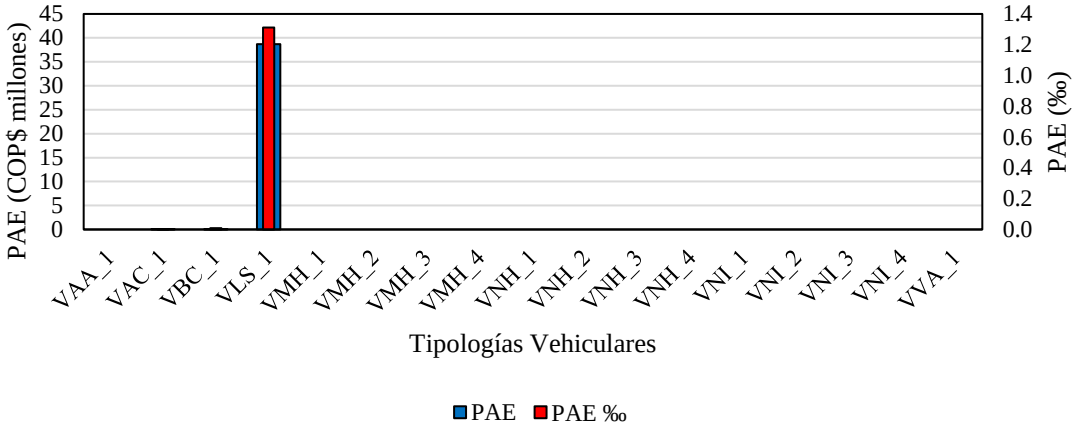


Figura 7-29. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Rural

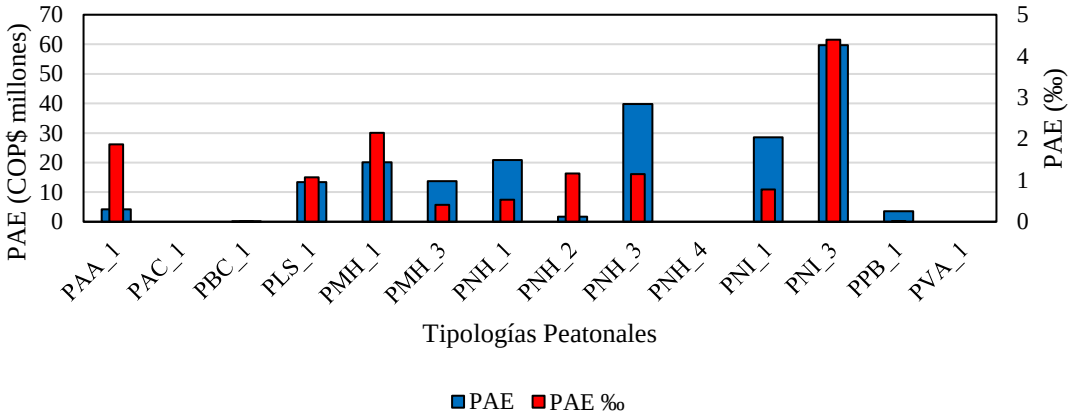


Figura 7-30. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Arterial Vital

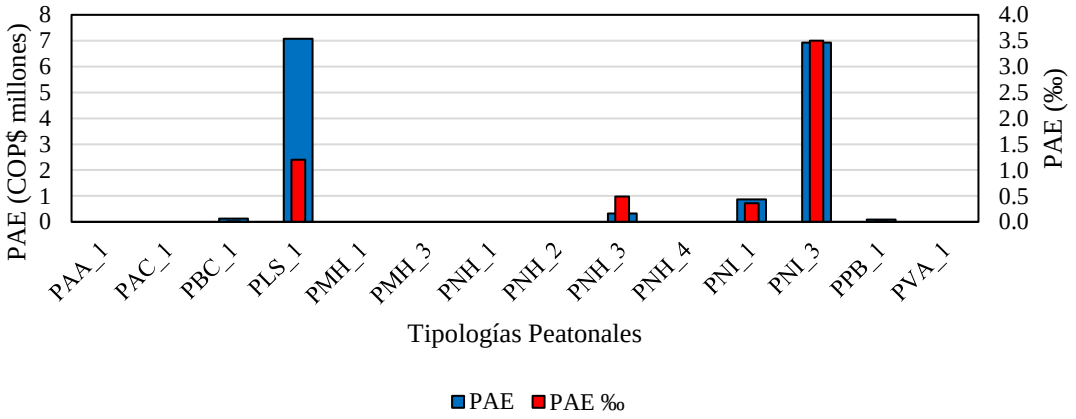


Figura 7-31. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Arterial No Vital

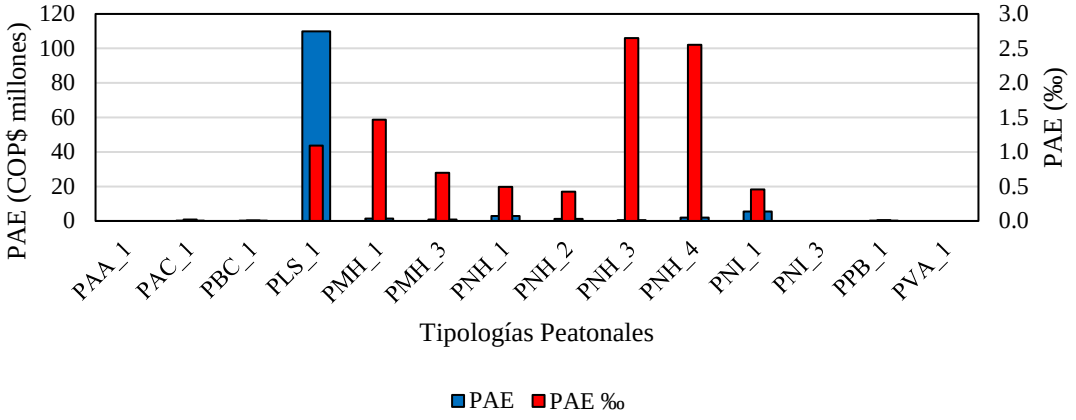


Figura 7-32. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Intermedia y Local

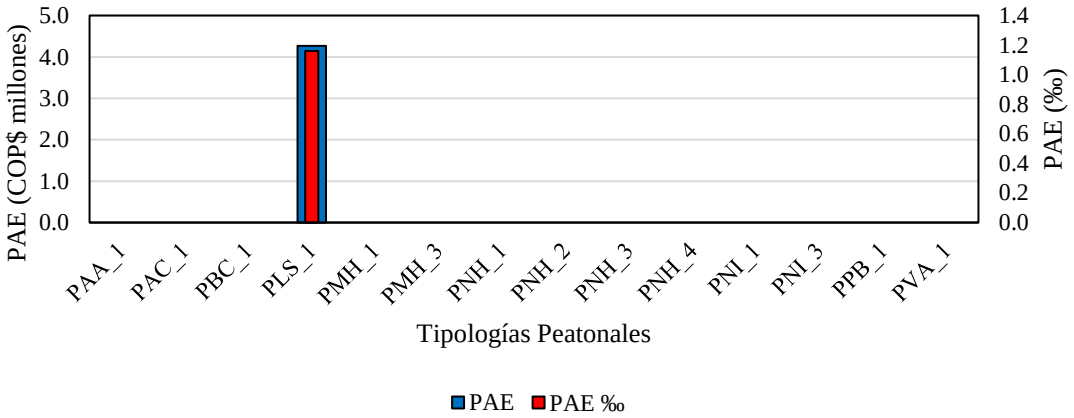


Figura 7-33. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Rural

7.5 RESULTADOS POR LOCALIDADES

A continuación, se presentan los resultados agrupados por las localidades de la ciudad. La pérdida anual esperada para cada una de las localidades en valor absoluto en millones de pesos y en valor relativo al millar, para los puentes Vehiculares y Peatonales, se presentan en la Figura 7-34 y Figura 7-35, respectivamente. Los mapas de distribución de PAE absoluta y relativa por localidad para el portafolio de exposición de Puentes de Bogotá se presentan en las Figura 7-36 y Figura 7-37, respectivamente. Estas figuras permiten establecer que las localidades que mayor riesgo absoluto concentran en la ciudad son Barrios Unidos, Fontibón y Engativá para los puentes Vehiculares y Suba, Teusaquillo, Usaquén, Engativá, Fontibón, Puente Aranda y Barrios Unidos para Peatonales. Mientras que, las de mayor riesgo relativo corresponden a Chapinero y Barrios Unidos para puentes Vehiculares, y Candelaria principalmente para Peatonales. Las diferencias obtenidas entre los casos relativos y absolutos se pueden deber al hecho de que algunas localidades contienen puentes con un alto valor expuesto pero la amenaza presente es relativamente baja, por lo que la pérdida relativa esperada es baja, mientras que otras localidades contienen puentes menos costosos pero un mayor nivel de amenaza, por lo que la pérdida relativa esperada es alta, aunque esta puede no ser significativa en términos absolutos.

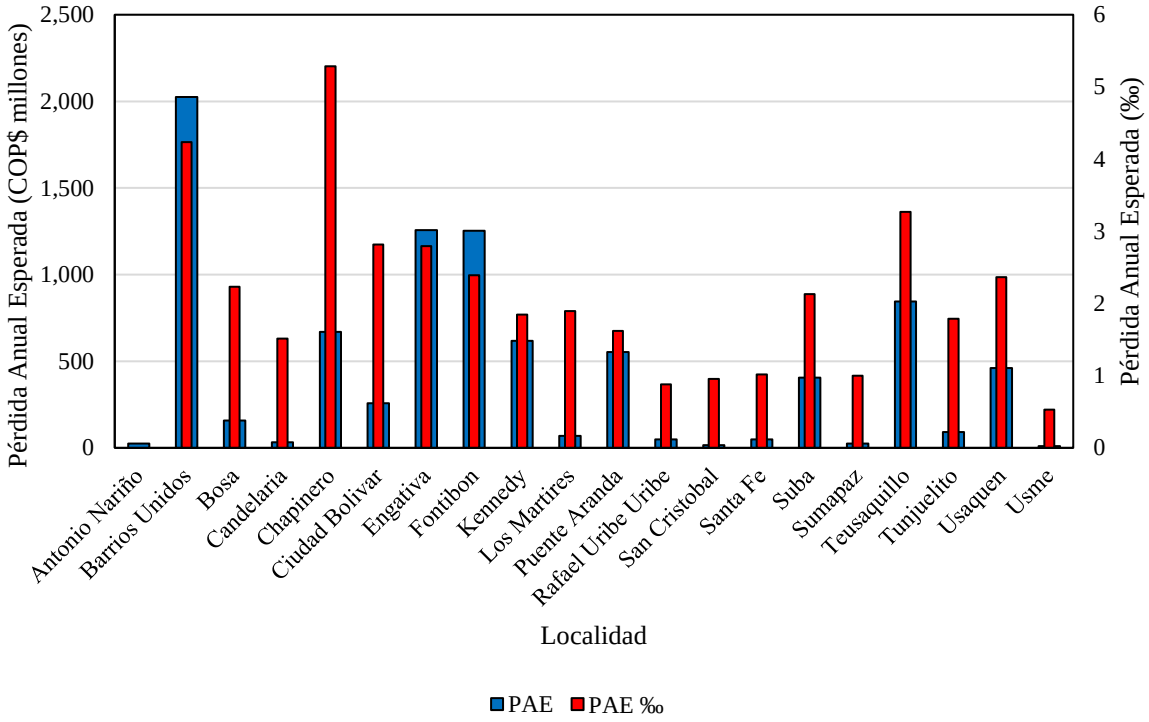


Figura 7-34. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes Vehiculares

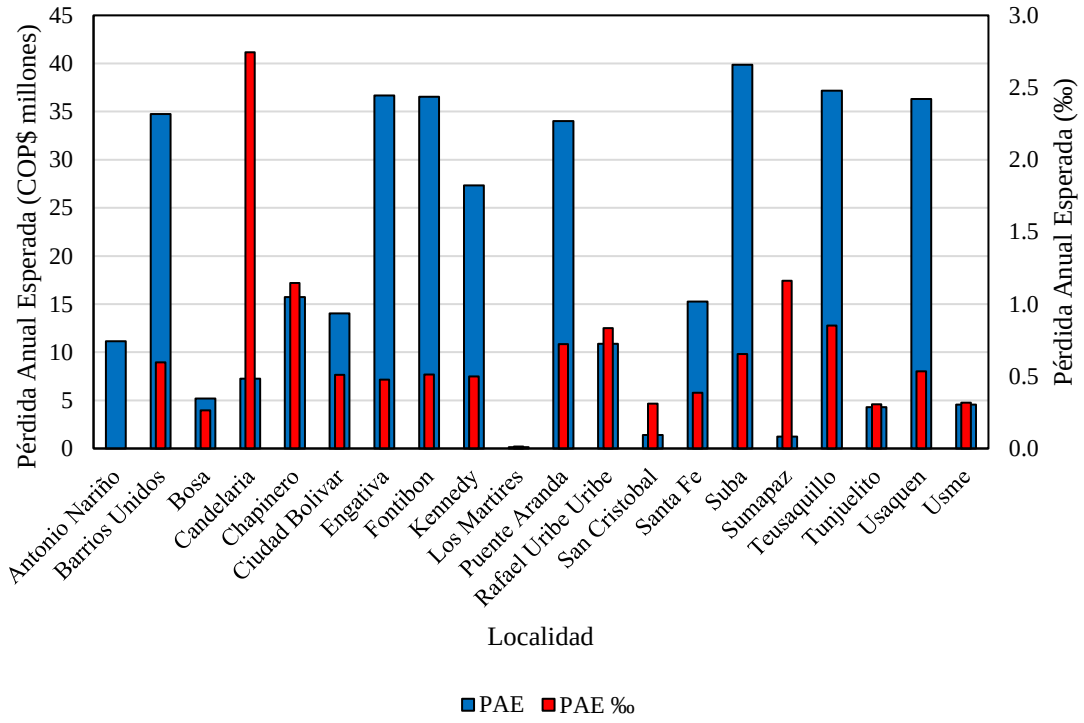


Figura 7-35. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes Peatonales

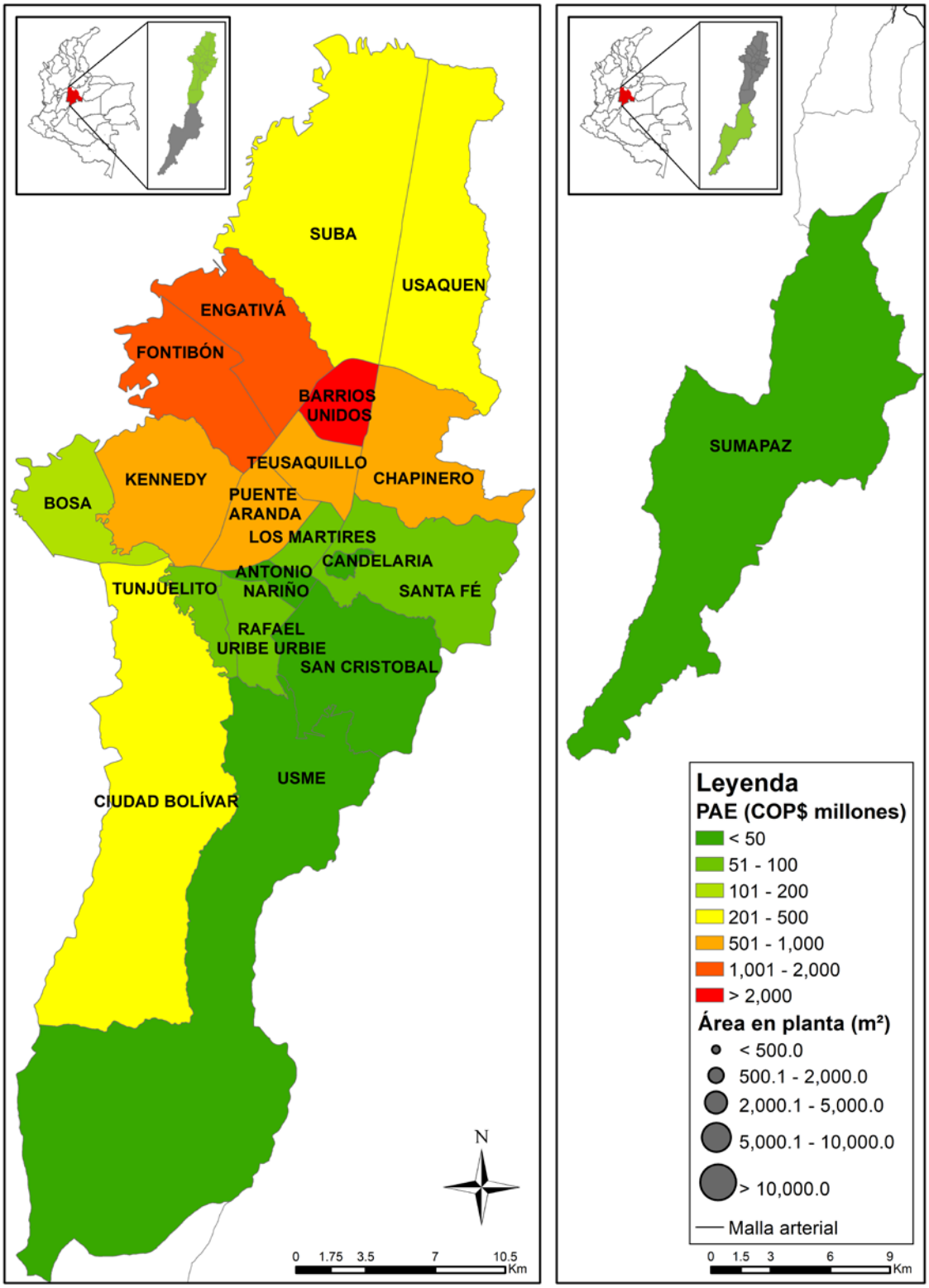


Figura 7-36. Distribución geográfica de PAE absoluta por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá

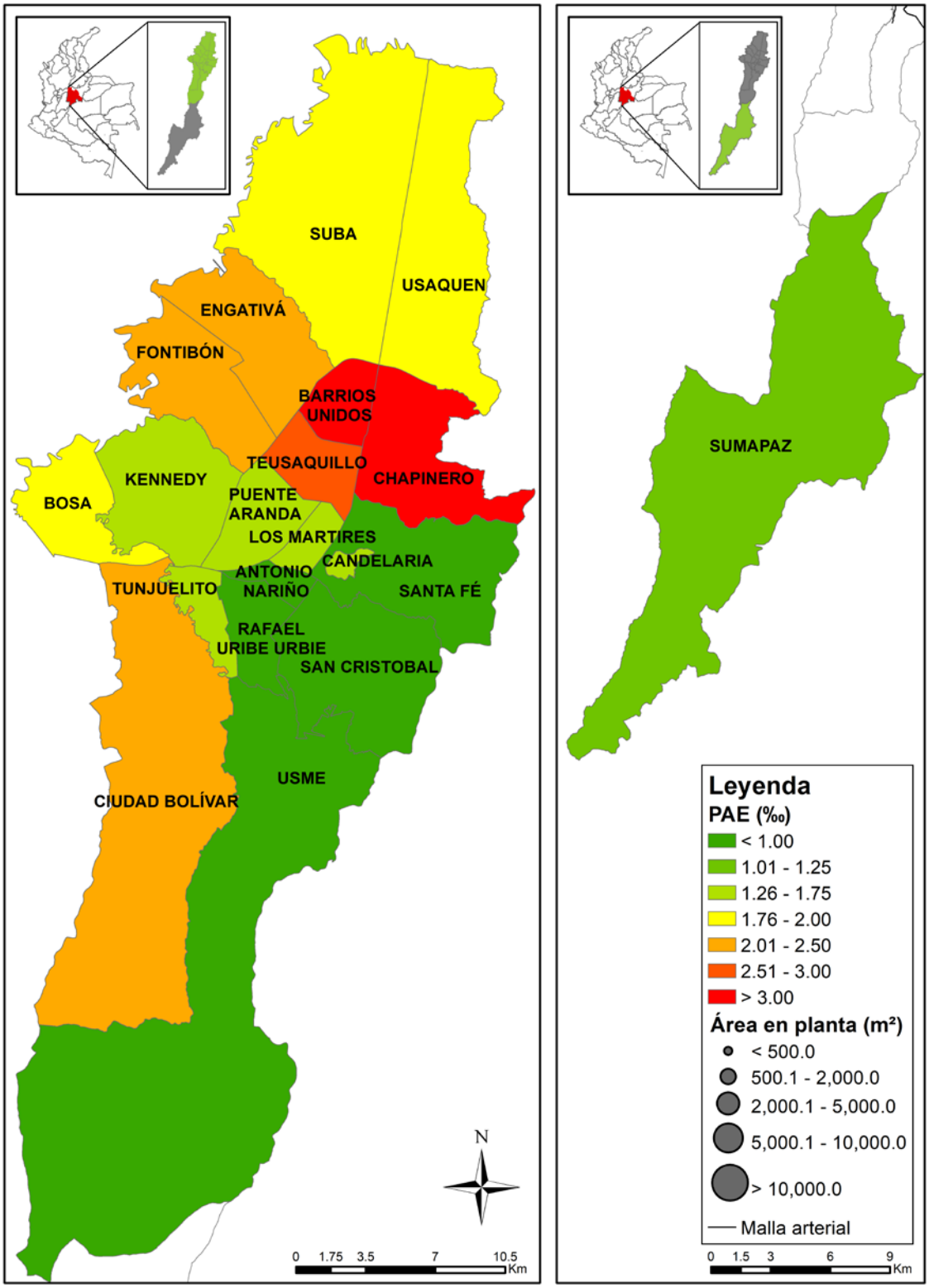


Figura 7-37. Distribución geográfica de PAE relativa por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá

7.6 EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA ESCENARIOS DETERMINISTAS

Como se explicó anteriormente, el riesgo también puede evaluarse para escenarios sísmicos específicos predeterminados. Esta información resulta útil para comprender el eventual impacto de sismos de diferentes magnitudes provenientes de diferentes fuentes sísmicas. Como resultado de estas evaluaciones se pueden dar indicaciones del impacto físico del evento sobre cada uno de los puentes (medido en % de afectación física) o en valores absolutos de la pérdida económico relacionada con la eventual reparación y/o reconstrucción del puente luego de la ocurrencia del evento.

Con fines ilustrativos se analiza el eventual impacto que sobre el portafolio de puentes pueden llegar a tener tres sismos representativos. La Tabla 7-7 presenta las características principales para los cuatro escenarios de sismos en la Falla de Frontal Cordillera Oriental presentado en el Capítulo 3 del presente informe. Estos escenarios se utilizaron con el fin de realizar un análisis determinista del riesgo y los resultados para el portafolio de puentes vehiculares y peatonales se resumen en la Tabla 7-8 y Tabla 7-9 del presente informe. Los cuatro sismos ocurren aproximadamente en las mismas coordenadas geográficas y a la misma profundidad. Esto corresponde a una distancia media desde el foco del evento hasta un punto céntrico de Bogotá del orden de 40 km. El escenario No. 4 equivale a un sismo cercano al máximo que puede producir la fuente, por lo que es un evento poco probable. Información de las intensidades que generan estos eventos se describe en el numeral 3.5 de este informe.

Tabla 7-7 Escenarios utilizados en el análisis determinista del riesgo

Escenario No.	Magnitud	PGA máximo en terreno firme en Bogotá (cm/s2)
1	5.38	52
2	6.13	108
3	6.88	231
4	7.63	293

Tabla 7-8 Resultados de la evaluación determinista del riesgo para el portafolio de puentes vehiculares

Escenario No.	Porcentaje medio de afectación en los puentes (%)	Puentes con alta probabilidad de colapso	Porcentaje de puentes con alta probabilidad de colapso (%)	Puentes con alta probabilidad de daño importante	Porcentaje de puentes con alta probabilidad de daño importante
1	0.3	0	0.00	0	0.00
2	0.8	0	0.00	0	0.00
3	3.8	3	0.31	20	2.09
4	11.5	55	5.73	158	16.48

Tabla 7-9 Resultados de la evaluación determinista del riesgo para el portafolio de puentes peatonales

Escenario No.	Porcentaje medio de afectación en los puentes (%)	Puentes con alta probabilidad de colapso	Porcentaje de puentes con alta probabilidad de colapso	Puentes con alta probabilidad de daño importante	Porcentaje de puentes con alta probabilidad de daño importante
1	0.2	0	0.00	0	0.00
2	0.5	0	0.00	0	0.00
3	2.6	0	0.00	5	0.52
4	7.9	10	1.04	92	9.59

En las Figuras Figura 7-38 a Figura 7-41 se presenta la distribución geográfica aproximada de puentes con alto potencial de colapso (en color rojo) y puentes con alto potencial de daño importante (en color amarillo). Los puentes vehiculares se representan con las pepas de mayor tamaño. Los puentes con baja probabilidad de afectación se representan con puntos verdes.

(Espacio intencional en blanco)

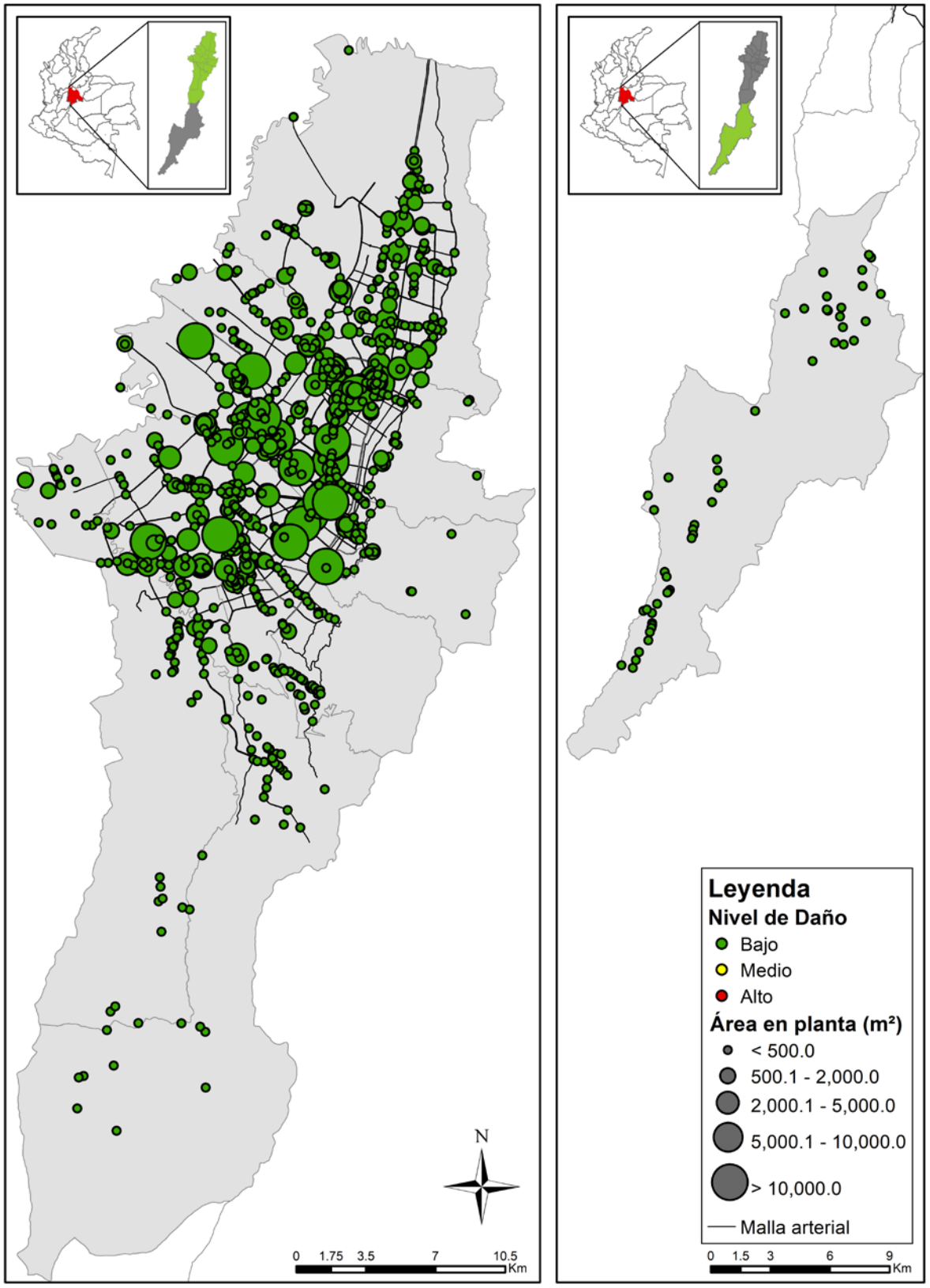


Figura 7-38. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 1 (M = 5.38)

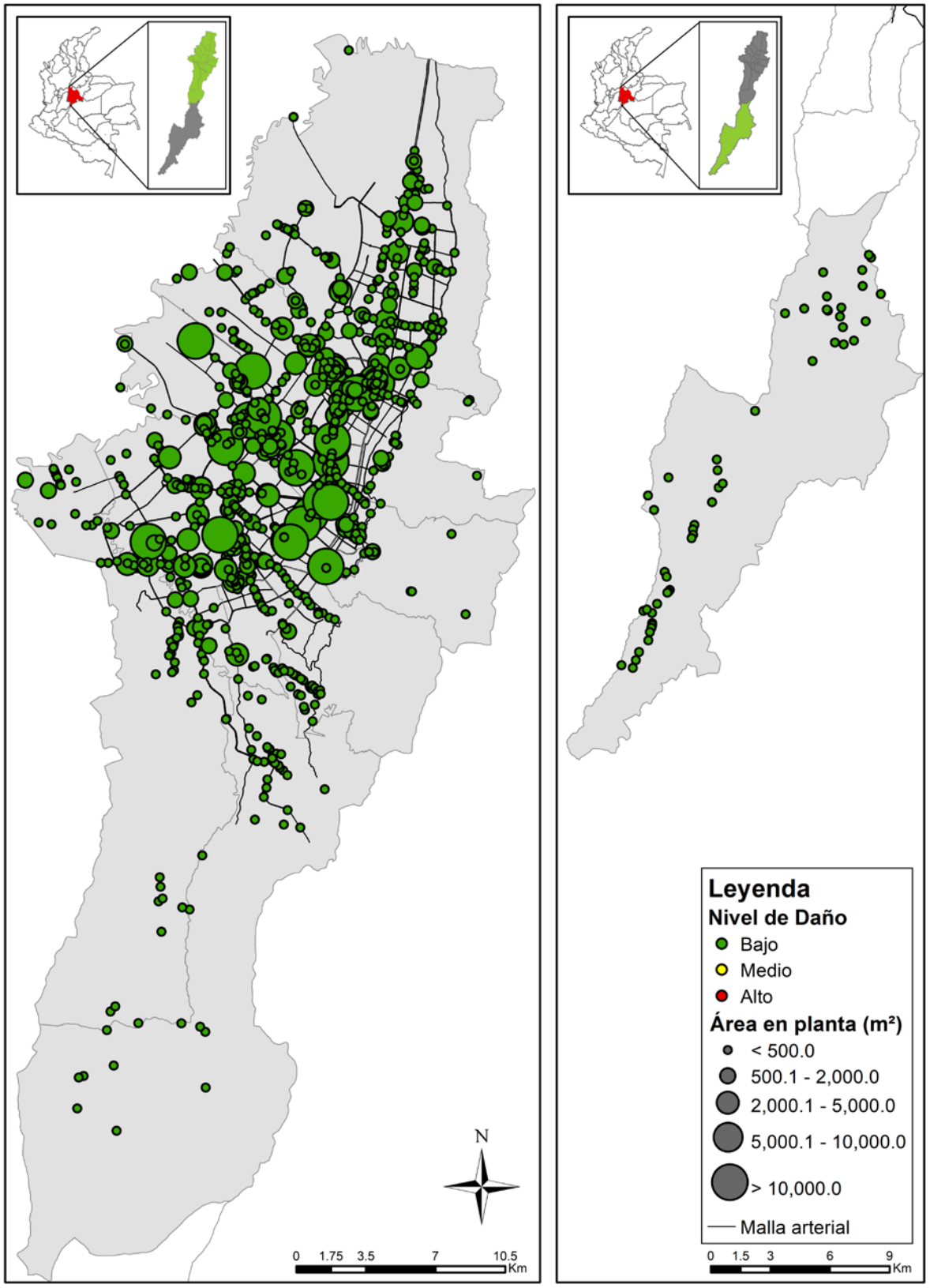


Figura 7-39. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 2 (M = 6.13)

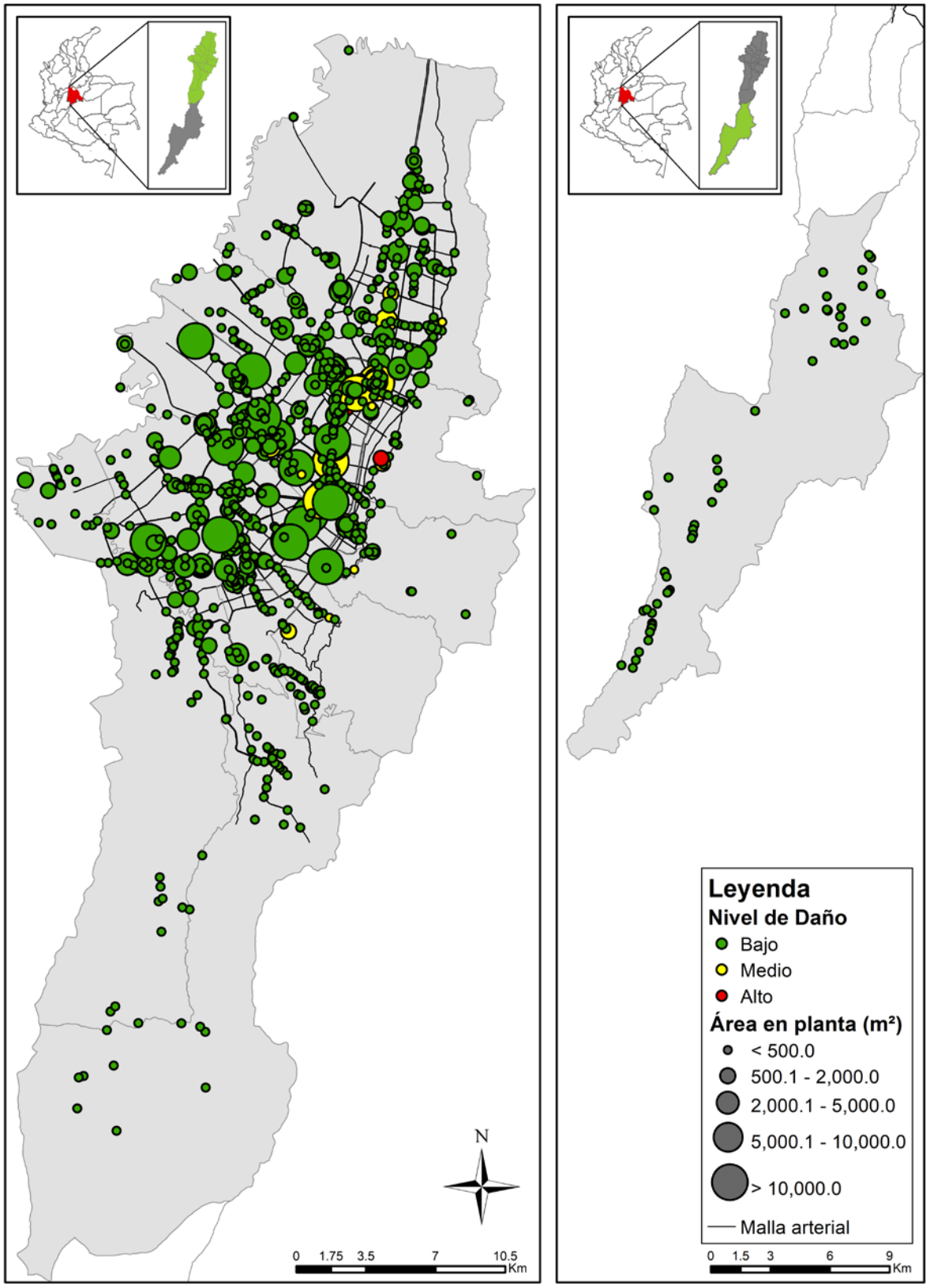


Figura 7-40. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 3 (M = 6.88)

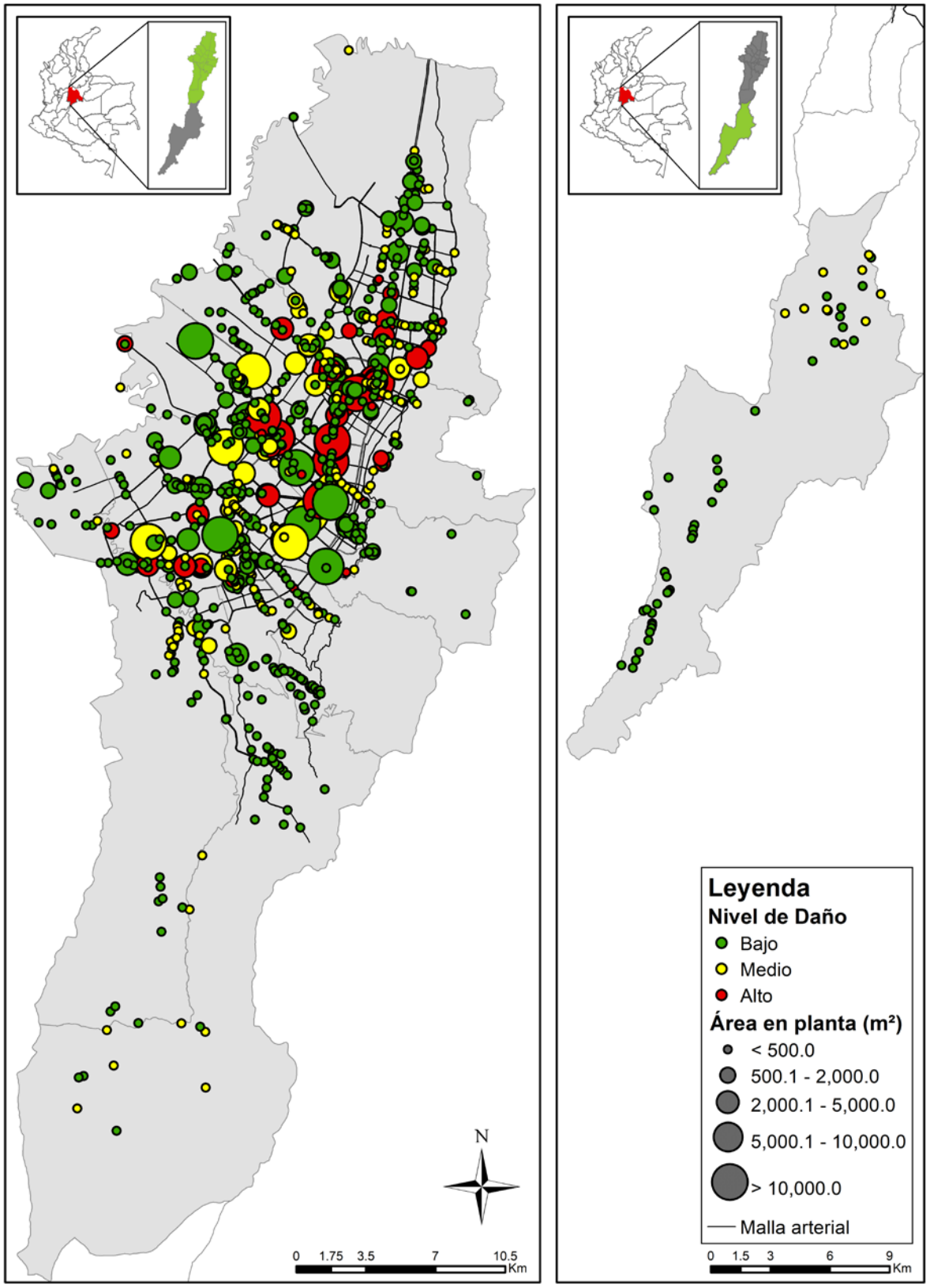


Figura 7-41. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 4 (M = 7.68)

CAPITULO
8

8 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

8.1 INTRODUCCIÓN

Los principales componentes de la gestión del riesgo sísmico son (Yamin et. al, 2013):

1. Identificación y evaluación del riesgo
2. Reducción del riesgo
3. Protección financiera
4. Preparativos y respuesta a desastres
5. Recuperación post-desastre

En los capítulos anteriores, se han presentado los resultados de las actividades orientadas a la primera componente de la gestión del riesgo, consistente en el levantamiento de la información básica y la evaluación del riesgo mediante modelos probabilistas que integren información asociada a escenarios de amenaza sísmica, las bases de datos con la información de exposición y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

El presente capítulo se centra en el planteamiento de un programa de reducción del riesgo mediante la adopción de medidas estructurales que disminuyan la vulnerabilidad sísmica y aumenten la vida útil de los puentes. En este contexto, se plantean las bases para la implementación de un plan de mitigación que incluye la realización de obras para el reforzamiento y/o rigidización de los puentes que presenten deficiencias específicas en su concepción estructural básica y en algunos casos específicos la sustitución de las estructuras que presentan alto potencial de colapso o daño en caso de ocurrencia de un sismo. El diseño e implementación de este plan permitirá minimizar en el mediano y largo plazo, el impacto que puedan tener los eventos sísmicos futuros que ocurran en la zona de influencia, sobre la infraestructura de la ciudad.

La selección de las medidas más eficientes y efectivas para cada tipología de puente depende del estado y de la configuración estructural del mismo. La selección de las opciones de reforzamientos debe contemplar su eficacia para la reducción de la vulnerabilidad al igual que las dificultades en su implementación y los costos asociados. Para esto deberán seleccionarse medidas que presenten una reducción en el riesgo eficiente a la vez que muestran una buena relación beneficio costo. Se hace necesario identificar los siguientes grupos de puentes dentro del portafolio:

a) Puentes con buena configuración funcional, relativamente modernos en su diseño y en buen estado estructural.
b) Puentes con buena configuración funcional y de servicio que presenten algunas deficiencias localizadas susceptibles de reforzamiento sísmico.
c) Puentes que por aspectos funcionales ya no puedan atender las demandas de servicio requeridas por los planes de desarrollo vial de la ciudad o que su vulnerabilidad sea significativa y la eventual intervención no sea viable técnica, funcional o económicamente.

Ante esta categorización de los puentes, se generan diferentes posibles acciones para la intervención, desde la eventual recomendación de sustitución de la estructura por una nueva, pasando por la propuesta de una serie de obras de intervención hasta la decisión de mantener la estructura en su estado actual sin necesidad de intervención por un tiempo adicional.

En este capítulo se desarrollan las siguientes actividades que permiten diseñar un plan estratégico de mitigación del riesgo sísmico del portafolio de puentes de la ciudad:

- Identificación de las deficiencias principales en cada una de las tipologías predominantes de puentes en la ciudad.
- Propuesta técnica de opciones de mitigación para cada una de las tipologías identificadas.
- Estimación preliminar de los recursos financieros requeridos para la implementación de cada una de las opciones de mitigación.
- Evaluación de las relaciones beneficio-costo de las opciones de intervención por tipología.
- Selección de las opciones de intervención más eficaces y de mayor eficiencia-costo.
- Propuesta de priorización de las intervenciones con el fin de maximizar la eficiencia de la inversión de los recursos disponibles.
- Conceptualización general del plan y definición de los posibles alcances del mismo de acuerdo con los recursos disponibles.

En este contexto, para cada tipología de puente se presentan en general varias opciones posibles de intervención. El marco de referencia para la definición del grado de intervención corresponde al comportamiento esperado de la estructura acorde con la última versión de la Norma Colombiana de Diseño y de puentes (CCP 14). Según esto, el grado de intervención depende de la condición estructural actual y del nivel de cumplimiento del código de diseño. En términos generales se presentan las siguientes alternativas de intervención:

1. **Reforzamiento estructural**: esta opción contempla el incremento de la capacidad de resistencia a momentos flectores, cargas axiales o fuerzas cortantes de elementos que presenten deficiencias con respecto a los niveles previstos para el diseño sismo-resistente por la normativa vigente.

2. **Rigidización:** esta opción contempla el incremento en la rigidez de elementos críticos de la subestructura tales como columnas o pilas o componentes de la cimentación cuando se presentan altas deflexiones horizontales relativas que puedan afectar el comportamiento del puente en el marco de las limitaciones impuestas por la normativa vigente.

3. **Mejora de la ductilidad y capacidad a deformación**: estas medidas incluyen la adición o reforzamiento de elementos que incrementen la capacidad de deformación de los elementos, para darle mayor capacidad de disipación de la energía sísmica. Estas intervenciones pueden incluir el aumento de los anchos de silla en las pilas o en el estribo, la instalación de ménsulas en elementos de superestructura, la instalación de topes sísmicos, o la intervención de columnas y vigas para mejorar su ductilidad.

4. **Limitación de la fuerza**: este tipo de alternativa busca reducir las demandas de carga gravitacional y sísmica sobre elementos críticos del puente. Por lo general los métodos incluyen la modificación de componentes del puente de forma que la ocurrencia de los daños se traslade a zonas menos críticas. Esto incluye la instalación dispositivos de aislamiento sísmico, de elementos disipadores de energía o el reforzamiento en columnas para trasladar la zona de posible articulación plástica a las vigas, por ejemplo.

5. **Mejoramiento de los suelos**: en caso de que los problemas identificados provengan del tipo de suelo sobre el que se apoya el puente, se deben considerar medidas para reducir el riesgo a deslizamientos de taludes, asentamientos severos, socavación, etc. Esto con el fin de prevenir posibles situaciones que afecten las condiciones estructurales y de servicio del puente lo cual puede influir significativamente en su comportamiento estructural esperado a futuro.

6. **Reemplazo parcial**: en ciertas ocasiones, considerando la magnitud del tipo de reforzamiento que se debe realizar o la dificultad técnica y el costo del mismo, resulta recomendable llevar a cabo el reemplazo parcial de algunos componentes importantes del puente con el fin de garantizar sus buenas condiciones y adecuado funcionamiento.

7. **Reemplazo total:** algunas estructuras específicas en el portafolio presentan limitaciones funcionales importantes o dadas sus condiciones estructurales actuales, requerirían un alto nivel de intervención para llevarlas al cumplimiento básico de los criterios de seguridad o funcionalidad impuestos por la normativa vigente. Ante esta situación la opción de intervención más eficiente y efectiva puede resultar la de un reemplazo integral del puente.

En muchas ocasiones el reforzamiento óptimo cuenta con más de una alternativa de las anteriormente mencionadas. Para efectos de este informe se seleccionarán medidas de reforzamiento de varias de estas alternativas con el fin de proponer un esquema típico de reforzamiento. A partir de este esquema se pretende calcular la relación beneficio costo y evaluar la reducción del riesgo en el portafolio de puentes de la ciudad.

8.2 OPCIONES DE INTERVENCIÓN Y REFORZAMIENTO DE PUENTES

8.2.1 Bases conceptuales para el reforzamiento y limitaciones

El objetivo de las opciones de intervención propuestas es reducir la vulnerabilidad sísmica de puentes para así disminuir el riesgo. Para esto se propone una serie de medidas a implementar en cada una de las tipologías que se pueden encontrar en la ciudad de Bogotá. Estas medidas deben conducir a un mejor comportamiento global de la estructura. Es importante mencionar que las medidas aplican para los componentes del sistema de resistencia sísmica, por lo cual no se tienen en cuenta los componentes de funcionamiento de servicio, como son las vigas longitudinales, el tablero, la carpeta asfáltica, las juntas, las barreras y barandas, entre otros.

Para la estimación de los costos de las medidas de reforzamiento se utilizan precios unitarios lo cual permite su posterior aplicación a cada puente acorde con sus dimensiones y características. Las valoraciones realizadas son indicativas y reflejan únicamente órdenes de magnitud de los costos esperados. Estos valores incluyen mano de obra, materiales, equipos, herramientas, la estimación del AIU y factores adicionales explicados en el Capítulo 5. Sin embargo, esta estimación no incluye los siguientes factores adicionales:

- Costos indirectos debidos a procesos administrativos y de contratación.
- Ajustes en los precios según la cantidad de intervenciones y volúmenes de material.
- Dificultades específicas para llevar a cabo las intervenciones (accesibilidad, tráfico, trabajo nocturno, instalaciones de redes existentes, seguridad, etc.).
- Condiciones particulares en que se hagan las contrataciones (situación de emergencia, escasez de materiales o equipos, sobrecostos por situaciones particulares de la economía).
- No se incluyen en estos costos la eventual intervención de componentes de servicio u otros elementos estructurales con daños.
- Otras diferentes a las indicadas en el numeral 8.2.4.

8.2.2 Identificación de componentes susceptibles a daño

Considerando la gran variabilidad en las tipologías de los puentes de la ciudad y las posibles combinaciones en su configuración estructural, el planteamiento de alternativas y medidas de intervención se basa en la identificación de los diferentes componentes susceptibles a daño. En la Tabla 8-1 se presenta un resumen de los principales componentes susceptibles a daño para cada una de las tipologías propuestas en el numeral 8.2. Las intervenciones se proponen independientemente del material de la superestructura del puente ya que las medidas están orientadas a la mejora en la subestructura, la cual es responsable de la resistencia sísmica de la construcción. La mayoría de los elementos que componen la subestructura se han construido en concreto reforzado. Las subestructuras en acero, para el caso de Bogotá, se concentran principalmente en los Puentes Prototipo Bogotá. Estas últimas son de relativa baja vulnerabilidad sísmica como se muestra en el numeral 6.10.2.1 y por ende no se consideran susceptibles a daño en el marco del presente análisis.

Tabla 8-1. Posibles componentes susceptibles a daño por tipología

Uso	Tipología	Columna	Pantalla	Ancho de silla	Llave de cortante externa	Llave de cortante interna	Neoprenos	Espaldar estribo
Vehiculares	VMH_1	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VMH_2	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VMH_3	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VMH_4		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	VNI_1	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VNI_2	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VNI_3	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VNI_4		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	VNH_1	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VNH_2	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VNH_3	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	VNH_4		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	VBC_1		✓					
	VLS_1			✓	✓	✓	✓	✓
	VAA_1			✓	✓	✓	✓	✓
	VAC_1		✓					
	VVA_1							
Peatonales	PMH_1	✓		✓	✓	✓	✓	
	PMH_3	✓		✓	✓	✓	✓	
	PNI_1	✓		✓	✓	✓	✓	
	PNI_3	✓		✓	✓	✓	✓	
	PNH_1	✓		✓	✓	✓	✓	
	PNH_2	✓		✓	✓	✓	✓	
	PNH_3	✓		✓	✓	✓	✓	
	PNH_4		✓	✓	✓	✓	✓	
	PBC_1		✓					
	PLS_1			✓	✓	✓	✓	✓
	PPB_1							
	PAT_1	✓		✓	✓	✓	✓	
	PAC_1		✓					
	PVA_1							

8.2.3 Medidas de intervención por componentes

A continuación, se presentan ejemplos de medidas para diferentes deficiencias asociadas a los componentes susceptibles a daño identificados en las diferentes tipologías. Cabe mencionar que estas medidas no se limitan a los ejemplos presentados, no son excluyentes unas con otras y pueden adoptarse en diferentes modalidades.

8.2.3.1 Intervención de columnas

- Reemplazo completo (Figura 8-1): esta medida se considera cuando la columna está muy dañada o deteriorada, cuando la capacidad a flexión es inadecuada o cuando otra medida es complicada por razones ajenas al ámbito estructural (arquitectura o servicio). Debe tenerse especial cuidado con la conexión de los nuevos elementos con los elementos existentes. Por esta razón, en muchas

ocasiones, requiere la demolición y reconstrucción parcial de otros elementos como son la cimentación o la viga cabezal. Esta opción de intervención requiere la consideración de un sistema de apuntalamiento temporal con condiciones de diseño especiales mientras se construyen los nuevos elementos.

- Adición de columnas suplementarias (Figura 8-2): esta medida se considera cuando se cuenta con espacio disponible suficiente y el reemplazo no es viable técnicamente. Es necesaria la ampliación de la viga cabezal y la construcción de la cimentación de las nuevas columnas. Debe tenerse especial cuidado con la conexión de los nuevos elementos con los elementos existentes.

- Enchaquetado con concreto reforzado (Figura 8-3): esta medida puede aplicarse en la altura completa o a una porción de la columna. La medida aumenta la capacidad a flexión y a cortante del elemento reforzado, lo cual debe controlarse, ya que en ocasiones puede ser necesario también reforzar la cimentación. Para garantizar un buen comportamiento es necesario proveer una cantidad de conectores de cortante suficientes. Debe tenerse especial cuidado con el anclaje del nuevo refuerzo longitudinal en la cimentación y la viga cabezal. También es importante proveer un buen confinamiento transversal a las nuevas barras con el fin de tener un aumento significativo en la ductilidad.

- Enchaquetado con lámina de acero (Figura 8-4): Esta medida puede aplicarse en la altura completa o a una porción de la columna. El proceso constructivo consiste en soldar dos mitades del enchaquetado alrededor de la columna, dejando espacio suficiente para rellenar con concreto fluido. Para garantizar un buen comportamiento es necesario proveer una cantidad de conectores de cortante suficientes. Esta medida aumenta principalmente la capacidad a cortante y la ductilidad de la columna. Para que adicionalmente aumente de manera significativa la capacidad a flexión, se pueden usar barras longitudinales en el espacio entre la columna y la chaqueta de acero.

- Enchaquetado con fibras: esta medida se considera cuando es necesario un aumento en la capacidad a corte o en la ductilidad a flexión de la columna. Existen diversos tipos de fibras que pueden ser usadas para este propósito como son las de carbono, de vidrio o de aramida entre otras. Esta medida tiene la ventaja de que no aumenta significativamente la rigidez ni la capacidad a flexión del elemento, con lo cual puede no ser necesario el reforzamiento de elementos adyacentes.

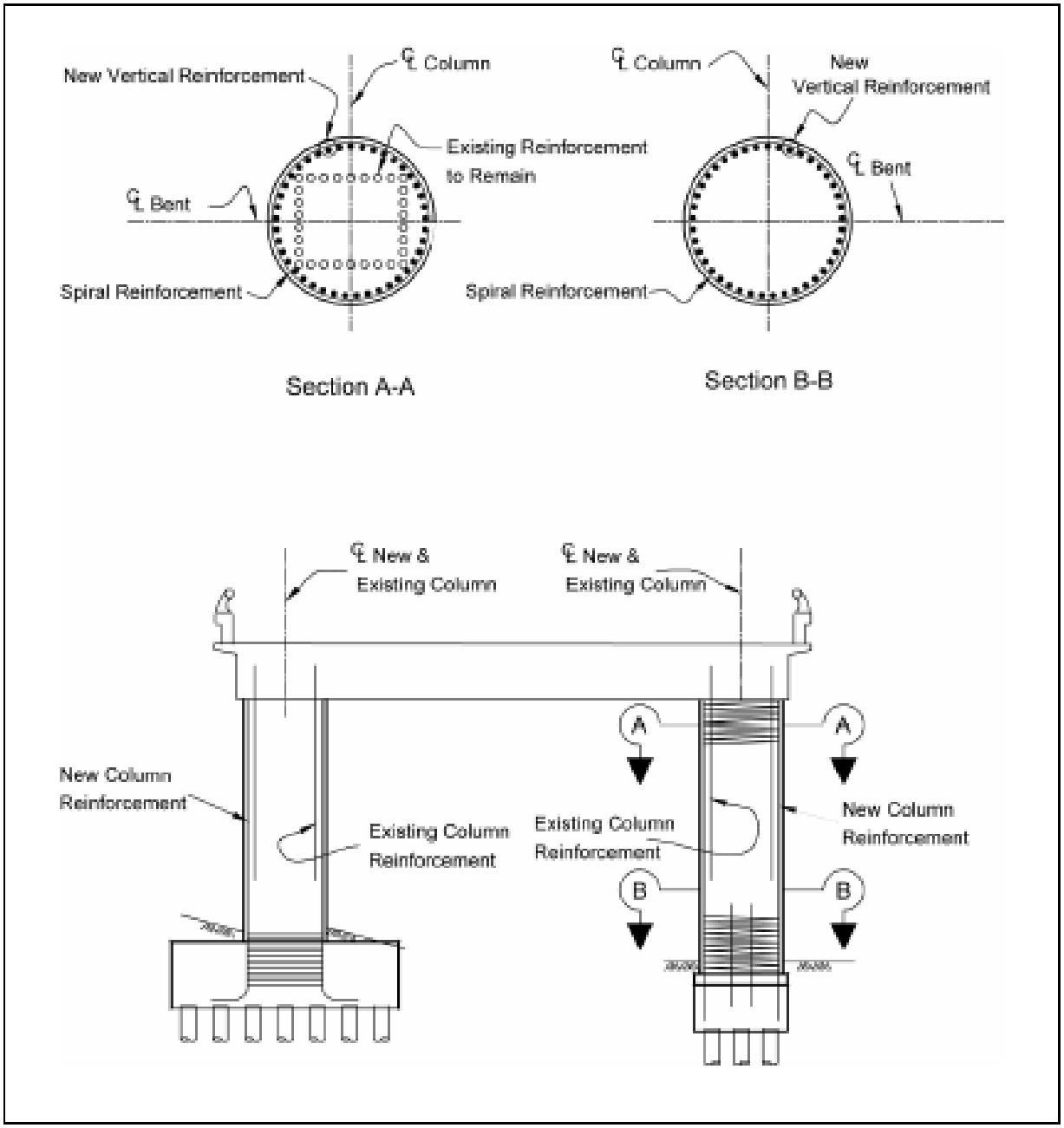


Figura 8-1. Reemplazo completo de columna (FHWA, 2006)

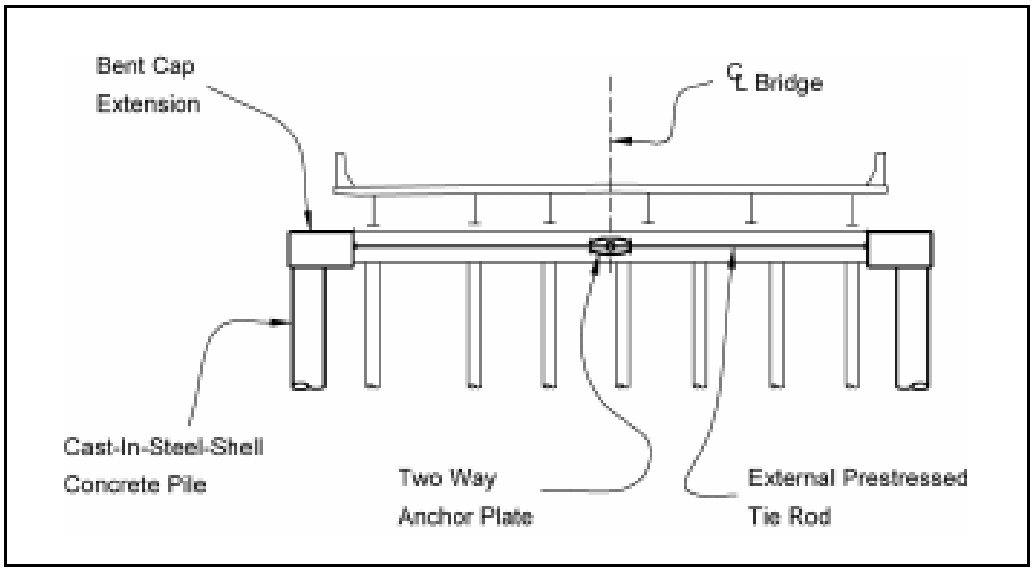


Figura 8-2. Adición de columnas suplementarias (FHWA, 2006)

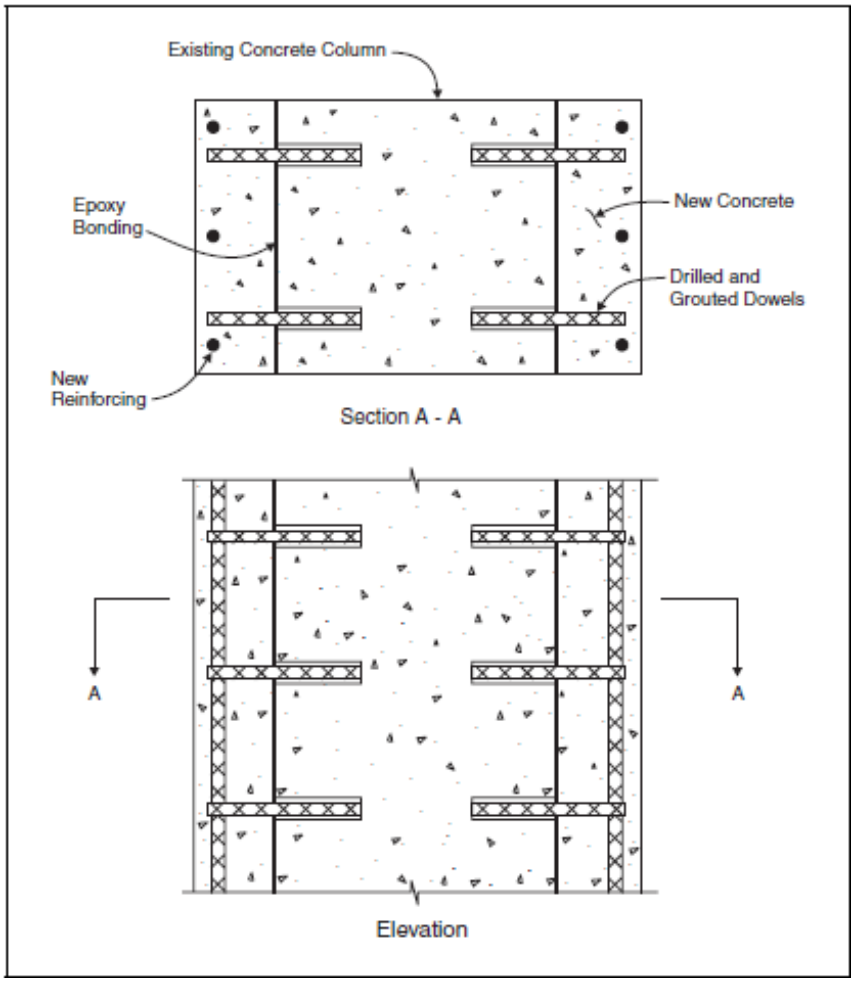


Figura 8-3. Enchaquetado con concreto reforzado (FHWA, 2006)

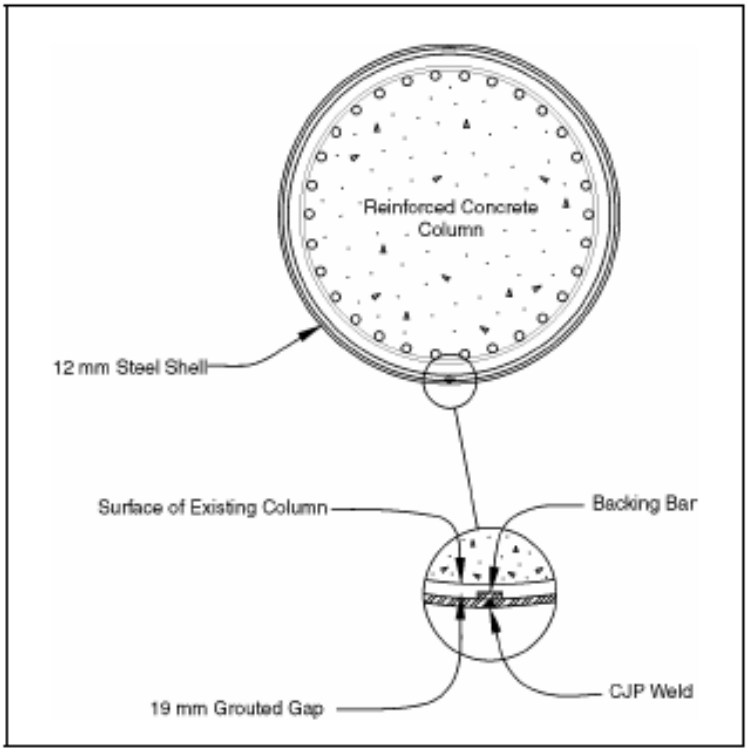


Figura 8-4. Enchaquetado con lámina de acero (FHWA, 2006)

- Pre-esforzado exterior (Figura 8-5): esta medida se considera cuando es necesario un aumento en la ductilidad a flexión de la columna. Para esto se enrolla el cable alrededor de la columna con el fin de proveer confinamiento lateral a la sección. Al igual que el enchaquetado con fibras, tiene la ventaja de que no aumenta significativamente la rigidez ni la capacidad a flexión del elemento. Es importante que el acero de pre-esfuerzo se proteja de la corrosión.

Figura 8-5. Preesforzado exterior (FHWA, 2006)

- Suplemento con muros de cortante (Figura 8-6): esta medida se considera cuando es necesario un aumento en la capacidad a flexión o a cortante de las columnas o viga cabezal de un pórtico. Para garantizar un buen comportamiento es necesario proveer una cantidad de conectores de cortante suficientes entre las columnas existentes y el muro nuevo. Es necesaria la construcción de una nueva cimentación para el muro y esta debe estar anclada adecuadamente a la cimentación existente del pórtico. Es importante tener en cuenta que esta medida cambia la tipología del puente, por lo cual hay que evaluar si esta nueva configuración es menos vulnerable que la que se tenía antes de la intervención.

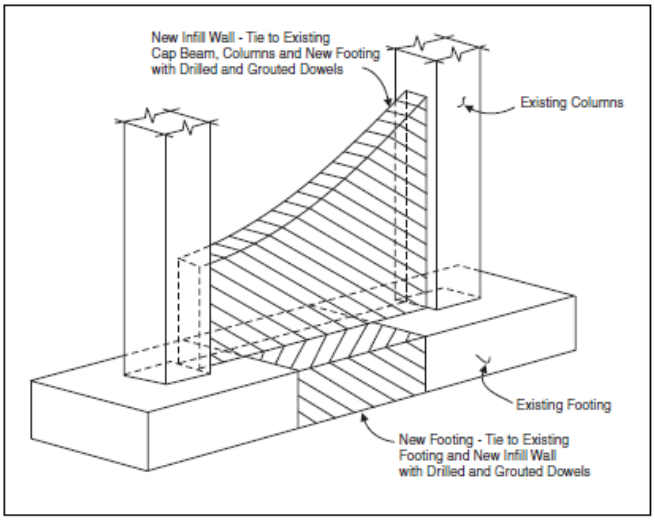


Figura 8-6. Suplemento con muros de cortante (FHWA, 2006)

- Reducción de las fuerzas mediante aisladores sísmicos (Figura 8-7): en algunos casos mejorar la capacidad de la columna no es viable técnica o económicamente, por lo que la mejor solución puede ser reducir las fuerzas transmitidas desde la superestructura hasta la subestructura. Los aisladores sísmicos modifican la respuesta dinámica del puente logrando la reducción deseada.

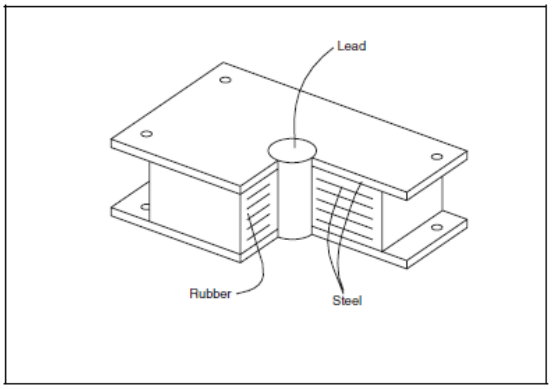


Figura 8-7. Aislador sísmico (FHWA, 2006)

8.2.3.2 Pantallas en concreto reforzado

Las pantallas en concreto reforzado como elemento principal de soporte en la subestructura, son en general elementos muy rígidos en el plano del mismo, que corresponde a la dirección transversal del puente. Generalmente no requieren ningún tipo de reforzamiento en esta dirección. Sin embargo, estos elementos pueden requerir intervención en la dirección perpendicular al plano por deficiencias en la rigidez o a nivel de cimentación cuando esta no ha sido dimensionada debidamente. En la dirección perpendicular a su plano que corresponde a la dirección longitudinal del puente se tratan usualmente como columnas, por lo cual las medidas del numeral anterior aplican a este tipo de componente.

8.2.3.3 Anchos de silla, topes y conectores sísmicos

Una de las principales causas de colapso de puentes de luces simplemente apoyadas es la pérdida de silla en los apoyos. Los códigos de diseño sismo resistente especifican una longitud mínima de silla en función de la longitud de la luz. Sin embargo, se permite usar una longitud menor si se utilizan medidas para disminuir el desplazamiento sísmico relativo entre elementos, como son los topes y los conectores sísmicos. Actualmente existen una gran cantidad de criterios para la configuración de estos elementos, muchas de las cuales no son diseñadas de manera apropiada para la demanda a la cual se van a encontrar sometidas. Para el portafolio de puentes de Bogotá, este podría ser un gran problema debido a la gran cantidad de puentes de esta característica. Las medidas que se presentan a continuación pretenden superar esta deficiencia en el diseño.

- Extensión en el ancho de silla (Figura 8-8): esta medida se considera cuando el ancho de silla es menor al mínimo requerido por el código de diseño y no se cuenta con ningún elemento que impida el movimiento excesivo de las vigas. El ancho de silla debe cumplirse tanto en estribos como en pilas intermedias. Una ventaja de esta medida es que mejora la capacidad de desplazamiento sin afectar las propiedades dinámicas del puente.

- Bloques de impacto (Figura 8-9): esta medida limita el movimiento longitudinal de las vigas, para así prevenir la pérdida de apoyo. Al igual que con los refrenadores longitudinales se debe tener especial cuidado, ya que se su instalación puede inducir fuerzas adicionales en otros elementos en cuyo caso estos deben evaluarse para un eventual reforzamiento complementario.

- Refrenador longitudinal en apoyos (Figura 8-10): esta medida limita los movimientos relativos longitudinales entre las riostras de tableros adyacentes en las pilas, para así prevenir la pérdida de apoyo. Estos refrenadores son usualmente barras o cables trabajando a tracción, diseñadas para permanecer elásticas durante el sismo. Se debe tener especial cuidado, ya que, en su instalación, se pueden inducir fuerzas adicionales en otros elementos. En caso que esto pueda ocurrir, dichos elementos deben revisarse y reforzarse para obtener un comportamiento global adecuado.

- Llaves de cortante (Figura 8-11): esta medida limita el movimiento en los apoyos. Las llaves pueden ubicarse entre las vigas o adyacente a las vigas extremas, dependiendo de la disponibilidad de espacio. Estas son diseñadas para resistir las cargas de manera elástica. Estas llaves son

generalmente de concreto reforzado, pero podrían ser secciones compuestas de acero rellenas de concreto o elementos de acero debidamente rigidizados y conectados a la estructura principal del puente.

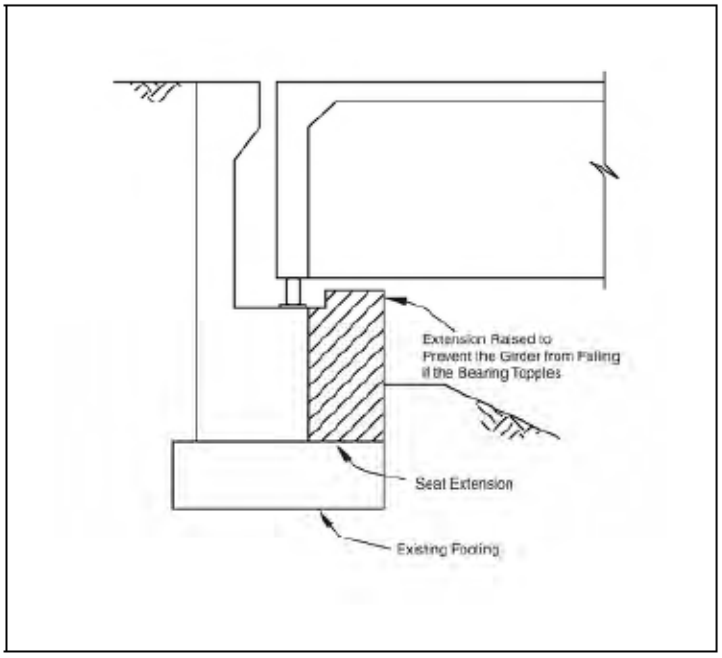


Figura 8-8. Extensión en el ancho de silla (FHWA, 2006)

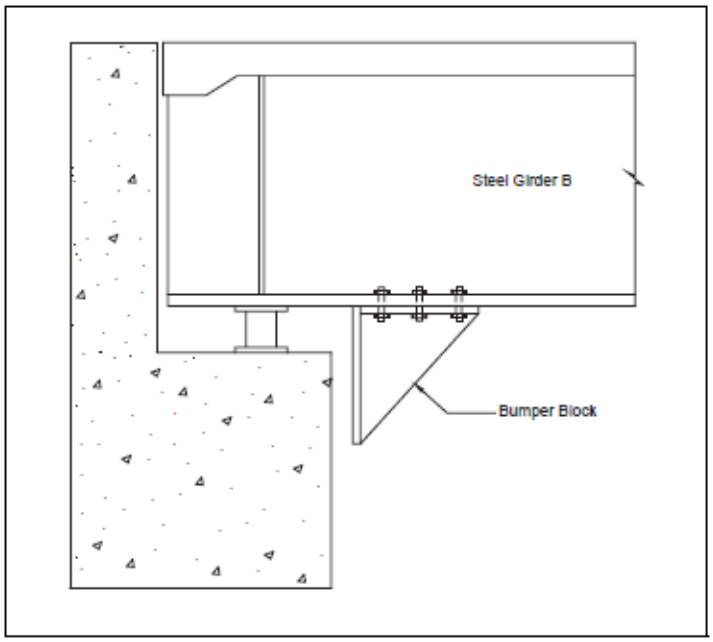


Figura 8-9. Bloques de impacto (FHWA, 2006)

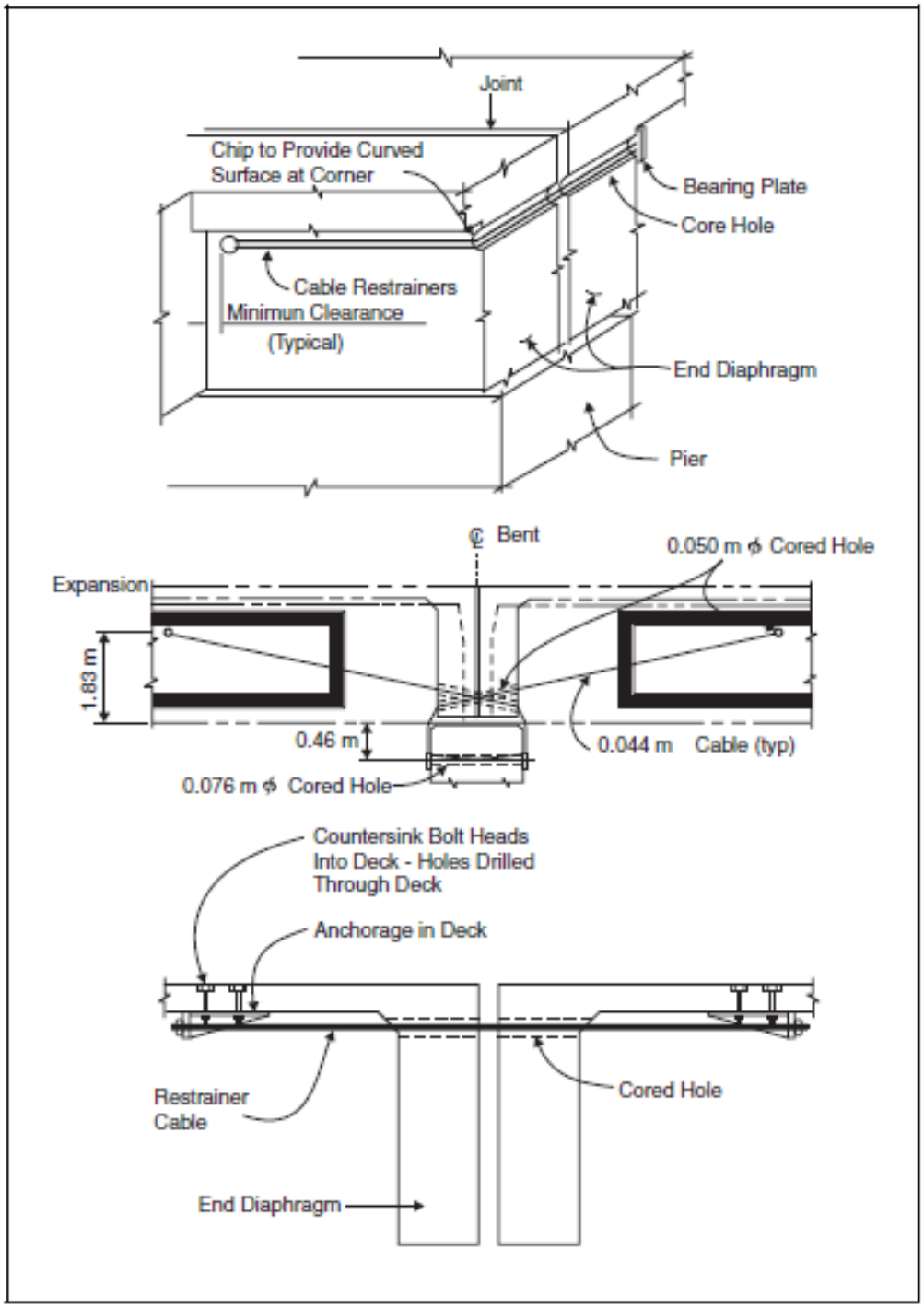


Figura 8-10. Refrenador longitudinal en apoyos (FHWA, 2006)

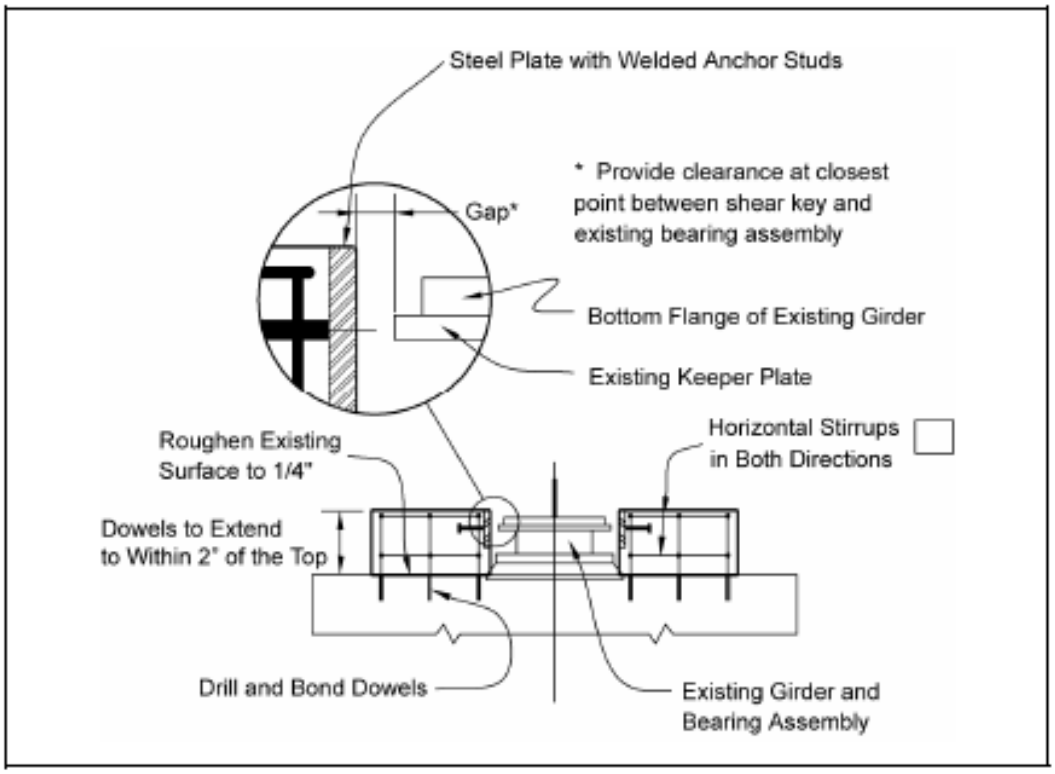


Figura 8-11. Llaves de cortante (FHWA, 2006)

8.2.3.4 Neoprenos y aisladores sísmicos

Durante los eventos sísmicos los neoprenos de apoyos de las vigas principales del tablero pueden sufrir daños debidos a grandes desplazamientos. En estos casos es necesario un reemplazo similar al que se realiza periódicamente dentro de los planes de mantenimiento de puentes de luces simplemente apoyadas. Dentro de los programas de intervención podría plantearse también un cambio de los neoprenos convencionales por aisladores sísmicos, que como se mencionó en numerales anteriores, puede ser una medida para reducir la vulnerabilidad de la estructura. Sin embargo, se debe tener cuidado al realizar este cambio, ya que el uso de aisladores sísmicos puede aumentar la capacidad de desplazamiento del tablero, lo que podría conllevar afectación de otros componentes, como por ejemplo el espaldar de los estribos o las juntas en el tablero.

8.2.3.5 Espaldar de estribos

Debido a los movimientos longitudinales del puente, el espaldar del estribo puede resultar dañado en el caso de un evento sísmico. Este elemento es altamente frágil debido a su geometría, ya que tiende a ser bastante esbelto. Sin embargo, los daños en este componente, generalmente no son catastróficos, y no causan ni el colapso ni el cierre prolongado del puente. Por esto, resulta usual tomar la decisión de no intervención de este elemento por las complicaciones y dificultades que esto conlleva y dejarlo más bien como elemento de sacrificio en caso de sismo intenso. Sin embargo, para garantizar un buen comportamiento y evitar daños

en otros componentes adyacentes del puente resulta usual llevar a cabo el mantenimiento y reconstrucción de las juntas si se considera necesario (Figura 8-12). Como elemento de sacrificio se debe prever su demolición y reemplazo luego de la ocurrencia de un evento sísmico importante. En este punto una opción es la reconstrucción del espaldar y la ampliación de la junta que hay contra el tablero, sin embargo, si esta es muy grande tiende a ser complicada de mantener.

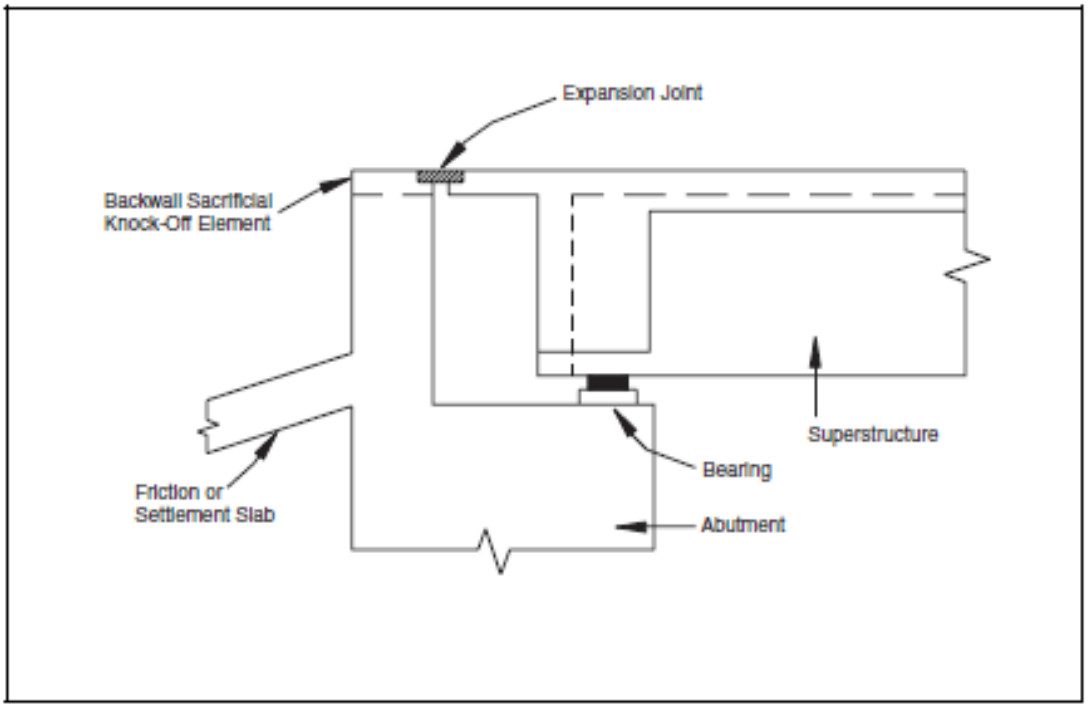


Figura 8-12. Espaldar de estribo (FHWA, 2006)

8.2.3.6 Cimentación

Generalmente el diseño de la cimentación de los puentes en Bogotá está controlado por las cargas gravitacionales. Debido a que los suelos en la mayor parte de la ciudad son bastante blandos, estas tienden a ser cimentaciones profundas bastante rígidas y resistentes. Por esta razón, es de esperarse que las cimentaciones no fallen estructuralmente ante un evento sísmico en el cual por lo general no está actuando la totalidad de la carga viva de diseño. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta debe revisarse para las cargas máximas que puede desarrollar la subestructura, especialmente en el caso de realizar un reforzamiento en el cual se le mejore la capacidad a flexión. Si la cimentación actual no es capaz de resistir las nuevas cargas, es necesario realizar el reforzamiento de la misma. Generalmente este proceso consiste en ampliar el dado de cimentación con el fin de incluir pilotes adicionales (Figura 8-13). Debe tenerse especial cuidado con el anclaje de la nueva porción de cimentación con el fin de garantizar un buen comportamiento integrado.

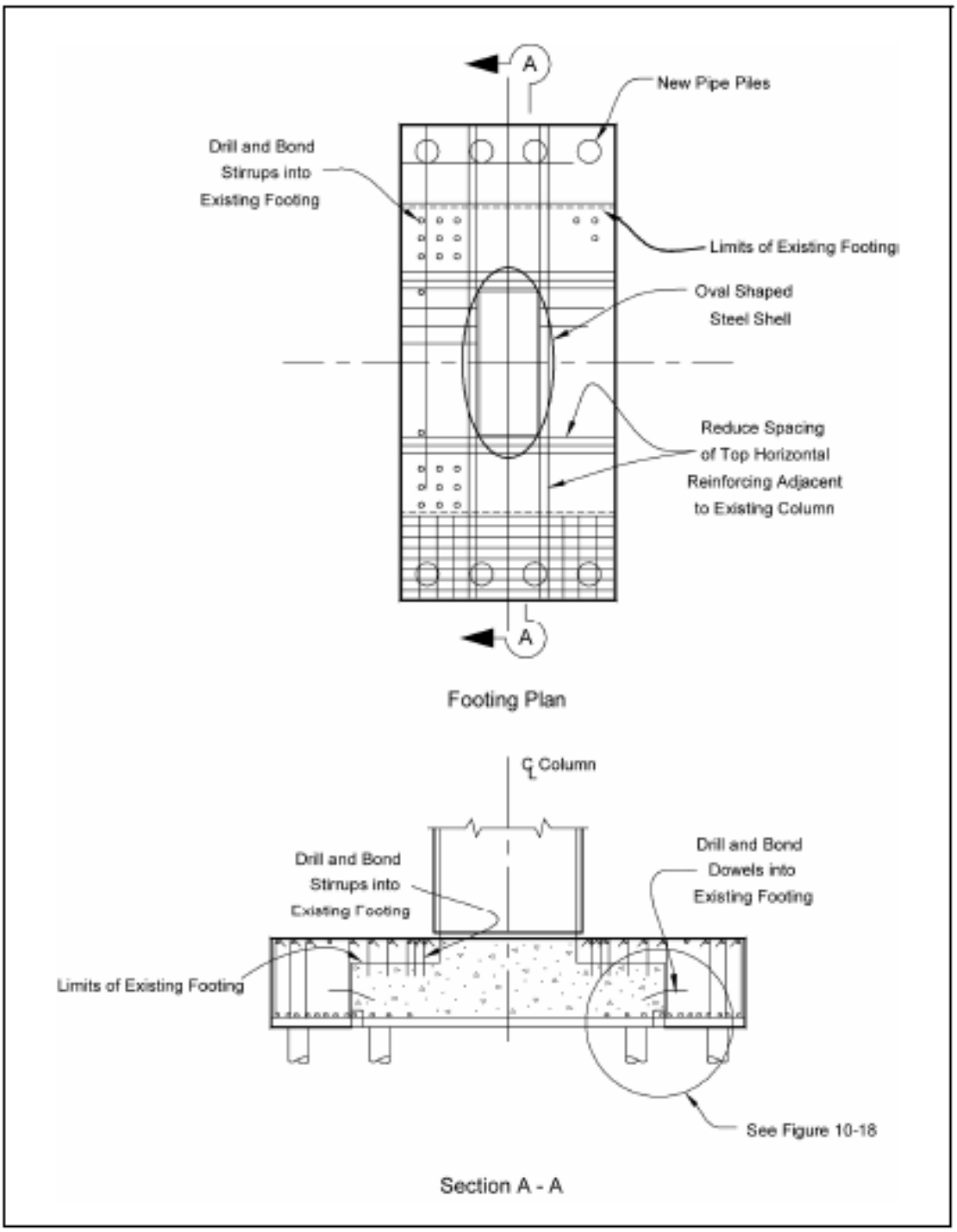


Figura 8-13. Reforzamiento cimentación (FHWA, 2006)

8.2.3.7 Otros componentes

Existen otra serie de componentes que hacen parte del puente pero que no deberían verse afectados en gran medida en un evento sísmico debido a que no forman parte del sistema de resistencia sísmica. Sin embargo, por condiciones de servicio normales, estos componentes podrían sufrir daño o estar muy deteriorados por falta de mantenimiento. A continuación, se presentan algunas medidas de reforzamiento de estos componentes. Estas no serán tenidas en cuenta en el esquema de reforzamiento típico propuesto ya que las mejoras realizadas en estos elementos no afectan en general el comportamiento sísmico esperado del puente ni el cálculo de su vulnerabilidad sísmica.

- Fortalecimiento del diafragma
- Instalación de diagonales y riostras en acero en superestructura
- Fortalecimiento de vigas cabezales mediante cables de pre-esfuerzo
- Reforzamiento en vigas simplemente apoyadas mediante cables de tensionamiento

8.2.4 Presupuestos preliminares de opciones de reforzamiento

Teniendo en cuenta las diferentes medidas de intervención presentadas, se plantean una serie de esquemas de intervención típicos para los componentes susceptibles a daño, aplicable a cualquiera de las tipologías del portafolio. En la Tabla 8-2 se presentan las medidas que se adoptan para efectos del presente análisis, teniendo en cuenta las prácticas comunes de intervención de puentes en nuestro medio. Las medidas se evalúan mediante precios unitarios que permitan su posterior aplicación a cada puente acorde con sus dimensiones y características. En cada uno de los casos se lleva a cabo un análisis de precios unitarios APU, los cuales utilizan valores representativos de mano de obra, maquinaria, equipo y herramientas de nuestro medio y se basan en rendimientos usuales para este tipo de obras. En el Anexo A-10 se incluye el análisis de precios unitarios que justifican los valores indicados en la Tabla 8-2, los cuales fueron tomados de la base de precios de referencia IDU-I-2018 suministrada por la Entidad.

Tabla 8-2. Medidas típicas de intervención por componente susceptible a daño y valor unitario

Componente	Medida adoptada	Unidad de medida	Valor unitario (COP $)
Columnas	Enchaquetado con concreto reforzado	m3	1,891,379
Pantalla	Enchaquetado con concreto reforzado	m3	2,129,082
Ancho de silla	Extensión en el ancho de silla - ménsulas	Vigas	1,764,359
Llaves de cortante	Construcción de llaves de cortante externas	Unidad	1,945,772
Neoprenos	Reemplazo de neoprenos por nuevo equivalentes	Vigas	4,547,944

Dentro de las medidas de reforzamiento no se incluye ninguna para el componente “espaldar de estribo”. Como se explicó anteriormente, el daño en el espaldar del estribo no es catastrófico y generalmente se deja como un elemento de sacrificio para ser reparado ante la ocurrencia de un evento sísmico. En las medidas propuestas tampoco se incluyen intervenciones en la cimentaciones o suelos, aspectos que se salen del alcance de esta evaluación simplificada.

8.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA EL PORTAFOLIO INTERVENIDO

8.3.1 Costo de las intervenciones

Con el fin de entender el alcance de una intervención integral del portafolio se plantea un esquema de intervenciones que permita corregir las principales deficiencias de cada una de las tipologías constructivas. A cada uno de los puentes de la base de datos se le asocian las intervenciones que permiten reducir de manera significativa su vulnerabilidad. Posteriormente, se realiza la evaluación de cantidades y costos de obra, con base en las características geométricas y dimensionales de cada puente (es decir, teniendo en cuenta el número de luces, el ancho del tablero, el número de columnas, la altura del puente, el número de neoprenos, etc.). En la Tabla 8-3 y Tabla 8-4 se resumen las medidas que se aplican a cada una de las tipologías de puentes de la base de datos, considerando además el nivel de diseño que corresponde, que como se explicó anteriormente se considera en tres niveles: Alto, Medio y Bajo. El nivel Alto no requeriría en general intervención, mientras que el nivel Bajo requerirá en general el mayor grado de intervención.

De acuerdo con esta asignación es posible valorar la intervención total en cada una de las tipologías de puentes una vez se consideran la geometría y características dimensionales de los mismos. En la Tabla 8-5 y Tabla 8-6 se resumen los costos de intervención resultantes para la totalidad del portafolio.

En la Figura 8-14 y Figura 8-15 se presentan esta información en formato de barras. Las figuras presentan tanto el valor absoluto de intervenciones en cada tipología como el valor relativo con respecto al área construida en planta de los puentes de cada subgrupo.

(Espacio en blanco intencional)

Tabla 8-3. Medidas de intervención vehiculares

			Medida de Intervención				
Uso	**Tipología**	**Nivel de diseño**	**Columna Enchaq. Concreto**	**Pantalla Enchaq. Concreto**	**Ancho Silla**	**Tope Sísmico**	**Reemplazo de Neoprenos**
Vehiculares	VMH_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VMH_2	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VMH_3	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VMH_4	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo		✓	✓	✓	✓
	VNI_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VNI_2	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VNI_3	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VNI_4	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo		✓	✓	✓	✓
	VNH_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VNH_2	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VNH_3	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	VNH_4	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo		✓	✓	✓	✓
	VBC_1	Alto					
		Medio					
		Bajo					
	VLS_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo			✓	✓	✓
	VAA_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo			✓	✓	✓
	VAC_1	Alto					
		Medio					
		Bajo					
	VVA_1	Alto					
		Medio					
		Bajo					

Tabla 8-4. Medidas de intervención peatonales

			Medida de Intervención				
Uso	**Tipología**	**Nivel de diseño**	**Columna Enchaq. Concreto**	**Pantalla Enchaq. Concreto**	**Ancho Silla**	**Tope Sísmico**	**Reemplazo de Neoprenos**
Peatonales	PMH_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PMH_3	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PNI_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PNI_3	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PNH_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PNH_2	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PNH_3	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PNH_4	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo		✓	✓	✓	✓
	PBC_1	Alto					
		Medio					
		Bajo					
	PLS_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo			✓	✓	✓
	PPB_1	Alto					
		Medio					
		Bajo					
	PAT_1	Alto					
		Medio			✓	✓	✓
		Bajo	✓		✓	✓	✓
	PAC_1	Alto					
		Medio					
		Bajo					
	PVA_1	Alto					
		Medio					
		Bajo					

Tabla 8-5. Resumen costos de intervención puentes vehiculares

Uso	Tipología	Nivel de diseño	Número total de puentes	Área construida total (m^2)	Valoración total de la intervención propuesta (COP$)	Valor por m^2 promedio de intervención (COP$ /m^2)
Vehiculares	VMH_1	Alto	5	10292.60	$ -	$ -
		Medio	4	6028.42	$ 93,128,825	$ 15,448
		Bajo	2	1481.92	$ 549,252,473	$ 370,636
	VMH_2	Alto	4	11367.15	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	1	144.90	$ 102,028,274	$ 704,142
	VMH_3	Alto	13	43225.42	$ -	$ -
		Medio	4	6408.05	$ 269,242,079	$ 42,016
		Bajo	2	12079.37	$ 591,250,721	$ 48,947
	VMH_4	Alto	4	4399.57	$ -	$ -
		Medio	1	398.40	$ 14,476,544	$ 36,337
		Bajo	2	1624.62	$ 847,502,100	$ 521,661
	VNI_1	Alto	3	10861.91	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	1	5712.00	$ 3,621,113,434	$ 633,948
	VNI_2	Alto	7	14348.03	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	1	2502.50	$ 2,735,323,325	$ 1,093,036
	VNI_3	Alto	20	76612.04	$ -	$ -
		Medio	8	36172.44	$ 5,340,792,215	$ 147,648
		Bajo	18	46510.81	$ 15,759,194,515	$ 338,829
	VNI_4	Alto	3	3812.00	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	2	3544.19	$ 1,802,329,707	$ 508,531
	VNH_1	Alto	14	39607.31	$ -	$ -
		Medio	1	3013.48	$ 120,402,113	$ 39,954
		Bajo	4	9732.66	$ 1,586,371,799	$ 162,995
	VNH_2	Alto	7	23916.64	$ -	$ -
		Medio	1	2564.01	$ 158,741,428	$ 61,911
		Bajo	3	14333.66	$ 1,501,127,942	$ 104,727
	VNH_3	Alto	12	27071.48	$ -	$ -
		Medio	2	13065.46	$ 323,536,459	$ 24,763
		Bajo	0	0.00	$ -	$ -
	VNH_4	Alto	1	530.46	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	0	0.00	$ -	$ -
	VBC_1	Alto	0	0.00	$ -	$ -
		Medio	16	3456.83	$ -	$ -
		Bajo	166	67120.95	$ -	$ -
	VLS_1	Alto	48	13737.71	$ -	$ -
		Medio	32	9822.86	$ 2,400,864,173	$ 244,416
		Bajo	136	24546.83	$ 8,447,253,123	$ 344,128
	VAA_1	Alto	2	1471.75	$ -	$ -
		Medio	1	329.92	$ 34,856,616	$ 105,652
		Bajo	0	0.00	$ -	$ -
	VAC_1	Alto	0	0.00	$ -	$ -
		Medio	1	158.21	$ -	$ -
		Bajo	2	323.52	$ -	$ -
Subtotal			**554**	**552,330.08**	**$ 46,298,787,866**	**$ 83,824**

Tabla 8-6. Resumen costos de intervención puentes peatonales

Uso	Tipología	Nivel de diseño	Número total de puentes	Área construida total (m2)	Valoración total de la intervención propuesta COL$	Valor por m2 promedio de intervención COL$ /m2
Peatonales	PMH_1	Alto	7	778.39	$ -	$ -
		Medio	3	532.35	$ 65,543,568	$ 123,122
		Bajo	1	63.15	$ 22,748,974	$ 360,263
	PMH_3	Alto	2	10426.21	$ -	$ -
		Medio	4	574.93	$ 121,058,190	$ 210,561
		Bajo	0	0.00	$ -	$ -
	PNI_1	Alto	18	2909.60	$ -	$ -
		Medio	10	1827.61	$ 684,645,836	$ 374,612
		Bajo	15	2658.76	$ 1,554,952,271	$ 584,842
	PNI_3	Alto	5	866.34	$ -	$ -
		Medio	2	169.37	$ 81,109,646	$ 478,896
		Bajo	4	596.07	$ 638,831,549	$ 1,071,748
	PNH_1	Alto	14	4337.71	$ -	$ -
		Medio	5	1661.45	$ 351,930,395	$ 211,822
		Bajo	1	127.68	$ 59,455,437	$ 465,660
	PNH_2	Alto	2	603.08	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	0	0.00	$ -	$ -
	PNH_3	Alto	12	1937.53	$ -	$ -
		Medio	2	280.70	$ 144,773,274	$ 515,758
		Bajo	5	497.30	$ 608,101,717	$ 1,222,814
	PNH_4	Alto	1	32.94	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	1	29.34	$ 79,021,131	$ 2,693,290
	PBC_1	Alto	0	0.00	$ -	$ -
		Medio	2	98.40	$ -	$ -
		Bajo	14	3370.17	$ -	$ -
	PLS_1	Alto	74	4318.86	$ -	$ -
		Medio	19	965.52	$ 528,505,904	$ 547,378
		Bajo	58	2090.27	$ 1,618,047,884	$ 774,087
	PPB_1	Alto	0	0.00	$ -	$ -
		Medio	112	29421.90	$ -	$ -
		Bajo	0	0.00	$ -	$ -
	PAT_1	Alto	8	2633.90	$ -	$ -
		Medio	1	288.12	$ 24,127,573	$ 83,741
		Bajo	1	66.60	$ 29,047,180	$ 436,146
	PAC_1	Alto	0	0.00	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	1	4.96	$ -	$ -
	PAA_1	Alto	0	0.00	$ -	$ -
		Medio	0	0.00	$ -	$ -
		Bajo	1	28.60	$ 148,691,169	$ 5,198,992
Subtotal			**405**	**74197.79**	**$ 6,760,591,699**	**$ 91,116**

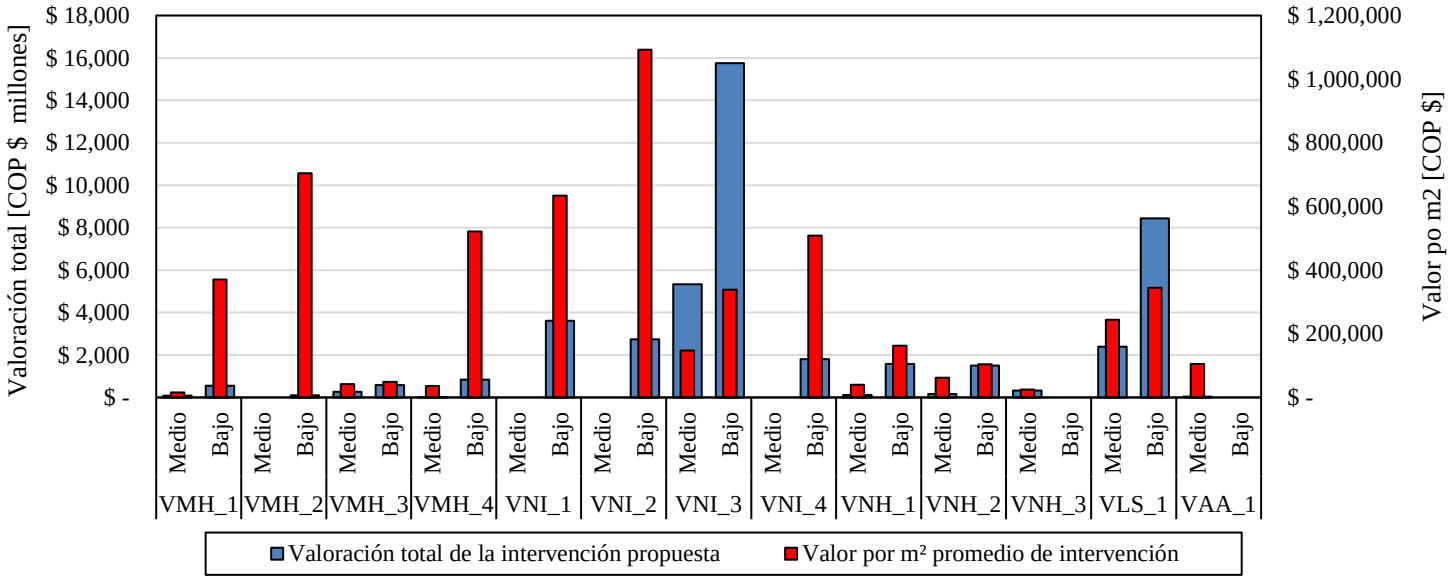


Figura 8-14. Resumen costos de intervención puentes vehiculares

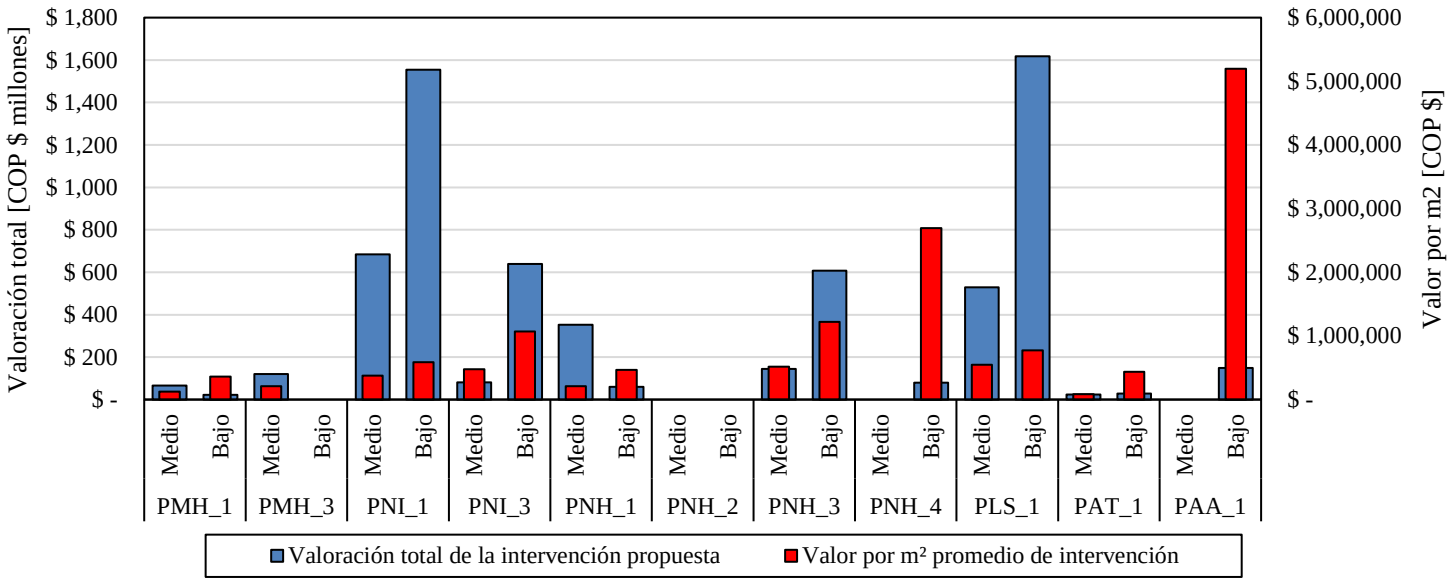


Figura 8-15. Resumen costos de intervención puentes peatonales

8.3.2 Reducción de la vulnerabilidad

Los puentes reforzados con la estrategia planteada presentarán una reducción significativa de la vulnerabilidad. Para cada una de las tipologías se lleva a cabo la obtención de una nueva función en el estado intervenido siguiendo para este efecto la misma metodología planteada en el Capítulo 6. En la Figura 8-16 se presentan las funciones de vulnerabilidad en las condiciones actuales y luego de la intervención de cada una de las tipologías. En color rojo y azul se muestran las curvas de los niveles de diseño bajo y medio y en verde el estado reforzado, el cual corresponde a un nivel de diseño alto.

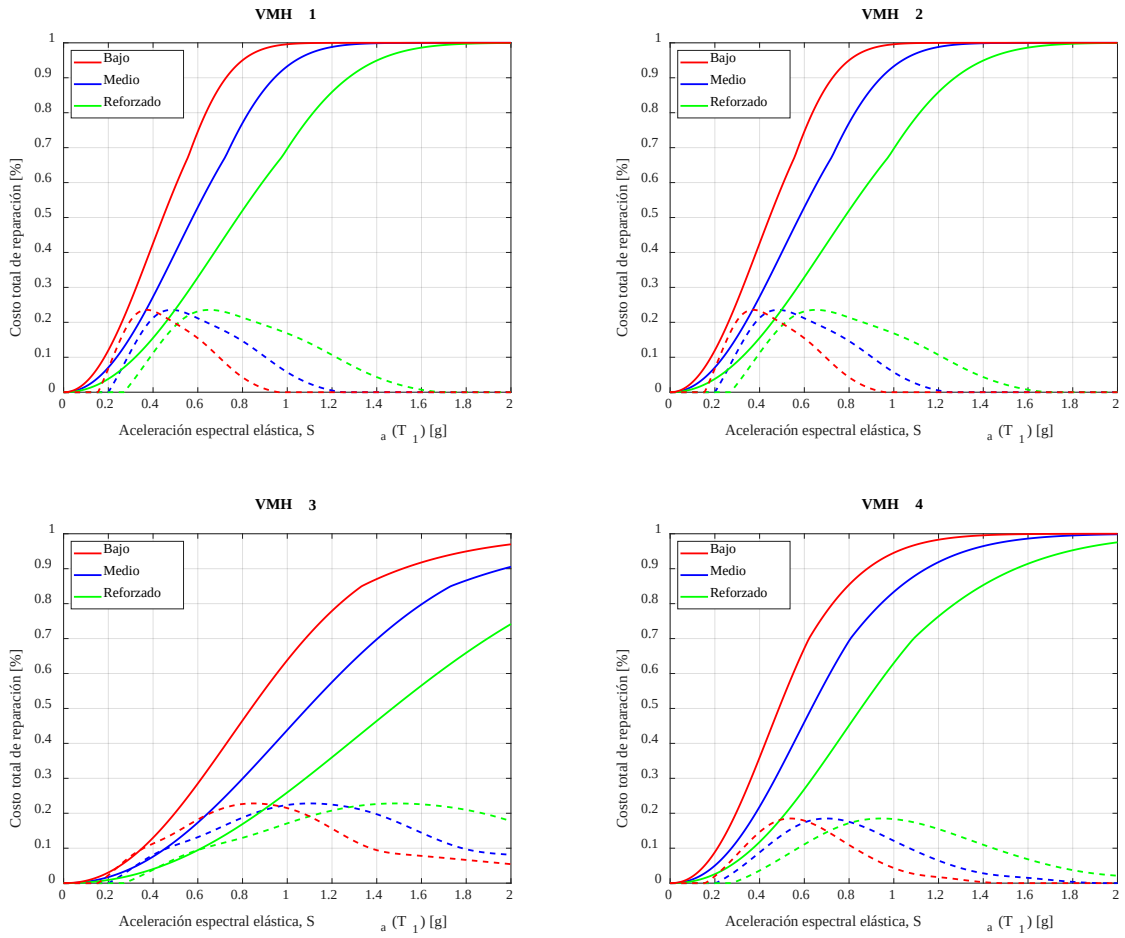


Figura 8-16. Funciones de vulnerabilidad representativas de las tipologías de puentes dominantes en el estado actual y en el intervenido

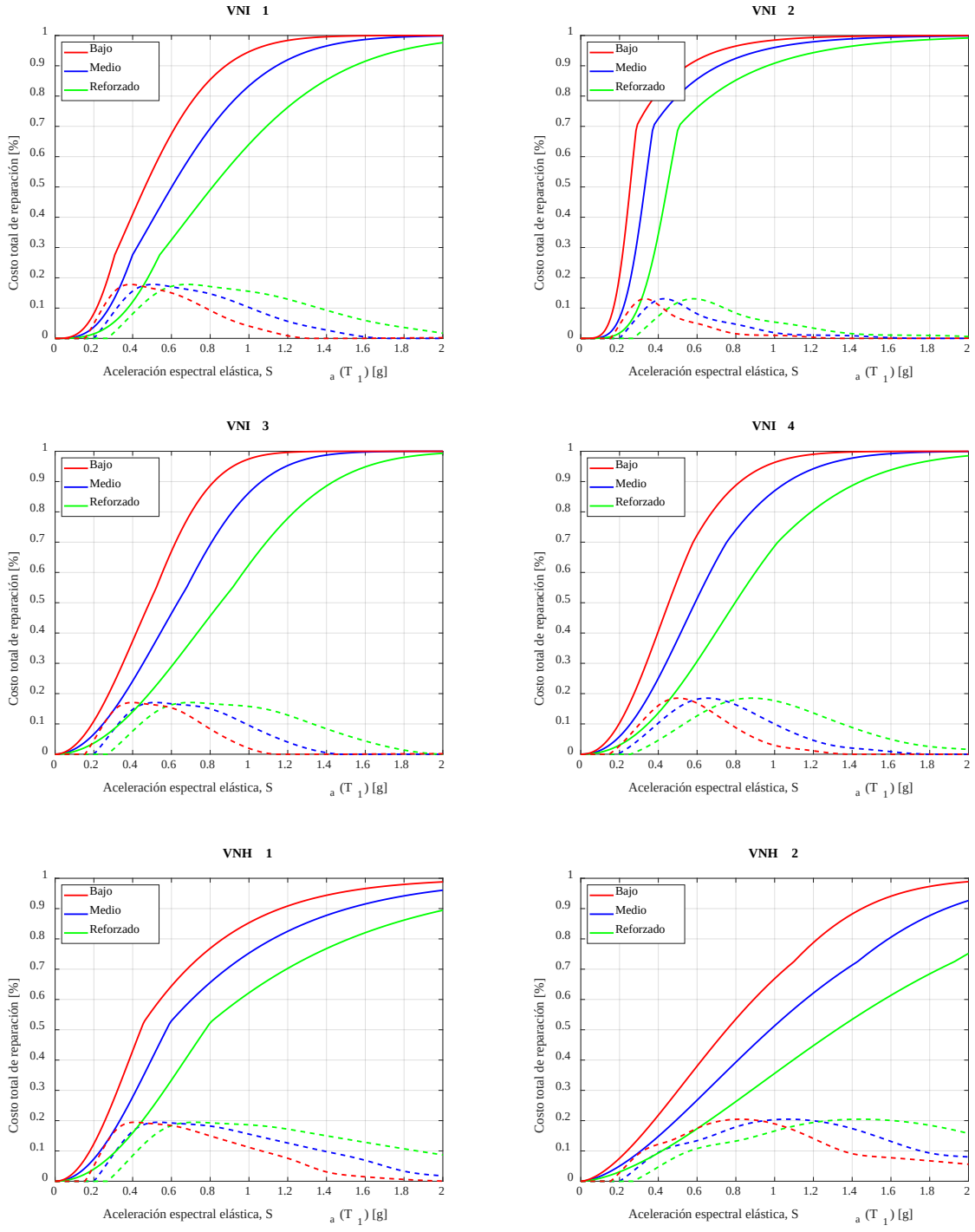


Figura 8.16. Funciones de vulnerabilidad representativas de las tipologías de puentes dominantes en el estado actual y en el intervenido (cont.)

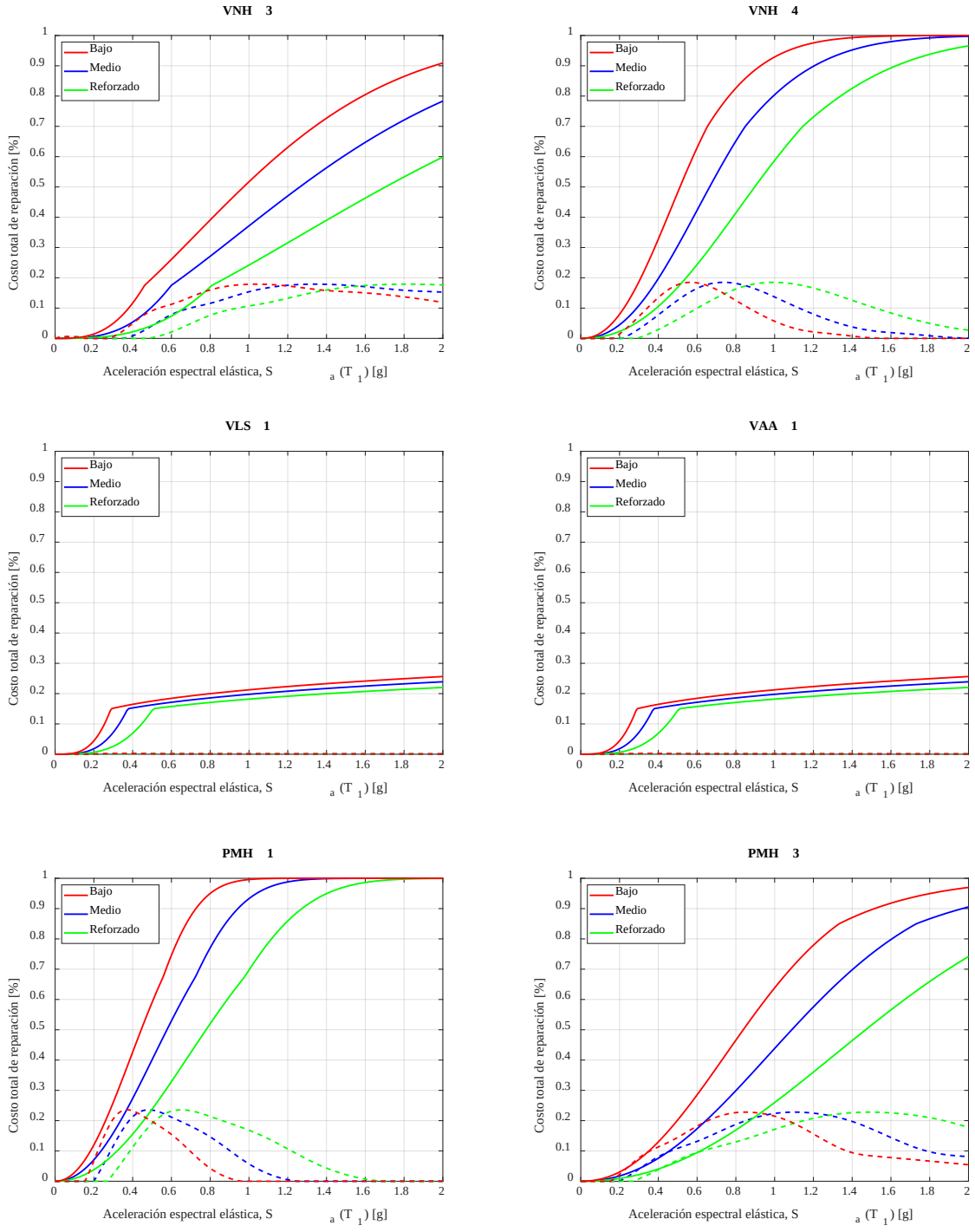


Figura 8.16. Funciones de vulnerabilidad representativas de las tipologías de puentes dominantes en el estado actual y en el intervenido (cont.)

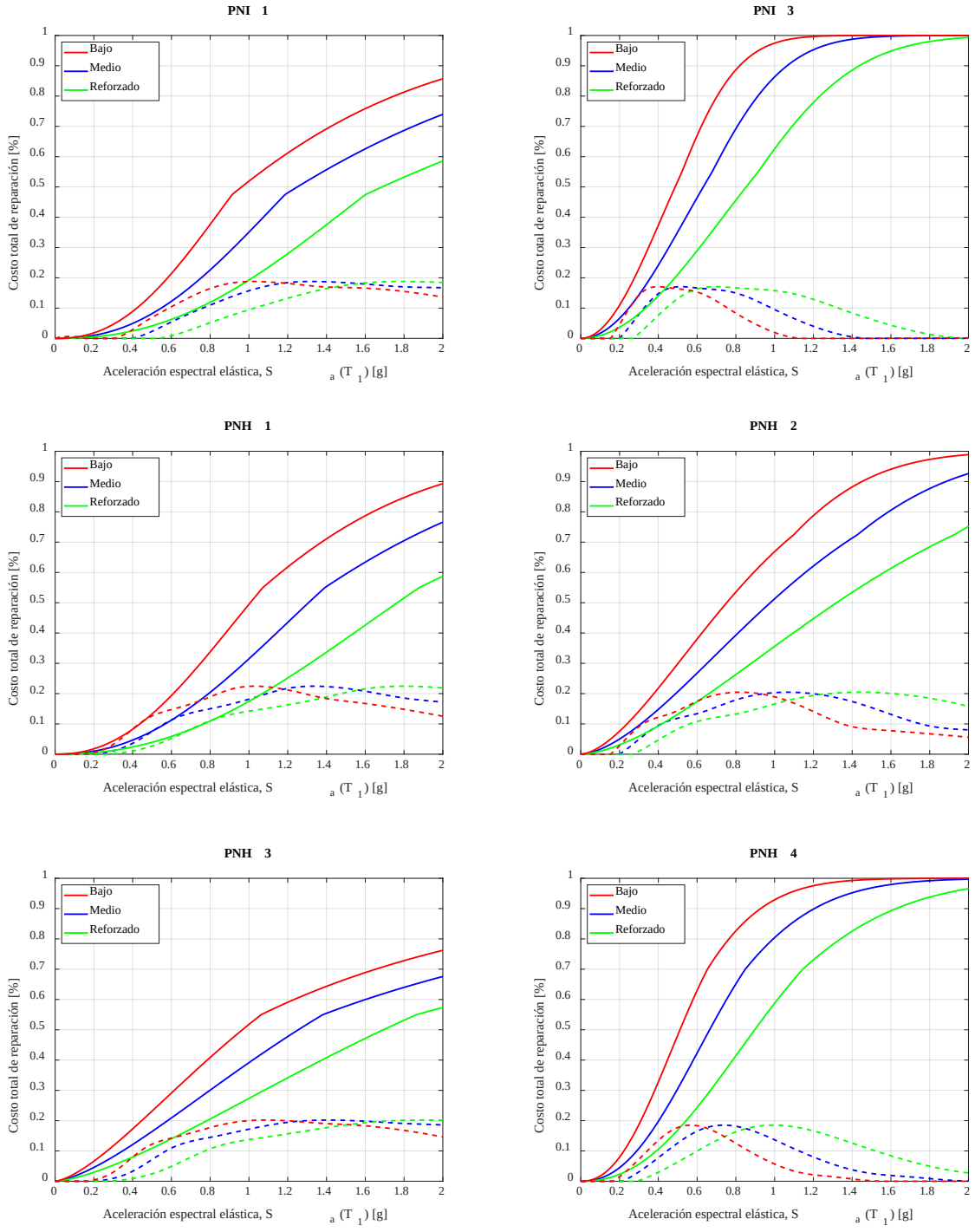


Figura 8.16. Funciones de vulnerabilidad representativas de las tipologías de puentes dominantes en el estado actual y en el intervenido (cont.)

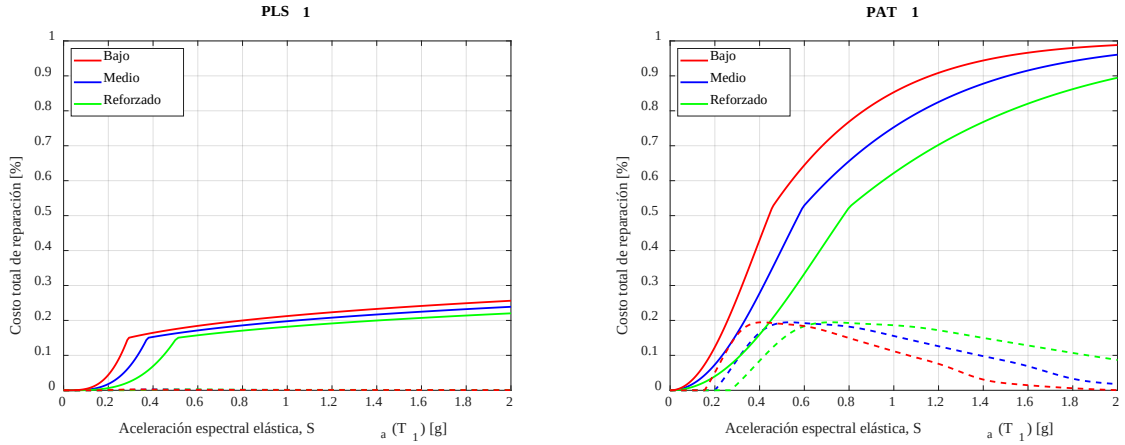


Figura 8.16. Funciones de vulnerabilidad representativas de las tipologías de puentes dominantes en el estado actual y en el intervenido (cont.)

8.3.3 Riesgo del portafolio intervenido

Con base en las nuevas condiciones de vulnerabilidad se lleva a cabo la nueva evaluación del riesgo siguiendo la misma metodología explicada en el Capítulo 7 de este informe. Como se indicó anteriormente, el análisis solo incluye la estimación de las pérdidas directas. La Figura 8-17 presenta la curva de pérdida máxima probable para el portafolio completo de puentes de la ciudad en el estado intervenido en comparación con el estado actual del mismo. Se observa de la figura que por ejemplo para un periodo de retorno de 1000 años se lograría con las intervenciones propuestas una reducción del riesgo sísmico de casi el 35 % al pasar de un PMP de COP$731,842 millones a COP$495,084 millones.

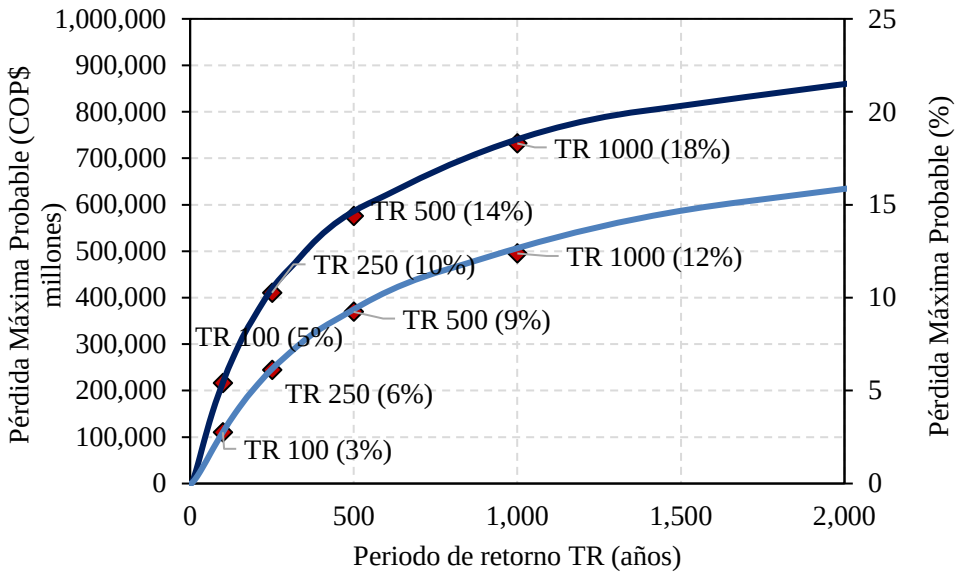


Figura 8-17. Pérdida máxima probable portafolio completo

Por otro lado, la Tabla 8-7 presenta el resumen de la pérdida anual esperada en millones de pesos y la pérdida anual esperada al millar, así como las pérdidas máximas probables para algunos periodos de retorno representativos en el estado intervenido en comparación con el estado actual.

Tabla 8-7. Pérdida anual esperada y pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno

	Estado Actual		**Estado Intervenido**	
	Valor		**Valor**	
Valor total expuesto (COP$ Millones)	4,010,802		4,010,802	
PAE (COP$ Millones)	9,240		4,917	
PAE (‰)	2.30		1.23	
PMP				
TR	**COP $ millones**	**%**	**COP $ millones**	**%**
100	216,164	5.39	110,398	2.75
250	410,451	10.23	244,024	6.08
500	575,673	14.35	369,398	9.21
1000	731,842	18.25	495,084	12.34

El anterior análisis demuestra la efectividad de un plan integral de mitigación del riesgo mediante obras de ingeniería que generen una reducción de la vulnerabilidad en las tipologías de puentes.

8.4 PROGRAMAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

Para la implementación práctica de las medidas de mitigación resulta conveniente plantear programas que permitan optimizar los recursos financieros, adelantar varias actividades de manera simultánea y lograr dividir los trabajos en diferentes temáticas de especialización. Los programas planteados comprenden la realización de obras para el reforzamiento y/o rigidización de los puentes que presenten deficiencias específicas en su concepción estructural básica y en algunos casos específicos la sustitución de las estructuras que presentan alto potencial de colapso o daño en caso de ocurrencia de un sismo, con el fin de reducir la vulnerabilidad sísmica del portafolio de puentes del Distrito.

De acuerdo con esto se plantean los siguientes programas de intervención para el portafolio de puentes:

- Programa No. 1: *Intervención de puentes vehiculares:* este programa pretende reducir el riesgo de puentes vehiculares con susceptibilidad media a sufrir daños debido a que presentan algunas deficiencias localizadas que pueden solucionarse. Con las intervenciones propuestas los puentes cumplirían los requisitos básicos de seguridad y funcionalidad de la normativa sismo resistente.

- Programa No. 2: *Intervención de puentes peatonales:* Este programa pretende intervenir los puentes peatonales con susceptibilidad media a sufrir daños debido a que presentan algunas deficiencias localizadas que pueden solucionarse.

- Programa No. 3: *Demolición y sustitución de puentes vehiculares*: este programa se plantea con el fin de sustituir los puentes vehiculares de alto potencial de colapso no susceptibles de intervención debido a problemas de funcionalidad o a deficiencias significativas en la conceptualización estructural o en el estado del mismo. En este programa se incluyen los puentes vehiculares tipo vernacular/artesanal identificados dentro del inventario de puentes de la Entidad.

- Programa No. 4: *Demolición y sustitución de puentes peatonales*: este programa se plantea con el fin de sustituir los puentes peatonales de alto potencial de colapso no susceptibles de intervención debido a problemas de funcionalidad o a deficiencias significativas en la conceptualización estructural o en el estado del mismo. En este programa se incluyen los puentes peatonales tipo vernacular/artesanal identificados dentro del inventario de puentes de la Entidad.

La Tabla 8-8 resume el número de puentes en cada programa, el valor de reposición de todos los puentes en cada programa y el costo total de intervención de los dos primeros programas. El costo de los programas de sustitución no se incluye ya que no es posible estimar de manera apropiada el valor de la sustitución sin un estudio detallado sobre las necesidades del nuevo puente.

Tabla 8-8. Puentes por programa de intervención

Programa de Intervención	Descripción del Programa	Número de puentes en cada programa	Valoración total estimado de reposición en este grupo de puentes (COP $ Millones)	Costo total estimado de intervención de cada programa (COP $ Millones)
1	Intervención de puentes vehiculares	213	$ 1,286,300	$ 42,665
2	Intervención de puentes peatonales	125	$ 111,691	$ 6,550
3	Demolición y sustitución de puentes vehiculares	19	$ 20,802	$ -
4	Demolición y sustitución de puentes peatonales	18	$ 4,841	$ -
TOTAL		**375**	**$ 1,423,634**	**$ 49,215**

8.5 INDICADORES DE BENEFICIOS, EFICIENCIA Y COSTOS

8.5.1 Indicadores beneficio – costo por tipologías de puentes

Las relaciones beneficio-costo de las intervenciones propuestas para cada una de las tipologías de puentes son indicadores robustos de la efectividad de una medida determinada en la reducción del riesgo del

portafolio. Las relaciones beneficio costo (*B/C*) para cada puente o grupo tipológico de puentes se calculan con la siguiente ecuación (Yamin, et. al, 2013):

$$B/C = \frac{\left(PAE_i\% - PAE_f\%\right) * \ Valor\ de\ Reposición}{Costo\ Reforzamiento * i}$$

En la cual PAE_i es la pérdida anual esperada en el estado actual, PAE_f es la pérdida anual esperada en el estado intervenido o futuro, i es la tasa de descuento anual que se toma igual a 0.12 (12% anual) para el presente análisis. Relaciones B/C superiores a 1.0 indican que los beneficios logrados en la reducción del riesgo, o sea en los futuros costos de reparación debidos a la frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos de diferentes intensidades, son superiores a la inversión inicial planteada según el costo de la medida de reforzamiento.

La reducción de la pérdida anual esperada debido a la medida de mitigación se evalúa teniendo en cuenta únicamente las pérdidas directas. La eventual consideración de las pérdidas indirectas trae complicaciones que requieren análisis económicos de detalle para su evaluación. Solo como referencia, la consideración de las pérdidas indirectas adicionalmente a las directas generaría relaciones B/C significativamente más altas que las indicadas a continuación.

En la Tabla 8-9 y Tabla 8-10 se presenta el resumen de las relaciones B/C para pérdidas directas de cada uno de los grupos tipológicos de puentes de acuerdo con las medidas de intervención propuestas. En la Figura 8-18 y la Figura 8-19 se resumen dichos resultados en forma de box plot o cajas y bigotes para los puentes vehiculares y para los peatonales respectivamente. En las gráficas tipo box plot la línea roja sólida representa la mediana de los datos, los cajones azules representan los datos dentro del primer y el tercer cuartil, las cruces rojas los datos que están fuera de 1.5 veces los cuartiles enunciados. Esta es una representación estadística de datos muy utilizada ya que permite analizar los datos tal y como son sin realizarles ningún procesamiento. Esta información indicativa se utiliza más adelante para plantear los programas de intervención más convenientes y efectivos.

(Espacio en banco intencional)

Tabla 8-9. Relaciones B/C puentes vehiculares

Uso	Tipología	Nivel de diseño	Número total de puentes	Valoración total de reposición (COP$ millones)	PAE actual (COP$ millones)	PAE intervenido (COP$ millones)	Valoración total de la intervención (COP$ millones)	B/C
Vehiculares	VMH_1	Medio	4	$ 27,013.14	$ 117.14	$ 41.27	$ 93.13	6.79
		Bajo	2	$ 7,582.16	$ 22.93	$ 10.39	$ 549.25	0.19
	VMH_2	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 757.08	$ 2.03	$ 0.99	$ 102.03	0.08
	VMH_3	Medio	4	$ 31,205.07	$ 40.66	$ 17.35	$ 269.24	0.72
		Bajo	2	$ 87,901.67	$ 50.58	$ 24.81	$ 591.25	0.36
	VMH_4	Medio	1	$ 2,191.20	$ 8.36	$ 5.13	$ 14.48	1.86
		Bajo	2	$ 8,935.42	$ 36.33	$ 14.60	$ 847.50	0.21
	VNI_1	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 55,614.33	$ 502.92	$ 101.25	$ 3,621.11	0.92
	VNI_2	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 7,243.64	$ 46.45	$ 13.91	$ 2,735.32	0.10
	VNI_3	Medio	8	$ 284,661.36	$ 1,075.20	$ 574.31	$ 5,340.79	0.78
		Bajo	18	$ 306,125.48	$ 1,702.17	$ 688.76	$ 15,759.19	0.54
	VNI_4	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	2	$ 20,621.44	$ 79.54	$ 18.58	$ 1,802.33	0.28
	VNH_1	Medio	1	$ 13,210.71	$ 36.97	$ 29.47	$ 120.40	0.52
		Bajo	4	$ 37,901.41	$ 192.98	$ 97.86	$ 1,586.37	0.50
	VNH_2	Medio	1	$ 20,646.88	$ 41.96	$ 32.02	$ 158.74	0.52
		Bajo	3	$ 75,344.10	$ 159.53	$ 79.81	$ 1,501.13	0.44
	VNH_3	Medio	2	$ 82,248.22	$ 152.32	$ 26.86	$ 323.54	3.23
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	VNH_4	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	VBC_1	Medio	16	$ 16,363.22	$ 0.05	$ 0.01	$ -	0.00
		Bajo	166	$ 322,990.73	$ 2.38	$ 0.12	$ -	0.00
	VLS_1	Medio	32	$ 61,018.32	$ 96.87	$ 46.96	$ 2,400.86	0.17
		Bajo	136	$ 174,311.75	$ 246.77	$ 99.20	$ 8,447.25	0.15
	VAA_1	Medio	1	$ 2,013.80	$ 0.53	$ 0.31	$ 34.86	0.05
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	VAC_1	Medio	1	$ 870.14	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	2	$ 1,779.38	$ 0.02	$ 0.00	$ -	0.00
	VVA_1	Medio	7	$ 1,393.09	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00

Tabla 8-10. Relaciones B/C puentes peatonales

Uso	Tipología	Nivel de diseño	Número total de puentes	Valoración total de reposición (COP$ millones)	PAE actual (COP$ millones)	PAE intervenido (COP$ millones)	Valoración total de la intervención (COP$ millones)	B/C
Peatonales	PMH_1	Medio	3	$ 3,098.86	$ 7.38	$ 4.73	$ 65.54	0.34
		Bajo	1	$ 349.30	$ 0.41	$ 0.28	$ 22.75	0.05
	PMH_3	Medio	4	$ 2,999.62	$ 2.61	$ 1.67	$ 121.06	0.06
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PNI_1	Medio	10	$ 10,475.17	$ 6.53	$ 3.49	$ 684.65	0.04
		Bajo	15	$ 16,404.18	$ 14.89	$ 5.48	$ 1,554.95	0.05
	PNI_3	Medio	2	$ 1,964.62	$ 4.69	$ 2.56	$ 81.11	0.22
		Bajo	4	$ 4,605.58	$ 20.18	$ 7.62	$ 638.83	0.16
	PNH_1	Medio	5	$ 9,797.78	$ 7.09	$ 2.97	$ 351.93	0.10
		Bajo	1	$ 653.94	$ 0.60	$ 0.22	$ 59.46	0.05
	PNH_2	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PNH_3	Medio	2	$ 3,493.15	$ 9.45	$ 4.60	$ 144.77	0.28
		Bajo	5	$ 7,009.98	$ 8.15	$ 4.43	$ 608.10	0.05
	PNH_4	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 387.79	$ 1.28	$ 0.52	$ 79.02	0.08
	PBC_1	Medio	2	$ 535.51	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	14	$ 15,377.82	$ 0.14	$ 0.01	$ -	0.00
	PLS_1	Medio	19	$ 11,451.86	$ 12.96	$ 6.68	$ 528.51	0.10
		Bajo	58	$ 37,598.72	$ 59.83	$ 23.26	$ 1,618.05	0.19
	PPB_1	Medio	112	$ 293,122.49	$ 3.76	$ 3.76	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PAT_1	Medio	1	$ 1,325.83	$ 5.56	$ 3.24	$ 24.13	0.80
		Bajo	1	$ 1,536.41	$ 0.96	$ 0.31	$ 29.05	0.19
	PAC_1	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 14.89	$ 0.00	$ -	$ -	0.00
	PVA_1	Medio	10	$ 312.37	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PAA_1	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 2,240.51	$ 4.18	$ 1.61	$ 148.69	0.14

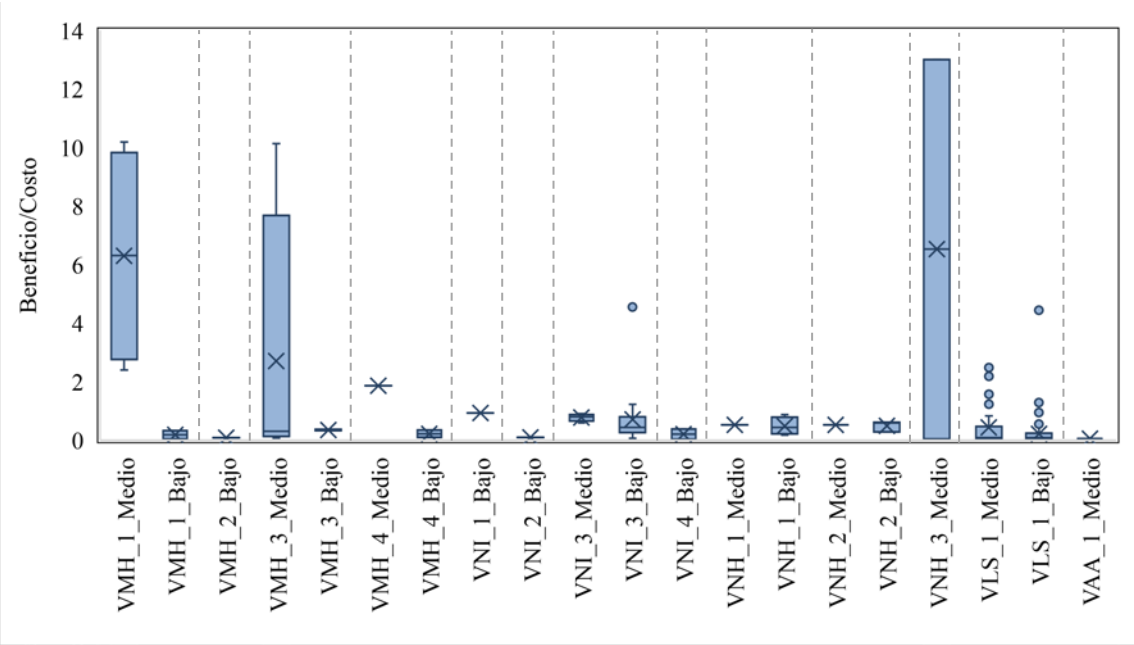


Figura 8-18. Relaciones B/C (beneficio/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Vehiculares

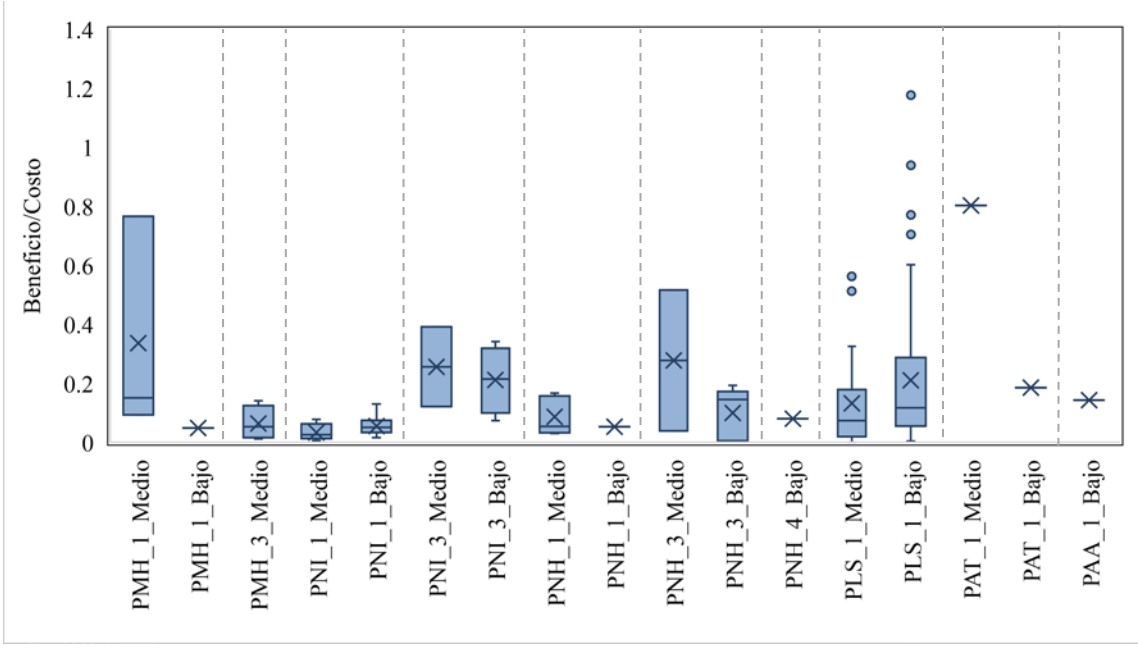


Figura 8-19. Relaciones B/C (beneficio/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Peatonales

Resultado del análisis anterior se pueden obtener las siguientes conclusiones parciales:

a) Las tipologías vehiculares cuya intervención generan las mejores relaciones B/C medias son VMH_1, VMH_4 y VNH_3. Sin embargo, es posible observar como en casi todas las tipologías hay casos particulares con relaciones B/C mucho mayores a la media de la tipología.

b) Las tipologías vehiculares cuya intervención generan las peores relaciones B/C medias son VAA_1, VMH_2, VNI_2.

c) Es posible observar como para una misma tipología, dependiendo del nivel de diseño, la relación media de B/C puede ser muy distinta, como por ejemplo en VMH_1 y VMH_4.

d) Para los puentes peatonales en general se tienen relaciones B/C menores que para los puentes vehiculares. Esto se debe a que el valor de reposición de un puente peatonal es mucho menor al de un puente vehicular, haciendo que la relación con respecto al costo de reforzamiento sea menor. Sin embargo, como se muestra en la gráfica, se logra obtener una relación cercana a 1 para la tipología PAT_1.

8.5.2 Indicadores de eficiencia – costo para priorización de intervenciones

Las relaciones beneficio-costo (*B/C*) presentan una medida robusta de la efectividad de la inversión en términos económicos con respecto a la reducción esperada en costos de reparación debido a la ocurrencia de eventos sísmicos futuros. Sin embargo, esta medida no tiene en cuenta la importancia relativa del puente, aspecto que, conjuntamente con la relación B/C, debe orientar la priorización en las inversiones, para maximizar los beneficios no solo en relación a las pérdidas directas sino también las indirectas. La importancia del puente se puede medir de diferentes maneras incluyendo el tipo de vía en que se encuentra (red arterial vital, red arterial no vital, red intermedia y local, red rural), o el tamaño del puente (por ejemplo, medido con el ancho o el área). Para efectos del presente estudio se asigna a cada puente un grado de importancia relativo (*I*) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I = \frac{Ai}{Amax}$$

El valor de *Ai* corresponde al ancho en planta de cada puente y el *Amax* es el ancho máximo del mayor puente de la base de datos para los puentes vehiculares. Para los puentes peatonales *Ai* corresponde al área en planta de cada puente y el *Amax* es el área máxima del mayor puente de la base de datos para los puentes peatonales. Según esto se plantea el siguiente indicador de Eficiencia/Costo *(E/C)* de cada puente o grupo tipológico para efectos de priorización de intervenciones:

$$E/C = \frac{\left(PAE_i - PAE_f\right) * I}{Costo\ Reforzamiento * i}$$

En este caso los valores de PAE se expresan en valores absolutos, de manera que la relación *E/C* expresa la eficiencia de la medida de intervención propuesta considerando además el tamaño del puente. Para un grupo tipológico definido el indicador se calcula como la sumatoria de los numeradores de todos los puentes del grupo, dividido por la sumatoria de los denominadores respectivo.

La Tabla 8-11 y la Tabla 8-12 resume los resultados de la eficiencia esperada en cada uno de los grupos tipológicos de puentes, de acuerdo con las medidas de intervención propuestas. En la Figura 8-20 y la Figura 8-21 se resumen dichos resultados en forma de barras para los puentes vehiculares y para los peatonales respectivamente. Esta información indicativa se utiliza para efectos de priorización en las intervenciones.

Tabla 8-11. Relaciones E/C puentes vehiculares

Uso	Tipología	Nivel de diseño	Número total de puentes	Valoración total de reposición (COP$ millones)	PAE actual (COP$ millones)	PAE intervenido (COP$ millones)	Valoración total de la intervención (COP$ millones)	E/C
Vehiculares	VMH_1	Medio	4	$ 27,013.14	$ 117.14	$ 41.27	$ 93.13	11.65
		Bajo	2	$ 7,582.16	$ 22.93	$ 10.39	$ 549.25	0.29
	VMH_2	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 757.08	$ 2.03	$ 0.99	$ 102.03	0.03
	VMH_3	Medio	4	$ 31,205.07	$ 40.66	$ 17.35	$ 269.24	2.31
		Bajo	2	$ 87,901.67	$ 50.58	$ 24.81	$ 591.25	2.66
	VMH_4	Medio	1	$ 2,191.20	$ 8.36	$ 5.13	$ 14.48	7.74
		Bajo	2	$ 8,935.42	$ 36.33	$ 14.60	$ 847.50	0.44
	VNI_1	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 55,614.33	$ 502.92	$ 101.25	$ 3,621.11	4.62
	VNI_2	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 7,243.64	$ 46.45	$ 13.91	$ 2,735.32	0.33
	VNI_3	Medio	8	$ 284,661.36	$ 1,075.20	$ 574.31	$ 5,340.79	3.59
		Bajo	18	$ 306,125.48	$ 1,702.17	$ 688.76	$ 15,759.19	2.04
	VNI_4	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	2	$ 20,621.44	$ 79.54	$ 18.58	$ 1,802.33	0.69
	VNH_1	Medio	1	$ 13,210.71	$ 36.97	$ 29.47	$ 120.40	1.30
		Bajo	4	$ 37,901.41	$ 192.98	$ 97.86	$ 1,586.37	0.90
	VNH_2	Medio	1	$ 20,646.88	$ 41.96	$ 32.02	$ 158.74	1.30
		Bajo	3	$ 75,344.10	$ 159.53	$ 79.81	$ 1,501.13	1.41
	VNH_3	Medio	2	$ 82,248.22	$ 152.32	$ 26.86	$ 323.54	3.30
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	VNH_4	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	VBC_1	Medio	16	$ 16,363.22	$ 0.05	$ 0.01	$ -	0.00
		Bajo	166	$ 322,990.73	$ 2.38	$ 0.12	$ -	0.00
	VLS_1	Medio	32	$ 61,018.32	$ 96.87	$ 46.96	$ 2,400.86	0.34
		Bajo	136	$ 174,311.75	$ 246.77	$ 99.20	$ 8,447.25	0.21
	VAA_1	Medio	1	$ 2,013.80	$ 0.53	$ 0.31	$ 34.86	0.02
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	VAC_1	Medio	1	$ 870.14	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	2	$ 1,779.38	$ 0.02	$ 0.00	$ -	0.00
	VVA_1	Medio	7	$ 1,393.09	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00

Tabla 8-12. Relaciones E/C puentes peatonales

Uso	Tipología	Nivel de diseño	Número total de puentes	Valoración total de reposición (COP$ millones)	PAE actual (COP$ millones)	PAE intervenido (COP$ millones)	Valoración total de la intervención (COP$ millones)	E/C
Peatonales	PMH_1	Medio	3	$ 3,098.86	$ 7.38	$ 4.73	$ 65.54	0.08
		Bajo	1	$ 349.30	$ 0.41	$ 0.28	$ 22.75	0.00
	PMH_3	Medio	4	$ 2,999.62	$ 2.61	$ 1.67	$ 121.06	0.01
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PNI_1	Medio	10	$ 10,475.17	$ 6.53	$ 3.49	$ 684.65	0.01
		Bajo	15	$ 16,404.18	$ 14.89	$ 5.48	$ 1,554.95	0.01
	PNI_3	Medio	2	$ 1,964.62	$ 4.69	$ 2.56	$ 81.11	0.02
		Bajo	4	$ 4,605.58	$ 20.18	$ 7.62	$ 638.83	0.03
	PNH_1	Medio	5	$ 9,797.78	$ 7.09	$ 2.97	$ 351.93	0.05
		Bajo	1	$ 653.94	$ 0.60	$ 0.22	$ 59.46	0.01
	PNH_2	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PNH_3	Medio	2	$ 3,493.15	$ 9.45	$ 4.60	$ 144.77	0.05
		Bajo	5	$ 7,009.98	$ 8.15	$ 4.43	$ 608.10	0.01
	PNH_4	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 387.79	$ 1.28	$ 0.52	$ 79.02	0.00
	PBC_1	Medio	2	$ 535.51	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	14	$ 15,377.82	$ 0.14	$ 0.01	$ -	0.00
	PLS_1	Medio	19	$ 11,451.86	$ 12.96	$ 6.68	$ 528.51	0.00
		Bajo	58	$ 37,598.72	$ 59.83	$ 23.26	$ 1,618.05	0.00
	PPB_1	Medio	112	$ 293,122.49	$ 3.76	$ 3.76	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PAT_1	Medio	1	$ 1,325.83	$ 5.56	$ 3.24	$ 24.13	0.11
		Bajo	1	$ 1,536.41	$ 0.96	$ 0.31	$ 29.05	0.00
	PAC_1	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 14.89	$ 0.00	$ -	$ -	0.00
	PVA_1	Medio	10	$ 312.37	$ 0.00	$ 0.00	$ -	0.00
		Bajo	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
	PAA_1	Medio	0	$ -	$ -	$ -	$ -	0.00
		Bajo	1	$ 2,240.51	$ 4.18	$ 1.61	$ 148.69	0.00

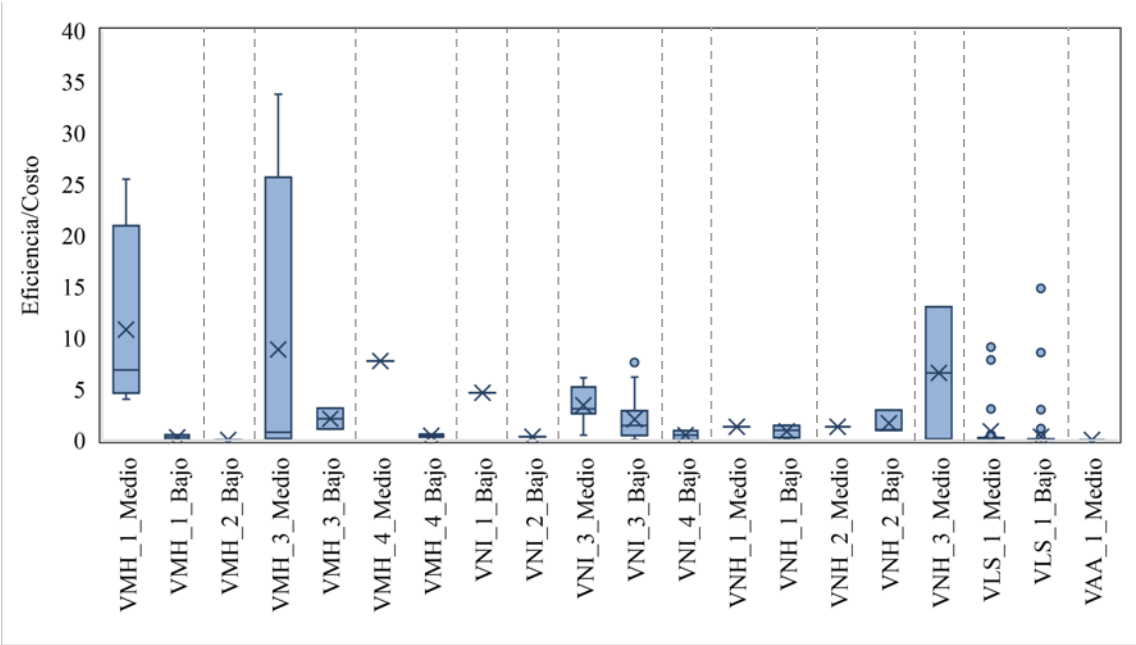


Figura 8-20. Relaciones E/C (eficiencia/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Vehiculares

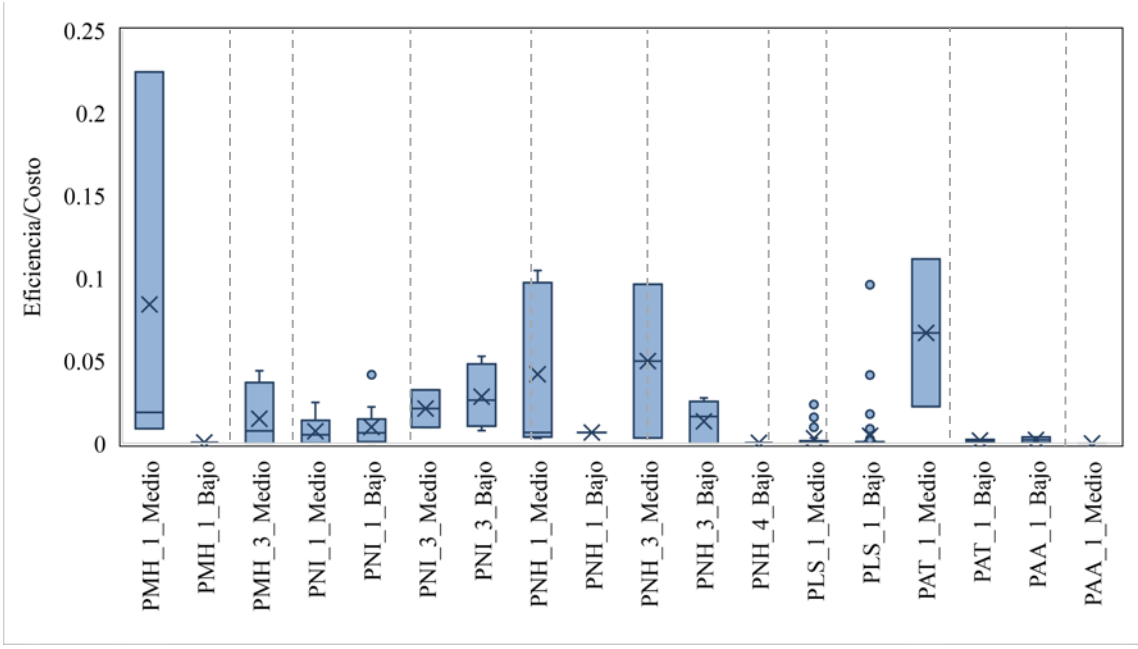


Figura 8-21. Relaciones E/C (eficiencia/costo) para las intervenciones propuestas en puentes Peatonales

8.5.3 Priorización de puentes por programa

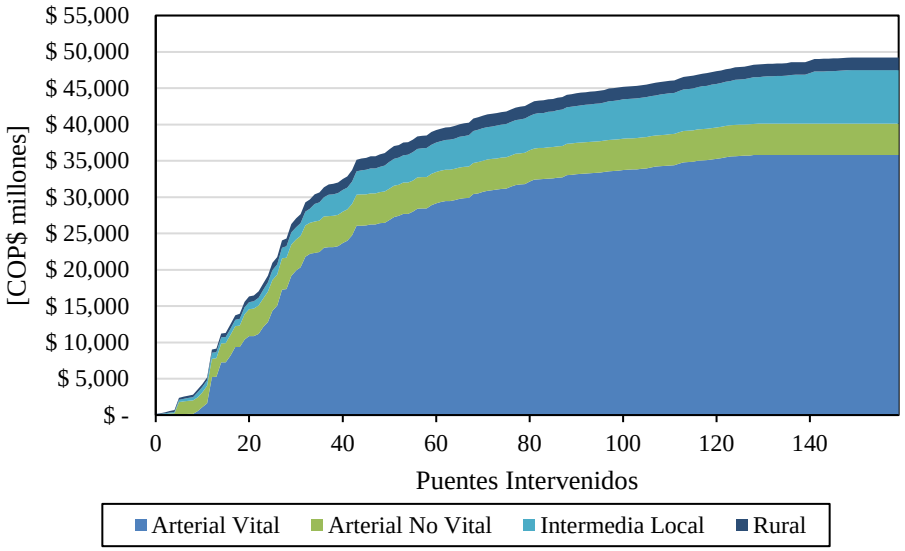
Como criterio de priorización se establece la siguiente secuencia de prioridades:

- Malla vial: Arterial Vital, Arterial No Vital, Intermedia y Local, Rural.
- Indicador Eficiencia/Costo: de mayor a menor.
- Estado Estructural: del peor al mejor.
- Clasificación del estado de servicio de cada puente mediante el indicador TES: de menor a mayor.

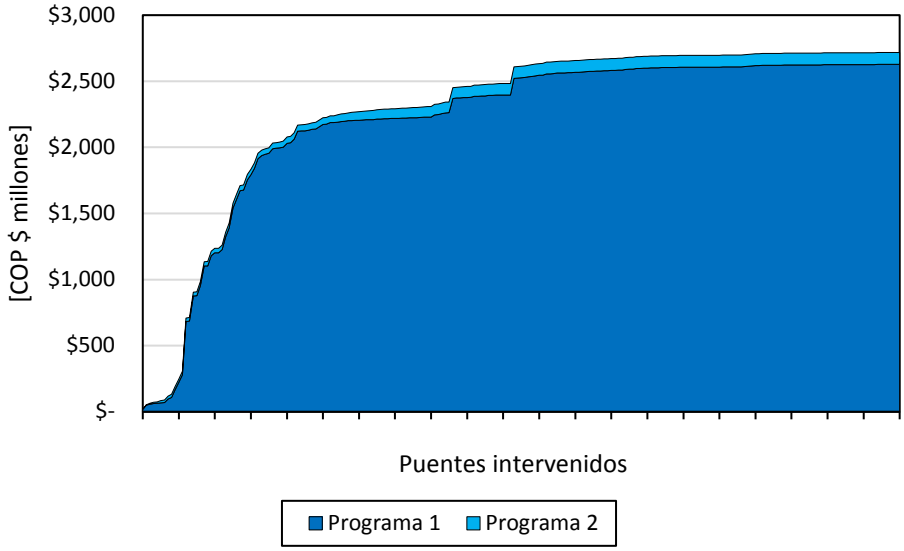
El proceso de priorización siguiendo la secuencia anteriormente descrita consiste en organizar los puentes de acuerdo con la malla vial a la que pertenecen. Posteriormente se organizan de acuerdo con el indicador E/C, de manera que dos puentes que pertenecieran a la misma malla vial, quedarán ordenados en función de este indicador. Posteriormente se organizan de acuerdo con el estado estructural, de manera que dos puentes de la misma malla vial y con el mismo indicador E/C, pero con diferente estado estructural quedarán ordenados de acuerdo con este criterio. Finalmente, se organizan de acuerdo con la clasificación de estado de servicio por medio del indicador TES de cada puente. Con esta priorización se organizan de mayor a menor los puentes de la ciudad y se van totalizando diferentes indicadores acumulados. Adicionalmente se agrupan de acuerdo con los programas planteados en el numeral 8.4. La Figura 8-22 presenta dos gráficas representativas en las que se indican los siguientes parámetros acumulados en orden de prioridad:

- El costo total de intervención acumulada y priorizada
- Los ahorros acumulados en PAE absoluta (PAE_i-PAE_f) por programa

(Espacio en blanco intencional)



a) Costo total de la intervención acumulada por malla vial



b) Ahorros acumulados por programa de intervención

Figura 8-22. Indicadores de costos y beneficios acumulados y priorizados

Las figuras anteriores permiten plantear las bases para llevar a cabo la implementación de los programas de mitigación del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad. Por ejemplo, considerando una disponibilidad presupuestal determinada se pueden seleccionar el número aproximado de puentes prioritarios a intervenir en cada uno de los programas planteados. Una vez se cuente con un número aproximado de puentes de cada programa, se pueden evaluar la reducción neta en la pérdida anual que puede esperarse y expresarse por ejemplo como un porcentaje de la PAE total actual del portafolio. Es importante resaltar que los programas definidos en este capítulo comprenden la realización de obras para el reforzamiento y/o rigidización de los

puentes que presenten deficiencias específicas en su concepción estructural básica, con el fin de reducir la vulnerabilidad sísmica del portafolio de puentes del Distrito. La priorización definida para estos programas tiene en cuenta los resultados de la inspección básica de puentes presentada en el Capítulo 4 como criterio de priorización, pero estas intervenciones no comprenden las acciones requeridas en los planes de conservación y mantenimiento de la infraestructura del Distrito que se exponen en dicho capítulo.

De la Figura 8-22 (b) es importante resaltar que se incluyen únicamente los dos primeros programas, porque como ya se mencionó, no es posible estimar de manera apropiada el valor de la sustitución de los puentes que deben ser reemplazados. El área diferencial de cada curva muestra el impacto individual de cada programa respecto del otro. Como el programa 2 cuenta con un número menor de puentes que el programa 1, se puede observar como al llegar al número total de estos (125), el ahorro acumulado se mantiene constante para este programa.

A manera de ejemplo y dado un valor presupuestal disponible, se propone el siguiente plan de inversión tentativo para la ciudad:

- Valor estimado de inversión en mitigación del riesgo: COP$35,000 Millones
- Número de puentes a intervenir en cada programa:
  - Programa No. 1: 81
  - Programa No. 2: 34
- Reducción en la PAE del portafolio: COP$2,270 Millones
- Reducción de la PAE como porcentaje de la PAE en el estado actual: 49%

Las figuras anteriores permiten plantear este o cualquier otro programa de mitigación del riesgo en función de los recursos monetarios disponibles y de las prioridades o políticas que desea plantear el IDU. Simultáneamente los indicadores anteriores se convierten en indicadores de gestión para medir el avance y establecer metas para los programas de mitigación del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad.

Con el fin de facilitar la consulta de información y la definición de criterios alternos de priorización se incluye como anexo digital al presente informe, la base de datos de puentes de la ciudad conjuntamente con todos los indicadores anteriores (ver Anexo A-3).

Una vez establecido el indicador que permite priorizar las intervenciones, es posible seleccionar los puentes específicos que podrían conformar un programa de intervención determinado. A manera de ejemplo, desde la Tabla 8-13 hasta la Tabla 8-16 se incluyen los 10 primeros puentes que harían parte de cada uno de los programas propuestos. En el Anexo A-10 se presenta un archivo de priorización con los 375 puentes priorizados en cada uno de los programas propuestos.

Tabla 8-13. Priorización puentes programa 1

Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
1	24124658		VMH_3	- Construcción de topes sísmicos - Reforzamiento de columnas
2	24119246		VMH_1	- Construcción de ménsulas en estribos - Reemplazo de neoprenos en estribos - Construcción de topes sísmicos en estribos
3	22158274		VLS_1	- Construcción de ménsulas en estribos - Reemplazo de neoprenos en estribos - Construcción de topes sísmicos en estribos
4	22151656		VLS_1	- Construcción de ménsulas en estribos - Reemplazo de neoprenos en estribos - Construcción de topes sísmicos en estribos
5	24119283		VLS_1	- Construcción de ménsulas en estribos - Reemplazo de neoprenos en estribos - Construcción de topes sísmicos en estribos

Tabla 8-13. Priorización puentes programa 1

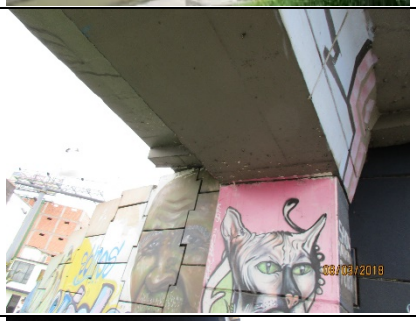
Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
6	24119332		VLS_1	- Construcción de ménsulas en estribos - Reemplazo de neoprenos en estribos - Construcción de topes sísmicos en estribos
7	24190046		VMH_4	- Construcción de topes sísmicos en estribos - Reforzamiento de muros
8	22154208		VMH_1	- Construcción de ménsulas en estribos - Reemplazo de neoprenos en estribos - Construcción de topes sísmicos en estribos
9	24119312		VMH_1	- Construcción de ménsulas en estribos - Reemplazo de neoprenos en estribos - Construcción de topes sísmicos en estribos
10	22143791		VNI_3	- Construcción de ménsulas - Reemplazo de neoprenos - Construcción de topes sísmicos - Reforzamiento de columnas

Tabla 8-14. Priorización puentes programa 2

Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
1	22146318		PMH_1	- Reforzamiento de columnas con daños - Reparaciones en elementos no estructurales
2	24124662		PNH_1	- Construcción de ménsulas en apoyos extremos - Reemplazo de neoprenos - Construcción de topes sísmicos
3	24119254		PNH_3	- Construcción de ménsulas - Reemplazo de neoprenos - Construcción de topes sísmicos
4	22160003		PLS_1	- Construcción de ménsulas - Reemplazo de neoprenos
5	22155587		PNH_1	- Construcción de ménsulas en apoyos extremos - Reemplazo de neoprenos - Construcción de topes sísmicos

Tabla 8-14. Priorización puentes programa 2

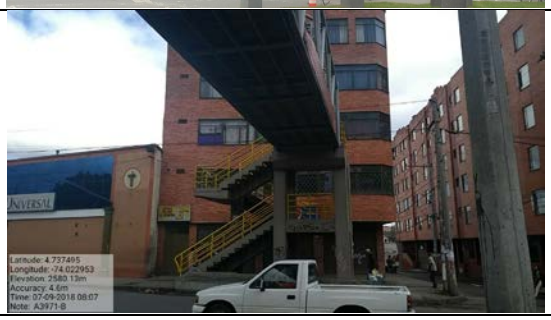
Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
6	22145792		PNI_3	- Construcción de ménsulas - Reemplazo de neoprenos - Construcción de topes sísmicos - Reforzamiento de columnas
7	22142138		PMH_3	- Reparaciones en tablero - Reparaciones en vigas - Reforzamiento de columnas con daños
8	22147412		PNI_1	- Construcción de ménsulas - Reemplazo de neoprenos - Construcción de topes sísmicos
9	22142292		PNI_3	- Construcción de ménsulas - Reemplazo de neoprenos - Reforzamiento de columnas
10	22144904		PNI_3	- Construcción de ménsulas - Reemplazo de neoprenos - Construcción de topes sísmicos

Tabla 8-15. Priorización puentes programa 3

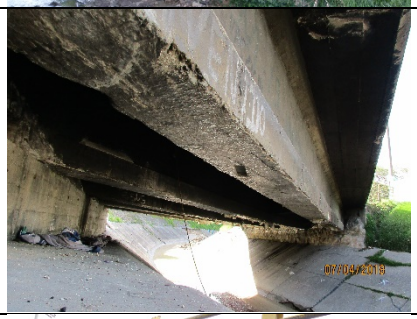
Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
1	22153290		VNI_3	- Demolición y reemplazo
2	22149126		VNI_2	- Demolición y reemplazo
3	24124630		VLS_1	- Demolición y reemplazo
4	24119301		VLS_1	- Demolición y reemplazo
5	24124631		VLS_1	- Demolición y reemplazo

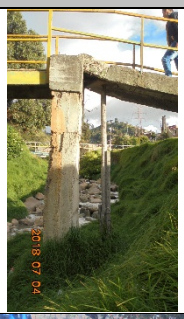
Tabla 8-15. Priorización puentes programa 3

Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
6	24124637		VLS_1	- Demolición y reemplazo
7	24124812		VLS_1	- Demolición y reemplazo
8	24189756		VLS_1	- Demolición y reemplazo
9	24124724		VLS_1	- Demolición y reemplazo
10	24119378		VVA_1	- Demolición y reemplazo

Tabla 8-16. Priorización puentes programa 4

Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
1	24190008		PLS_1	- Demolición y reemplazo
2	24124568		PLS_1	- Demolición y reemplazo
3	24124577		PLS_1	- Demolición y reemplazo
4	24124588		PLS_1	- Demolición y reemplazo
5	24119447		PLS_1	- Demolición y reemplazo

Tabla 8-16. Priorización puentes programa 4

Número de priorización	PKID	Foto	Tipología	Intervención propuesta
6	24124582		PLS_1	- Demolición y reemplazo
7	24124575		PLS_1	- Demolición y reemplazo
8	24119440		PLS_1	- Demolición y reemplazo
9	24119389		PLS_1	- Demolición y reemplazo
10	24124578		PVA_1	- Demolición y reemplazo

8.6 BASES PARA UN PLAN DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LOS PUENTES DE LA CIUDAD

8.6.1 Objetivos y prioridades generales del plan de mitigación del riesgo

La estrategia para la reducción del riesgo de la infraestructura de puentes del IDU se diseña para cumplir con los siguientes objetivos específicos y prioridades:

1. Reducir los eventuales daños e impactos en la infraestructura de puentes y en las instalaciones anexas en caso de sismo y proteger el patrimonio del Estado.
2. Reducir el riesgo de muerte o heridas a los usuarios de los puentes vehiculares y peatonales por eventos sísmicos.
3. Reducir la eventual interrupción de la funcionalidad urbana en caso de sismo o cualquier otro evento.

8.6.2 Programas de intervención propuestos

Los resultados encontrados anteriormente indican que para una adecuada intervención del portafolio es necesario considerar como prioritarios los siguientes programas de intervención:

- Programa No. 1: Intervención de puentes vehiculares: para aproximadamente 213 puentes con un costo total estimado de COP$42,665 millones.
- Programa No. 2: Intervención de puentes peatonales: para aproximadamente 125 puentes con un costo total estimado de COP$6,550 millones.
- Programa No. 3: Demolición y sustitución de puentes vehiculares: para aproximadamente 19 puentes. No se indica el valor de reposición dado que cada caso requerirá un nuevo dimensionamiento general.
- Programa No. 4: Demolición y sustitución de puentes peatonales: para aproximadamente 18 puentes. No se indica el valor de reposición dado que cada caso requerirá un nuevo dimensionamiento general.

Estas cifras se presentan de forma ilustrativa para dar una idea al Instituto del presupuesto que se requeriría para intervenir el sector en su totalidad. Como se indicó anteriormente, estos costos solo representan estimativos gruesos de costos de intervención valorados mediante precios unitarios y cantidades de obra considerando un gran número de intervenciones contratadas simultáneamente. No tienen en cuenta además costos indirectos, costos administrativos, de control y contratación, costos asociados a diseños, licencias y supervisión de obras, posibles ampliaciones o cambios en la geometría, trabajos complementarios de reparación o mantenimiento diferentes a las intervenciones indicativas propuestas, o trabajos adicionales que surjan como consecuencia de llevar a cabo dichas intervenciones. Tampoco incluye posibles variaciones en costos del mercado por ejemplo debidas la ocurrencia de un siniestro que genere escasez de recursos o sobre costos asociados a las condiciones de oferta y demanda.

De manera complementaria y con el fin de contar con un plan que se ajuste a la disponibilidad presupuestal del Instituto en cualquier momento, se presenta un esquema de priorización que permite seleccionar los puentes prioritarios para maximizar los beneficios de la inversión realizada en términos de reducción del riesgo. El costo de los programas de demolición y sustitución de puentes no se incluye ya que debe realizarse un estudio particular para cada caso, con el fin de que el nuevo puente se ajuste a las condiciones reales del lugar. Es importante resaltar que los programas definidos en este capítulo comprenden la realización de obras para el reforzamiento y/o rigidización de los puentes que presenten deficiencias específicas en su concepción estructural básica, con el fin de reducir la vulnerabilidad sísmica del portafolio de puentes del Distrito. La priorización definida para estos programas tiene en cuenta los resultados de la inspección básica de puentes presentada en el Capítulo 4 como criterio de priorización, pero estas intervenciones no comprenden las acciones requeridas en los planes de conservación y mantenimiento de la infraestructura del Distrito que se exponen en dicho capítulo.

8.6.3 Esquema de priorización de intervenciones

El esquema de priorización propuesto se basa en maximizar la eficiencia en las inversiones realizadas en mitigación del riesgo sísmico. Los parámetros utilizados para definir el orden de priorización son los siguientes (ver numeral 8.5.3):

- Malla vial
- Relación E/C
- Estado estructural
- Clasificación del estado de servicio mediante el indicador TES

La Figura 8-23 presenta los costos acumulados de inversión de los puentes priorizados en los diferentes programas.

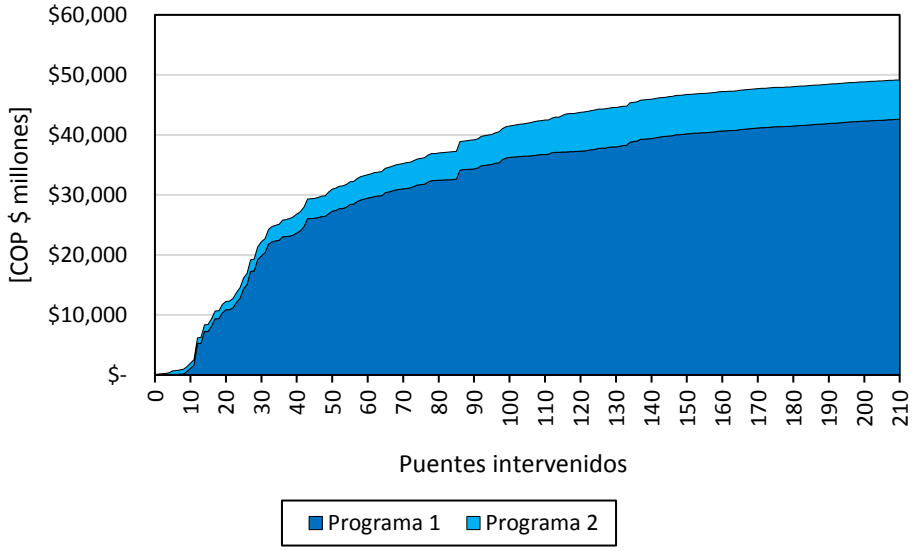


Figura 8-23. Costos acumulados de inversión por programa

8.6.4 Periodo de implementación y cronograma de actividades específicas para la implementación del plan

Para la implementación del Plan de Mitigación del riesgo sísmico del portafolio de puentes de la ciudad se proponen, de forma indicativa, las siguientes actividades junto con su duración aproximada, para una primera fase de los trabajos:

1. Aprobación del Plan por parte del Gobierno Local: 6 meses.
2. Definición del esquema de financiación del plan y recursos disponibles: 6 meses.
3. Elaboración de términos de referencia para contratación de acuerdo con los programas seleccionados y los recursos disponibles: 6 meses.
4. Contratación de las obras en cada uno de los programas: 6 meses.
5. Fase de ejecución de trabajos y controles: máximo 3 años.
6. Plan de monitoreo y mantenimiento: como mínimo 1 año después de terminada cada obra.

Naturalmente estas deberán ajustarse a las prioridades y estrategias que plantee el Gobierno Nacional. La ejecución de los trabajos por parte de los contratistas seleccionados para la ejecución de cada uno de los programas debe incluir las siguientes actividades:

1. Visita de inspección a los puentes a intervenir de acuerdo con una lista de priorización entregada por el Contratante.
2. Reconformación y ajuste de la información contenida en la base datos para cada uno de los puentes seleccionados y levantamiento de la información de detalle complementaria requerida.
3. Levantamiento de la información de detalle requerida en caso de que no esté disponible incluyendo estudio de suelos, diseño y detalles de la cimentación, detalles estructurales requeridos y otros.
4. Realización del estudio de vulnerabilidad sísmica de los puentes priorizados
5. Confirmación o ajuste del diagnóstico sobre la vulnerabilidad sísmica de los puentes de acuerdo con el criterio del presente estudio. Verificar la necesidad de las intervenciones propuestas según los componentes vulnerables.
6. Diseños de detalle de las intervenciones a realizar siguiendo para el efecto la norma o especificaciones establecidas.
7. Elaboración de presupuestos detallados de intervención con base en precios unitarios definidos y cantidades de obra estimadas en los diseños.
8. Revisión de los diseños y aprobación de intervenciones.
9. Fase de construcción de las intervenciones propuestas
10. Supervisión y control.
11. Entrega de obras

Los trabajos requieren una supervisión continua por parte de una firma consultora o Ingenieros Especialistas familiarizados con los conceptos presentados en este informe, en particular con temas relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes urbanos y diseño de medidas de mitigación.

De manera paralela a la realización de estas actividades de intervención estructural de los componentes de resistencia sísmica se deberá definir la posibilidad de llevar a cabo una o varias de las siguientes intervenciones complementarias, lo cual es usual que surjan en los procesos de intervención y reforzamiento y que requieren una consideración de imprevistos en todo contrato:

- Modificación o cambio de materiales y acabados en mal estado.
- Intervención para refuerzo o reemplazo de elementos y componentes no estructurales tales como espaldares, cimentación, vigas, columnas o cualquier otro componente del puente.
- Intervención para refuerzo o reemplazo de elementos y componentes estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica como por ejemplo las vigas o riostras, los estribos o cualquier otro componente.
- Modificaciones o ampliaciones en la geometría y tamaño del puente siguiendo criterios funcionales o de proyecciones de tráfico o planes futuros.

CAPITULO
9

9 ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN FINANCIERA

9.1 INTRODUCCIÓN

El Distrito Capital de Bogotá se encuentra localizado en una zona de amenaza sísmica media-alta de acuerdo con los resultados presentados previamente en este estudio. Así mismo, el portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá a cargo del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU presentan niveles de vulnerabilidad variables desde bajos hasta altos, dependiendo principalmente del sistema constructivo empleado en cada caso y en el año de construcción. Las condiciones de amenaza y vulnerabilidad hacen que las estructuras de los puentes de la ciudad presenten un alto nivel de riesgo relativo, lo que permite anticipar la eventual ocurrencia de impactos considerables en el sistema con altas pérdidas económicas, posible afectación a usuarios o transeúntes en las zonas de influencia de los puentes e impactos considerables en la movilidad urbana luego de la ocurrencia de un evento de consecuencias catastróficas. Esta situación evidencia la necesidad de implementar programas de gestión de riesgo que permitan tomar acciones antes, durante y después de la ocurrencia de un desastre, ya que experiencias pasadas han demostrado que para las entidades gubernamentales, tanto a nivel nacional como regional o local, es más costoso asumir las consecuencias de un desastre que anticiparse y adoptar medidas de mitigación del riesgo y protección financiera (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia, 2016).

Teniendo en cuenta la importancia de entender el nivel de riesgo y adoptar medidas que permitan su conocimiento y mitigación, Colombia expidió la Ley 1523 del 24 de abril de 2012 mediante la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres SNGRD. Esta ley establece que la gestión de riesgo es responsabilidad de todas las autoridades y habitantes del territorio colombiano, lo que refleja la importancia de establecer los componentes de la gestión de riesgo con el objetivo de establecer acciones que permitan dar cumplimiento a los requerimientos establecidos en la ley. La Figura 9-1, tomada de Yamin et al. (2013), presenta los principales componentes de la gestión de riesgo. El primer componente hace referencia a la identificación y evaluación del riesgo, la cual se realiza mediante la recopilación de información, estudios, mapas y otros que sirven como base para construir un modelo probabilista de riesgo que permita la estimación de las posibles pérdidas e impactos asociados a la ocurrencia de eventos naturales. Adicionalmente se pretende con este objetivo adelantar labores de divulgación de resultados a las entidades competentes y proveerles

información base que posteriormente puede ser utilizada para definición y priorización de obras de prevención y mitigación, definición de planes de ordenamiento territorial, planteamiento de opciones de protección financiera, elaboración de planes de emergencia y contingencia y planeación de procesos de reconstrucción, entre otras aplicaciones de la gestión del riesgo de desastre.

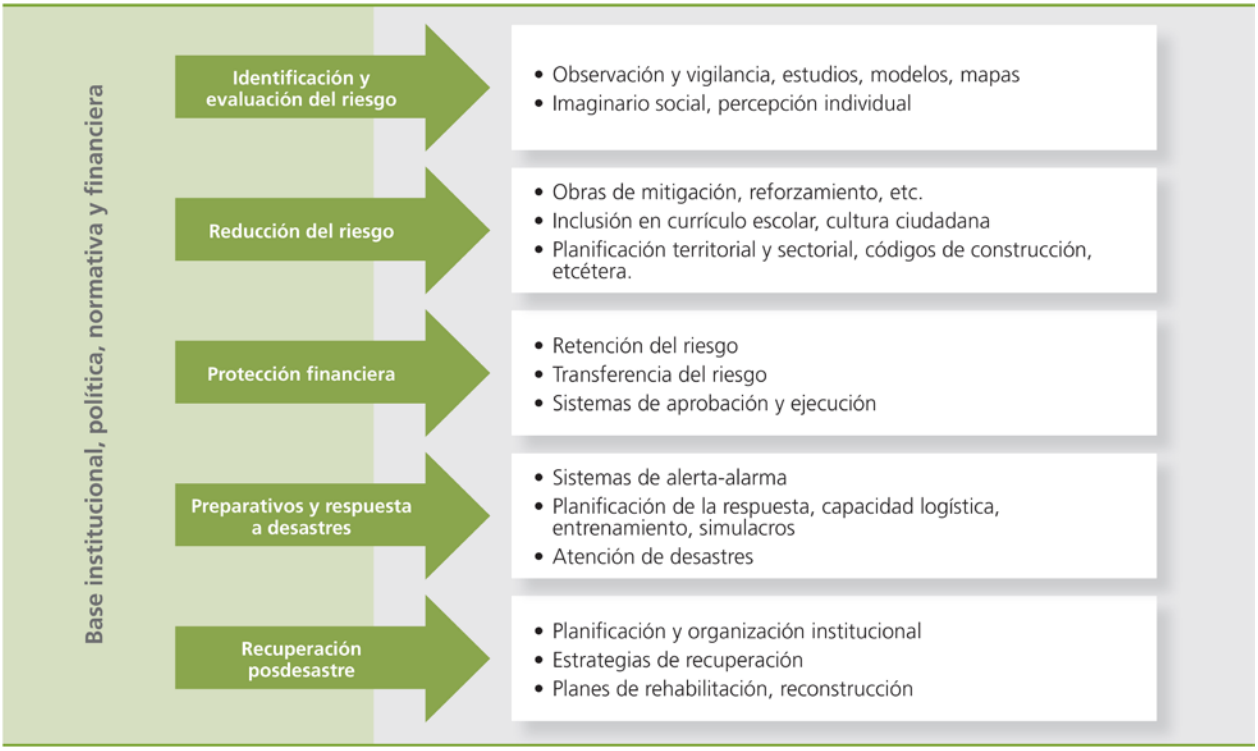


Figura 9-1. Componentes de la gestión del riesgo de desastre. Tomado de (Yamin, Ghesquiere, Cardona, & Ordaz, 2013)

El segundo componente hace referencia a la reducción de riesgo, la cual puede implicar medidas estructurales asociadas a la implementación de obras de mitigación y reforzamiento que permitan llevar a las construcciones a cumplir con ciertos niveles de desempeño establecidos (o los establecidos por ejemplo por la normativa nacional o regional) o medidas no estructurales relacionadas por ejemplo con la definición de planes de ordenamiento territorial, medidas de regulación y planificación que permitan controlar el desarrollo de infraestructura en zonas de alto riesgo.

En tercer lugar, se tiene el componente asociado a la protección financiera. Esta componente es de gran importancia, ya que luego de la ocurrencia de un desastre se requieren recursos económicos inmediatos tanto para la atención misma de la emergencia, para la rehabilitación de corto plazo que permita recuperar la movilidad urbana y para el posterior proceso de reconstrucción y reforzamiento de las estructuras afectadas o en mal estado. Ante esta condición, se tienen mecanismos de protección financiera que permiten distribuir el riesgo de pérdidas con el objetivo de disminuir la vulnerabilidad fiscal de los gobiernos y aumentar su nivel de resiliencia (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia, 2016), permitiendo a los gobiernos contar con recursos económicos para la atención de la emergencia y la ejecución de actividades de reconstrucción.

En este contexto, el IDU, como responsable de la infraestructura urbana de la ciudad y en particular de los puentes, debe contar con una Estrategia de Gestión Financiera de Riesgo de Desastres (GFRD) de manera articulada con la estrategia del nivel nacional liderada por el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (MHCP). Como objetivos específicos de dicha estrategia a nivel nacional se establecen los siguientes: a) Identificación y entendimiento del riesgo fiscal debido a la ocurrencia de desastres; b) Gestión financiera del riesgo de desastres (GFRD) para el sector público y privado; y c) Aseguramiento del riesgo catastrófico de los activos públicos.

En el marco de dicha estrategia, en el presente estudio se generan una serie de recomendaciones y opciones para la protección financiera de la infraestructura de puentes de la ciudad como una medida de reducción de la vulnerabilidad fiscal del estado y de gestión de sus obligaciones contingentes en caso de desastre. Las recomendaciones están basadas en los resultados de la evaluación del riesgo sísmico probabilista presentada en los capítulos precedentes de este estudio, así como la estimación de pérdidas esperadas para un conjunto de escenarios deterministas representativos de la amenaza sísmica a la que se encuentran expuestas las construcciones del portafolio de análisis. El objetivo principal de las recomendaciones que se plantean se orienta a la necesidad de la ciudad y del IDU de contar con acceso oportuno a recursos financieros para brindar una respuesta efectiva tanto, en los días siguientes a la ocurrencia del evento, como en el proceso de rehabilitación y reconstrucción post-desastre.

9.2 MARCO CONCEPTUAL

9.2.1 Conceptos básicos

En el marco de la protección financiera, es necesario comprender el funcionamiento básico de los esquemas de aseguramiento desde la perspectiva de las entidades del Gobierno. La Figura 9-2 presenta de manera general la organización y los parámetros básicos de los esquemas de seguros. En primer lugar, está la retención de riesgo, la cual representa la parte de las pérdidas que deben ser asumidas directamente por la entidad a cargo ya que resulta excesivamente costoso tratar de transferirla. Estas pérdidas excluidas deben ser tratadas con un criterio diferente a la transferencia de riesgo en aras de implementar un plan de mejoramiento bien sea por su calidad constructiva, traslado de sitio, reducción de vulnerabilidad o su eliminación. Alternativamente se pueden utilizar créditos contingentes y fondos de reservas con los que cuentan los gobiernos para atender las pérdidas económicas frecuentes que se presenten tras la ocurrencia de eventos frecuentes o que, por el estado de la estructura, genera pérdidas con alta frecuencia relativa. En segundo lugar, se tiene la oportunidad de transferir el riesgo mediante esquemas de aseguramiento con motivo de los altos valores en riesgo involucrados, la complejidad de los mismos y la incapacidad por parte del Estado para asumir grandes pérdidas económicas como consecuencia de un evento catastrófico. La exposición definida se transfiere al sector financiero mediante el reconocimiento de un pago anual que se conoce como la prima del seguro donde a través de elementos técnicos de análisis y transferencia de riesgos es viable como mínimo disipar el impacto de eventuales pérdidas económicas dentro de una frecuencia de tiempo establecida y conocida como vigencia. Aquellos riesgos que, por su alto valor, su ubicación o su reiterada afectación dada la alta vulnerabilidad estructural o de la zona geográfica, pueden ser sujetos de cobertura alternativa con cargo a recursos propios, bonos catastróficos, créditos contingentes o figuras similares. Finalmente, por encima de estas pérdidas máximas probables siempre quedará un riesgo residual

que será de difícil protección con mecanismo financieros directos y que de ocurrir deberá ser cubierto por la entidad misma, el Gobierno Nacional o algún esquema de protección de mayor alcance.

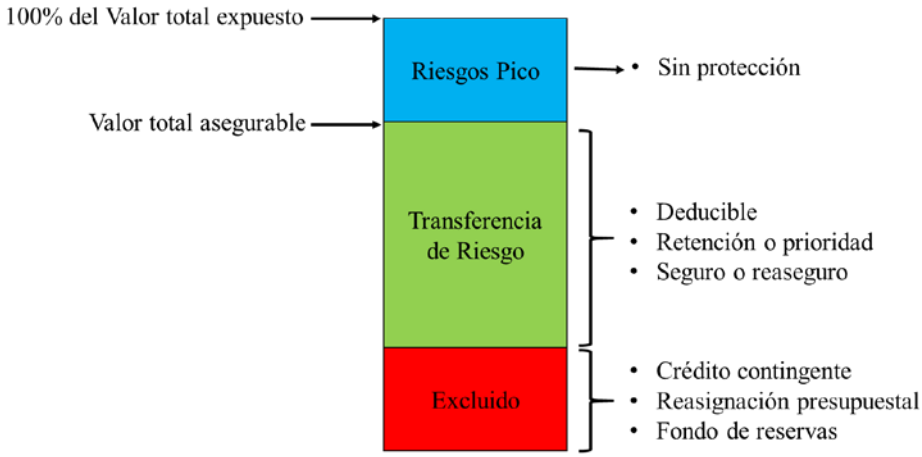


Figura 9-2. Esquema de seguro (adaptada de Ghesquiere et al., 2010)

Con el objetivo de plantear las recomendaciones para la implementación de un esquema de protección financiera de la infraestructura de puentes de la ciudad, este numeral presenta conceptos básicos utilizados en la definición de pólizas de seguros, así como la descripción de los dos principales tipos de coberturas, resaltando las ventajas y desventajas de cada uno. También se presentan aspectos relacionados con otros instrumentos de protección y transferencia como son los créditos contingentes o los bonos de catástrofe.

9.2.2 Componentes básicos de un esquema de transferencia

Existen diferentes mecanismos de protección financiera que permiten blindar un portafolio ante pérdidas asociadas a eventos naturales. Las coberturas disponibles en el mercado para edificaciones e infraestructura se dividen en coberturas de seguros tradicionales bajo esquemas indemnizatorios y alternativas no tradicionales de coberturas paramétricas (no indemnizatorias), cada uno con diferentes condiciones para el pago de la indemnización. También existen esquemas de protección y transferencia como líneas de créditos contingentes o bonos de catástrofe. A continuación, se presentan algunos conceptos básicos que permiten entender mejor el funcionamiento de estos esquemas de protección financiera:

- Ajuste de siniestro: es una actividad realizada por el ajustador (evaluador de pérdidas) de siniestros, la cual se lleva a cabo una vez la compañía de seguros es informada sobre la pérdida asegurada. La misión del ajustador de siniestros es determinar las causas del evento y las circunstancias que generaron la pérdida ocurrida de cara a la cobertura activa. De igual manera, las labores del ajustador de siniestros incluyen:
    - Determinar si la pérdida está dentro de los términos y condiciones de la póliza
    - Establecer si las reclamaciones realizadas por el asegurado son razonables
    - Determinar que los valores asegurados sean consistentes y tengan relaciones con los valores reales de los bienes asegurados

- Aseguramiento colectivo: mecanismo mediante el cual se aseguran dentro de una solución única, riesgos homogéneos que permiten desarrollar coberturas sencillas y ajustadas a la realidad de la exposición. Comúnmente utilizadas dentro de coberturas de Vida, Autos, Incendio y Terremoto para carteras residenciales o hipotecarias o de bienes de infraestructura, permitiendo sobre este concepto dar cobertura a la mayoría de riesgos involucrados y para todos los bienes expuestos.

- Bono catastrófico: es un instrumento financiero que tiene asociado un valor nominal, un emisor y un vencimiento. Su activación depende del cumplimiento de ciertos parámetros previamente pactados y tiene como ventaja que permite disponer de recursos de forma más rápida que los seguros tradicionales (Forbes, 2014).

- Cat DDO (Catastrophe Deferred Drawdown Option): por su traducción, opción de reducción diferida de catástrofe. Es una línea de crédito contingente que provee liquidez de forma inmediata a los países luego de la ocurrencia de un desastre natural. El Banco Mundial ha puesto a disposición de los países esta herramienta desde el año 2008, con el objetivo de dar liquidez a los países luego de la ocurrencia de un desastre una vez se declare el estado de emergencia. Los fondos para proveer liquidez a los países son pre-aprobados, y estos dependen de los programas de gestión de riesgo de desastres con los que cuente el país, así como de su entorno macroeconómico. Dentro de las ventajas de los Cat DDOs como herramienta para el financiamiento de riesgo en los países se tiene (The World Bank, 2017):
    - Sirve como una herramienta de financiamiento rápida, mientras los gobiernos consiguen otras fuentes para el manejo del desastre
    - Permite a los países atender la emergencia sin desviar fondos asociados a otros programas de desarrollo
    - Mejora la capacidad financiera de los gobiernos para el manejo de desastres
    - Permite establecer comunicación en temas de gestión de riesgo de desastres entre los países y el Banco Mundial, lo que permite aprender de experiencias pasadas y establecer buenas prácticas que permitan disminuir el riesgo de los países

- Líneas de crédito contingente: es un instrumento de financiamiento creado por el banco Interamericano de Desarrollo BID que permite a los gobiernos solventar las pérdidas asociadas a la ocurrencia de eventos naturales. Bajo este instrumento, cualquier desastre natural que genere la declaración de un estado de emergencia por una entidad competente (municipal, estatal o nacional) puede generar el desembolso siempre y cuando se cumplan las condiciones de desembolso que deben ser definidas con anterioridad (Banco Interamericano de Desarrollo, 2016).

- Deducible: corresponde a la parte de la pérdida que es asumida por el asegurado. Se puede especificar como un porcentaje del valor asegurado o de la pérdida (solución no sostenible y adolece de criterio técnico). Entre mayor sea el deducible, menor será la prima del seguro (Insurance Information Institute, 2010) ya que se reducirá la transferencia efectivo de riesgo a la compañías aseguradora.

- Seguro: es un mecanismo mediante el cual se transfiere el riesgo a una aseguradora a través del pago de una prima. La aseguradora se encarga de indemnizar pérdida asociada a la ocurrencia de un evento previsto dentro del contrato de seguros (MAPFRE, 2018).

- Reaseguro: solución de dispersión de pérdidas frente a riegos conocidos, asumidos y estratégicamente consensuados como transferencia entre las partes en cuanto su alcance económico y la naturaleza bien sea por su carácter destructivo o reiterante, comúnmente definidos como eventos Catastróficos o de frecuencia. Este mecanismo es una solución financiera que optimiza el uso del Capital de negocio por parte de las Aseguradoras en función de la sostenibilidad de las soluciones de transferencia que distribuyen dentro de segmentos socio-económicos específicos. Su comercialización a través de productos posee la capacidad para generar una distribución de los valores e exposición nivel geográfico dentro de cada uno de los portafolios constituidos e incrementados regularmente gracias a su venta (Ospina, 2018).

9.2.3 Instrumentos de protección financiera para infraestructura y riesgos asociados

Existen diversos esquemas e instrumentos de protección financiera contra los riesgos de eventos naturales para el sector de infraestructura. Para efectos del presente estudio se hace referencia únicamente a los esquemas e instrumentos tradicionales, fácilmente asequibles y de relativo bajo costos de compra y mantenimiento. En una fase posterior de implementación de un esquema integral de protección financiera se podrían explorar otras figuras que pueden resultar atractivas para proteger el portafolio.

Por un lado, están las líneas de créditos contingentes que le permiten a las entidades del Gobierno contar con recursos de alta liquidez de manera inmediata luego de la ocurrencia del evento. Por otro lado, están los esquemas de aseguramiento más tradicionales para componentes de infraestructura, los cuales pueden dividirse en dos tipos principales, los seguros indemnizatorios y los seguros paramétricos. La diferencia radica en que los seguros indemnizatorios tienen como objetivo ofrecer al asegurado una compensación financiera que les permita volver a la posición que ocupaban antes de la ocurrencia del riesgo, mientras que los seguros paramétricos proveen un beneficio fijo, el cual puede ser mayor o inferior a la pérdida generada por el evento (Ministerio de hacienda y crédito público, 2013).

9.2.3.1 Líneas de crédito contingente

Las líneas de crédito contingente que ofrece la banca multilateral (es especial el Banco Interamericano de Desarrollo y el Banco Mundial) consiste en créditos pre-aprobados que se desembolsan en caso de ocurrencia de un evento catastrófico. Su objetivo es el de mitigar el impacto que pueda llegar a generar una catástrofe generada por un evento de la naturaleza en las finanzas de un país, mediante el aumento de la disponibilidad, estabilidad y eficiencia del financiamiento contingente para la atención de las emergencias.

Como acción complementaria a la línea de crédito, las operaciones con la banca multilateral promueve una gestión integral del riesgo de desastre en el país mediante el mejoramiento en cinco áreas específicas que se monitorean a través del Programa para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres Naturales, CDRMP (Comprehensive Natural Disaster Risk Management Program): (i) la gobernanza de la gestión del riesgo de

desastre; (ii) la identificación y conocimiento del riesgo; (iii) la reducción del riesgo; (iv) los preparativos para las emergencias; y (iv) la protección financiera y la transferencia del riesgo.

Los resultados que se esperan a nivel país son los siguientes:

a) Una gestión del riesgo financiera ante desastres por eventos naturales mejorada mediante un aumento en el financiamiento contingente estable y eficiente para cubrir gastos públicos extraordinarios durante emergencias causadas por eventos naturales severos o catastróficos.
b) Una política nacional efectiva hacia una gestión integral del riesgo de desastres ante eventos naturales.

Los gastos elegibles como parte de los recursos del crédito corresponden a gastos asociados con la atención misma de la emergencia y podrían incluir temas como demolición y retiro de escombros, instalación de estructuras provisionales, atención médica, rehabilitación temporal de infraestructura y restauración de los servicios básicos, entre otros.

La garantía y la disponibilidad del crédito contingente están condicionada a la ejecución, a satisfacción de la entidad que otorga el crédito, del CDRMP previamente establecido entre el país y el Banco. El plan debe incluir además acciones específicas y concretas para la prevención y mitigación de los riesgos asociados a los desastres naturales.

La cuantía del crédito se define comúnmente con base en un estudio de riesgo catastrófico ante eventos de la naturaleza en la infraestructura expuesta, el cual debe incluir específicamente la evaluación y cuantificación de la amenaza, el análisis de la exposición, la estimación de la vulnerabilidad de los principales componentes expuestos ante las amenazas críticas y la evaluación histórica de los impactos previos en la infraestructura considerada.

El periodo usual de disponibilidad del crédito se establecerá de común acuerdo entre el Gobierno Nacional y el Banco y se considerarán periodos alrededor de 5 años contados desde la fecha de la solicitud previa aprobación del Banco. Usualmente la agencia ejecutora será el Ministerio de Hacienda y Finanzas y el uso de los fondos disponibles del crédito se ejecutarán a través del gobierno a través de las agencias públicas encargadas de la ejecución presupuestal durante las emergencias, en particular la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre en Coordinación con las empresas de servicio públicos y otras agencias del estado. Usualmente la entidad financiadora provee asistencia técnica para mejorar la capacidad de implementación con respecto a la respuesta ante las emergencias y al reporte de gastos elegibles.

El crédito contingente se diseña para:

a) Garantizar el suministro rápido de recursos líquidos para financiar gastos públicos extraordinarios durante emergencias causadas por eventos naturales severos y catastróficos.
b) Contar con una cantidad de recursos que puedan cumplir con las necesidades financieras esperadas ante la ocurrencia del desastre.

Considerando la naturaleza contingente del crédito, el desembolso se realizará solo si se cumplen las siguientes condiciones:

a) La ocurrencia de un evento natural cuya ubicación específica, magnitud e intensidad haya sido prevista y acordada previamente con el Banco.
b) Si en el momento del desembolso el Banco cuenta con recursos suficientes.

Los eventos elegibles como detonantes de un desembolso en el marco del crédito contingente deben acordarse entre el Banco y el país en las condiciones del programa. Ejemplos de eventos elegibles corresponden a terremotos, huracanes, inundaciones y otros. Estos deberán considerarse como detonantes paramétricos para cada uno de los tipos de amenazas y deberán quedar establecidos en las condiciones del programa y modificados posteriormente previa solicitud del país.

9.2.3.2 Seguros indemnizatorios

Los seguros indemnizatorios son una herramienta mediante la cual una entidad transfiere el riesgo a una compañía aseguradora. La transferencia del riesgo se realiza mediante un contrato en el cual se establece que el tomador del seguro debe pagar una prima a cambio de una indemnización en caso de sufrir una pérdida generada por el riesgo amparado por la póliza. El pago se realiza luego de la evaluación y verificación de las pérdidas ocurridas. Usualmente, las condiciones de la póliza le permiten al asegurado volver a la posición que tenía antes de la ocurrencia del siniestro en términos de protección financiera.

Para la definición del seguro indemnizatorio es necesario establecer (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia, 2016):

- Valor asegurable: corresponde a la valoración de reposición del bien que se quiere asegurar. Dependiendo de las condiciones de la compañía de seguros y de las condiciones del contrato, este valor puede representar el valor de reconstrucción sin incluir el terreno, del bien a asegurar.

- Riesgo asegurable: representa los riesgos frente a los cuales se encuentra expuesto el predio como consecuencia de su naturaleza o ubicación, que pueden generar pérdidas que están cubiertos por la póliza de seguro y su condicionado.

- Prima: es el valor que debe pagar el tomador del seguro a la compañía como contraprestación al traslado y la asunción del riesgo. Valor a ser pagado anualmente o por la vigencia que se contrate y se realiza normalmente al inicio del tiempo de vigencia de la póliza contratada.

- Deducible: corresponde a la parte de la pérdida que debe ser asumida por el tomador del seguro. Puede corresponder a un valor total o a un porcentaje del valor asegurable o de la pérdida según las condiciones establecidas en el contrato de la póliza. Dicho porcentaje se define para efectos de preservar el estado y condiciones del bien asegurado, por parte del tomador o asegurado.

- Límite: representa el valor máximo a ser indemnizado por la compañía aseguradora como consecuencia de la ocurrencia de una pérdida.

- Reclamación: Proceso de recuperación del valor de una pérdida cubierta por la póliza de Seguros, dependerá de las circunstancias que se haya llevado a cabo el siniestro y las condiciones de la póliza para su indemnización

La gran ventaja del esquema de aseguramiento indemnizatorio radica en que simplemente ocurra una pérdida asegurada, sin condicionar la misma a parámetros asociados a la ocurrencia de eventos naturales que puedan activar un factor de operatividad o nulidad para que se defina el reembolso de dichas pérdidas. Así mismo, bajo este esquema se garantiza el pago de la pérdida asegurada luego de considerar límites y deducibles, los cuales deben ser acordados en el contrato de la póliza de aseguramiento y pago de la póliza que brinda la cobertura.

En cuanto a las desventajas asociadas a este esquema, está la necesidad de definir un plan de contingencia efectivo y operativo que permita el rápido proceso indemnizatorio según el nivel de daños ocurrido en cada componente, de cara al número de riegos afectados dentro del mismo evento, en procura de la reducción de la vulnerabilidad y garantizar la efectiva atención y compensación a la entidad afectada.

9.2.3.3 Seguros paramétricos

Los seguros paramétricos son instrumentos de protección financiera, mediante los cuales se realiza un pago a partir de la ocurrencia de un evento desencadenante en lugar de en función de la pérdida generada por dicho evento. Para la definición de este esquema de pago se requiere en primer lugar definir el evento desencadenante. En el contrato del seguro se debe establecer de forma previa las condiciones del evento que producirán o no el pago de la indemnización. Dependiendo del tipo de amenaza que afecte el portafolio de bienes expuestos, los eventos desencadenantes pueden ser sismos, ciclones, inundaciones, entre otros. Como criterio para la definición de este evento se tiene que debe ser fortuito y que pueda ser modelado. En segundo lugar, es necesario establecer el mecanismo de pago. Debido a que el pago se realiza si se excede cierto índice, se debe establecer cuál será la agencia o entidad encargada de reportar dicho valor, con el objetivo de establecer si una vez ocurrido el evento se debe desembolsar dinero por parte de la compañía de seguros. Dependiendo de las condiciones definidas entre el asegurado y la compañía aseguradora, se pueden establecer pagos escalonados en función de los parámetros del evento desencadenante.

A continuación se presentan los pros y contras de este esquema de aseguramiento (Ministerio de hacienda y crédito público, 2013):

- PROS
  - Rápido desembolso, permite atender el desastre de forma eficiente
  - Es un esquema transparente para todas las partes
  - Tiene bajos costos administrativos, ya que no requiere un proceso de evaluación de pérdidas.
- CONTRAS
  - Afectación del Erario y puede ocurrir un caso en que se genere una pérdida económica pero no se reciba compensación debido al no cumplimiento de los parámetros que activan el pago (riesgo base)

- Requiere de una investigación previa basada en datos de alta calidad que permitan establecer los eventos críticos para el portafolio a asegurar
- Requiere de capacitación para que todas las partes comprendan el producto (riesgo legal asociado al riesgo base)
- Altos costos de entrada
- La herramienta no acompaña la realidad de la perdida y tampoco permite restituir la situación económica original, como antes de la ocurrencia del siniestro.
- Alto riesgo financiero y reputacional para las partes involucradas

Como ejemplo de este tipo de productos, más adelante se presentan los casos del esquema del bono catastrófico emitido en 2006 por México, el cual funciona como un seguro paramétrico. Bajo este primer esquema, el país tenía cobertura por pérdidas asociadas a sismo por un valor de US$160 millones. El esquema de seguro generaría un pago si se cumplía alguna de estas condiciones: que la Secretaría de gobernación (SEGOB) declara el estado de emergencia o que el sismo tuviera un epicentro, magnitud y profundidad según lo especificado en los parámetros detonantes del seguro.

9.2.3.4 Seguro indemnizatorio vs. Seguro paramétrico

Con el objetivo de identificar de forma clara las ventajas y desventajas de los dos esquemas de aseguramiento presentados, la Tabla 9-1 presenta un comparativo entre los dos esquemas evaluando diferentes parámetros. La información es tomada de Swiss Re (Swiss Re, 2018), complementada por los autores.

Tabla 9-1. Comparación del seguro indemnizatorio con el seguro paramétrico

Aspecto	Seguro indemnizatorio	Seguro paramétrico
Pago	El pago se realiza en función del daño ocurrido sobre el bien expuesto	El pago se realiza si ocurre un evento que exceda los parámetros definidos en el acuerdo pero sin la certeza de indemnizar la real afectación del portafolio siniestrado
Monto del pago	Se paga la pérdida real ocasionada por el evento	Se establece de forma previa una estructura de pago en función del parámetro detonante pero no en función de toda la pérdida asegurada
Condiciones	Según la amenaza cubierta, el esquema indemnizatorio requiere la definición de una exposición y de tal forma asociar las condiciones de deducibles, límites y con las respectivas exclusiones de daños que no son cubiertos por la póliza	La definición del esquema de seguro paramétrico requiere establecer el parámetro de activación del seguro (que debe estar correlacionado con las pérdidas esperadas) y el esquema de pago
Reclamación	Con el diseño de un Plan de Contingencia se simplifica el proceso de ajuste de siniestros, lo que optimiza y hace eficiente el desembolso del pago	El pago lo define el beneficiario del pago del acuerdo, es rápido ya que solo depende del reporte de la entidad encargada de gestionar el nivel de intensidad asociado al evento natural (por ejemplo la magnitud de un sismo reportada por el USGS u otra entidad reconocida)
Duración	Usualmente un año, renovable.	Se puede hacer anual o por periodos de hasta cinco años
Estructura	Son esquemas con estructura estándar lo que implica gestión del riesgo efectiva en aras de ajustar la necesidad de cobertura a las necesidades del tomador del seguro	Son esquemas que pueden ser adaptados a las condiciones y necesidades de la realidad económica que se desea mitigar

9.2.4 Combinación de instrumentos financieros

Uno de los objetivos de la Estrategia del programa de GFRD es garantizar la disponibilidad de recursos en las diferentes fases luego de la ocurrencia del evento. De acuerdo con Ghesquiere y Mahul (2010) los requerimientos de liquidez después de la ocurrencia de un evento se pueden dividir en tres diferentes fases:

a) Atención inmediata de la emergencia
b) Rehabilitación: en un periodo de meses posterior a la ocurrencia del evento
c) Reconstrucción: en un periodo de años luego de la ocurrencia del evento

El diseño de una estrategia financiera eficiente debe considerar la dimensión del tiempo para garantizar que los fondos requeridos están en coordinación con la capacidad para desembolsar dichos recursos en el momento que se requieren. Otro objetivo fundamental de la estrategia de protección financiera consiste en garantizar el uso de los recursos menos costosos primero y reservar los instrumentos costosos para circunstancias especiales.

La estratificación del riesgo catastrófico se utiliza para diseñar la estrategia de financiamiento del riesgo. Usualmente los recursos más accesibles y menos costosos corresponden a reservas para emergencias y contingencias presupuestales y estas son utilizadas normalmente para cubrir las pérdidas más recurrentes. En estas primeras capas también se pueden utilizar las líneas de crédito contingente, créditos para emergencias o fondos de calamidad o de emergencias. En un segundo nivel se encuentran normalmente algunos tipos de seguros que pueden igualmente utilizarse en caso de eventos de recurrencia intermedia. Tal es el caso de aseguramientos paramétricos que proporcionan normalmente recursos de alta liquidez, aunque a costos intermedios. Las pérdidas asociadas a capas superiores se pueden usualmente proteger mediante esquemas de seguros indemnizatorios que de paso resultan obligatorios para proteger los bienes públicos. Usualmente los recursos provenientes de los seguros indemnizatorios requieren de un mayor tiempo para el desembolso, mientras se lleva a cabo el proceso de ajuste de pérdidas por personal especializado de las compañías. Igualmente, este tipo de seguros considera un deducible que será un porcentaje del valor asegurado o un porcentaje de la pérdida, y un valor límite que estará definido usualmente por la valoración de la pérdida máxima probable, PMP, para un determinado periodo de retorno. Este tipo de mecanismo de protección es usualmente más costos que los anteriores. La prima de riesgo depende del valor asegurable, de la ubicación y concentración de activos y del estado estructural de los componentes asegurados y se establece usualmente como un valor al millar del valor asegurable.

En la capa superior por encima del límite establecido por un programa de seguros se requiere protección adicional que usualmente estará dada por ejemplo por tramos de instrumentos de transferencia del riesgo de desastres contratados a nivel nacional, bonos de catástrofe, aseguramiento paramétrico de capas superiores y otros instrumentos financieros tales como facilidades de protección financiera regionales, aumento de impuestos o impuestos temporales para la reconstrucción, préstamos domésticos o externos, reasignación presupuestal a nivel regional y nacional.

En la Figura 9-3 se resume la estrategia de estratificación del riesgo y protección financiera por capas.

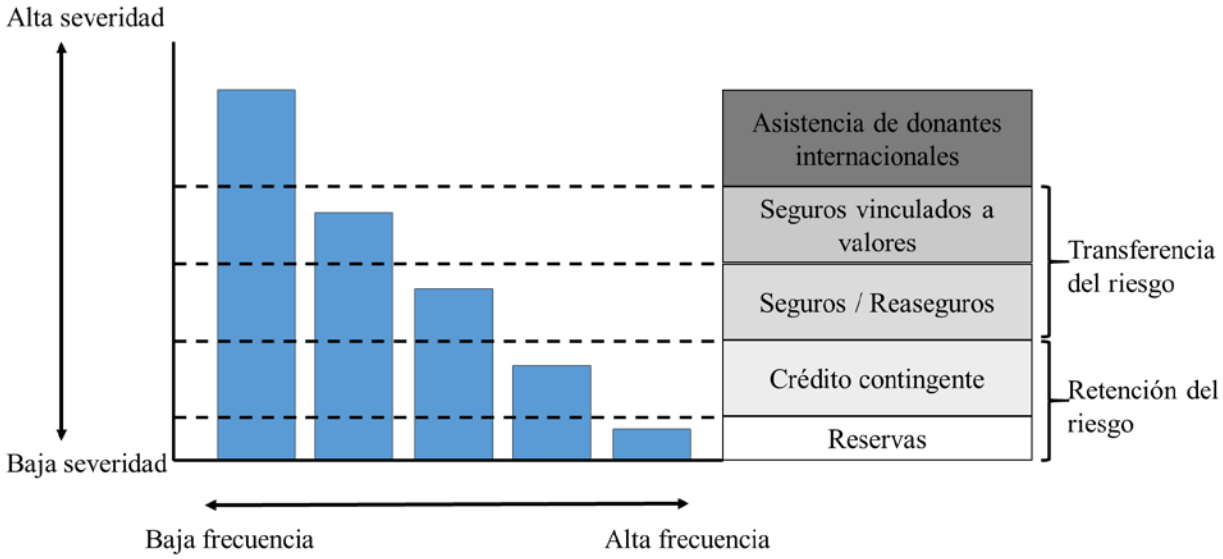


Figura 9-3. Estrategia de estratificación del riesgo y protección financiera por capas (adaptada de Ghesquiere et al., 2010)

9.3 ANÁLISIS DE OPCIONES DE ASEGURAMIENTO Y PROTECCIÓN FINANCIERA

9.3.1 Crédito contingente

La línea de crédito contingente para la atención de las emergencias se convierte en un recurso fundamental para que la entidad cuente con liquidez suficiente en los días y semanas posteriores a la ocurrencia del evento. Los gastos elegibles como parte de los recursos del crédito corresponden a gastos asociados con la atención misma de la emergencia y podrían incluir temas como demolición y retiro de escombros, instalación de estructuras provisionales, atención médica, rehabilitación temporal de infraestructura y restauración de los servicios básicos, entre otros.

Considerando que el valor de reposición total del portafolio es del orden de los US$1,300 millones, los recursos necesarios para la atención de la emergencia se pueden valorar aproximadamente entre el 2% y el 3% de este valor lo que resulta en una cifra cercana a los US$30 millones.

El crédito contingente, en caso de requerirlo de una entidad multilateral como el Banco Mundial o el BID deberá tramitarse a través del Gobierno Nacional en el marco del Programa para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres Naturales.

9.3.2 Seguro paramétrico

Para evaluar las condiciones del seguro paramétrico se requiere realizar las siguientes valoraciones:

1. El costo estimado de pérdidas económicas o el valor real expuesto según los estudios de vulnerabilidad y los análisis técnicos.
2. La selección del valor límite a asegurar.
3. El parámetro o la combinación de parámetros detonantes y la entidad que haga la medición.
4. Evaluación de la prima pura técnica
5. Impacto Financiero de la compra de una potencial cobertura que puede o no funcionar en virtud de la activación del detonante, costo político, financiero y social.

A continuación, se presenta la información técnica disponible para definir un eventual esquema de aseguramiento paramétrico.

9.3.2.1 Valor límite asegurado

El valor límite asegurado se establece normalmente como la estimación de la pérdida máxima probable del portafolio (PMP) para un periodo de retorno particular. La selección del periodo de retorno para efectos de determinar el valor del PMP, depende del nivel de protección y confiabilidad del tomador en relación al riesgo. Es usual en el mercado de seguros tomar valores entre los 500 años y los 1500 años, aunque en casos específicos se podrían llegar a considerar pérdidas de hasta 2500 años. Para efectos del presente estudio se toma un valor de referencia correspondiente a un periodo de retorno de 1000 años. La Tabla 9-2 presenta los valores máximos asegurables del portafolio de puentes.

El valor límite asegurado no se toma en general como el valor máximo asegurable en el caso de un seguro paramétrico por los altos costos que resultan de un esquema de estas características. Por esta razón usualmente se define como valor asegurado una fracción menor, recursos que servirían principalmente para la fase de atención de la emergencia.

9.3.2.2 Los parámetros detonantes

Como parámetro detonante se puede seleccionar una medida de intensidad reportada de manera oficial por alguna entidad reconocida. Al respecto conviene explorar la posibilidad de usar la aceleración espectral pico a 0.3 segundos estimada de acuerdo con los procedimientos del USGS ((United States Geological Survey USGS, 2018)). De acuerdo con lo establecido en la página web del USGS y lo explicado anteriormente es posible seleccionar algunos sismos representativos, evaluar las condiciones del riesgo que generan en los componentes expuestos y establecer con base en esto, los parámetros que serían reportados por el USGS para ser usado como parámetros de referencia. También se puede considerar el reporte de intensidades por parte del Servicio Geológico Colombiano o por parte de la Red Sísmica Nacional o Local. Sin embargo, la selección de la fuente de información para el parámetro detonante debe ser la más confiable e independiente posible.

9.3.2.3 Evaluación de la prima pura técnica

Para la evaluación de la prima pura técnica se recurre a los valores reportados de PAE como referencia, los cuales se presentan en la Tabla 9-2. A partir de estos valores estiman las primas comerciales que dependerán de las condiciones de mercado que ofrezcan las compañías de seguros y reaseguros interesadas.

Tabla 9-2. Evaluación de la prima pura técnica para portafolio de puentes

Portafolio	Valor Asegurable (US$ Millones)	PAE (US$ millones)	PAE (‰)
Puentes Vehiculares	1,082.37	2.86	2.64
Puentes Peatonales	211.44	0.12	0.57
Portafolio completo	1,293.81	2.98	2.30

9.3.2.4 Cobertura paramétrica

Se hacen las siguientes recomendaciones específicas para la solicitud de propuestas de esta cobertura:

a) Cobertura del seguro paramétrico: se propone una cobertura mínima para pérdidas con periodo de retorno de al menos 1000 años (US$ 240 millones aproximadamente).
b) Utilizar como parámetro detonante bien sea el valor de PGA o la aceleración espectral para un periodo estructural de 0.3 segundos o 0.5 segundo según lo explicado en el Capítulo 7. Esta estimación se puede hacer con la magnitud y localización del sismo según reporte del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y definiendo una ecuación de atenuación válida para el territorio colombiano.
c) Se debe solicitar la especificación del cobro de prima para diferentes valores asegurados y variaciones con los parámetros detonantes.

En principio la selección entre un seguro de tipo paramétrico y otro de tipo indemnizatorio se llevará a cabo en función al costo del mismo en las diferentes capas de riesgo. En casos específicos se podría considerar la posibilidad de contar con un seguro paramétrico para las capas más bajas y uno de tipo indemnizatoria para capas superiores.

9.3.3 Seguro indemnizatorio

Para evaluar las condiciones del seguro indemnizatorio se requiere realizar las siguientes valoraciones:

a) Cobertura: aplica para los componentes de infraestructura cubiertos, los cuales corresponden a los puentes registrados en la base de datos de la entidad y con los parámetros que se tengan consignados en dicha base de datos (tamaño, área construida, tipología constructiva, fecha de construcción y valor de reposición).

b) La indemnización se realiza en función del nivel de daño reportado en cada uno de los puentes luego de la ocurrencia del evento. Con el fin de facilitar la evaluación de daños y hacer más expedito el pago de las indemnizaciones, se puede explorar con las compañías de seguros la posibilidad de llevar a cabo la evaluación utilizando para el efecto la metodología propuesta para la evaluación del

estado de los puentes. Usando esta metodología se pueden establecer diferentes niveles de daño (por ejemplo, Alto, Medio y Bajo) y establecer valores de indemnización porcentuales según el avalúo de cada estructura.

c) El desembolso se realizaría directamente al tomador de la póliza que en este caso corresponde al Instituto de Desarrollo Urbano o al Distrito Capital.

d) La prima será pagada directamente por la entidad a la compañía de seguros o compañías según se determine dentro del esquema de aseguramiento.

e) Se diseñará un plan de Contingencia para la atención del evento que involucre la capacidad de respuesta del sector asegurador, la disponibilidad de los recursos de una manera ágil y efectiva, y la rápida reconstrucción de la zona afectada.

9.3.3.1 Valor asegurado, límite y prima pura de riesgo

La evaluación del riesgo sísmico ofrece la información requerida para estimar estos parámetros del seguro. Se establecen los valores asegurables (valor de reposición del portafolio de puentes), el valor de PMP que sirve para definir el valor asegurado o límite máximo y la prima pura de riesgo que corresponde a la pérdida anual esperada del portafolio. Este valor de prima se establece sin tener consideración del deducible que va a requerir la compañía de seguros y que generaría sin duda una reducción importante del valor de la prima.

9.3.3.2 Recomendaciones para el seguro indemnizatorio

Se hacen las siguientes recomendaciones específicas para la solicitud de propuestas de un seguro indemnizatorio:

a) Cobertura del seguro: se propone una cobertura mínima (especificada como valor límite de la póliza) para pérdidas máximas probables, PMP, con periodo de retorno de 1000 años (US$ 240 millones aproximadamente).

b) Valores asegurados: corresponderán al valor de reposición asignado en la base de datos de puentes.

c) Deducible: se especificará directamente por parte de la compañía de seguros como un porcentaje del valor asegurado.

d) Indemnización: el pago indemnizatorio se realizaría directamente al instituto para su gestión y control. Se debe analizar los aspectos administrativos, jurídicos, de entes de control y aspectos prácticos y políticos para el manejo de los recursos.

e) Solicitar la especificación del cobro de prima para diferentes opciones de valores asegurados y deducibles.

CAPITULO
10

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las principales conclusiones de este estudio.

Sobre el Sistema de Información Geográfica de puentes:

1. Se diseñó e implementó un sistema de información geográfica para la infraestructura de puentes de la ciudad. Para cada uno de los 1006 puentes registrados por el IDU en el Distrito Capital se completó información topográfica, geométrica y estructural, a excepción de casos con información limitada para las estructuras que no son consideradas puentes.

2. La información topográfica disponible para cada uno de los puentes de la base de datos registrada incluye los siguientes elementos, a excepción de casos con información limitada para las estructuras que no son consideradas puentes:
    - Plano planta-perfil
    - Sección transversal típica
    - Esquema de localización
    - Modelo 3D de malla de alambre de elementos principales
    - Puntos georreferenciados asociados a cada puente

3. La información geométrica de cada uno de los puentes de la base de datos registrada incluye los siguientes elementos, a excepción de casos con información limitada para las estructuras que no son consideradas puentes.:
    - Luces
    - Gálibos
    - Anchos de calzada
    - Dimensiones de elementos estructurales principales
    - Dimensiones de elementos de servicio

4. La información estructural de cada uno de los puentes de la base de datos registrada incluye los siguientes elementos, a excepción de casos con información limitada para las estructuras que no son consideradas puentes.:
    - Sistema estructural
    - Materiales y secciones de los elementos de subestructura
    - Materiales y secciones de los elementos de superestructura

5. En cuanto al uso principal, la base de datos incluye 554 puentes Vehiculares (55.07%), 405 puentes peatonales (40.26%) y 47 de otras clasificaciones (túneles, alcantarillas, vernaculares) (4.67%).

6. En cuanto a los tipos de redes en la ciudad, la base de datos incluye 257 puentes vehiculares en la Red Arterial Vital (46.39%), 52 en la Arterial No Vital (9.39%), 166 en la Intermedia y Local (29.96%) y 79 en la Rural (14.26%).

7. Con respecto a los peatonales, estos se distribuyen así: 212 puentes en la Red Arterial Vital (52.35%), 32 en la Arterial No Vital (7.90%), 159 en la Intermedia y Local (39.26%) y 2 en la Rural (0.49%).

8. Se estructuró e implementó un modelo de almacenamiento geográfico para los elementos de Puente con soporte en herramientas de diseño en Oracle y compatible con lenguaje SQL, en el cual se almacenaron los datos resultantes de 1006 puentes registrados por el IDU y con información estratégica de orden geométrico, estructural, de patologías, vulnerabilidad y riesgo, a excepción de casos con información limitada para las estructuras que no son consideradas puentes.

9. Se migró información gráfica y alfanumérica asociada los elementos del puente, así: Puente [1006], Viga [2582], Tablero [1006], Junta [1302], Apoyo Intermedio [1575], Características Generales [1006], Apoyo Extremo [1006], Elementos del Servicio No Estructurales [1006], Elementos del Servicio Geométricos [1006], Elementos del Servicio Estructurales [1006], Elementos del Servicio Patológicos [1006], Inspección Básica de Apoyo Intermedio [2593], Inspección Básica en Viga [6864], Inspección Básica en tablero [1006], Riesgo [1006] y Archivos [1006].

10. El IDU cuenta con un modelo de almacenamiento de datos completamente escalable, parametrizable e interoperable que puede ser replicado en adelante a los diferentes procesos de inspección, mantenimiento y seguimiento a los puentes de la ciudad de Bogotá, tanto por áreas internas de la entidad como futuros contratistas que adelanten labores relacionadas con los puentes y sus elementos conexos.

<u>Sobre la metodología de evaluación del estado de los puentes:</u>

1. Se desarrollaron metodologías para el levantamiento geométrico y estructural de los puentes de la ciudad de Bogotá, así como metodologías para la inspección (en dos niveles, básica y detallada) y evaluación del estado estructural y de servicio de los mismos. Estas metodologías fueron definidas con base en una revisión bibliográfica de guías y manuales internacionales existentes, lo cual aseguró que las metodologías aquí desarrolladas estén al nivel de las más modernas y avanzadas a nivel mundial.

2. Las metodologías aquí presentadas fueron aplicadas a la infraestructura de puentes de la ciudad de Bogotá obteniendo como resultado un inventario actualizado, que permite conocer el estado de los puentes del Distrito, y a su vez brindar herramientas e indicadores para la priorización y asignación de recursos públicos para el correspondiente mantenimiento, conservación, habilitación y/o reforzamiento de los puentes.

3. El sistema de evaluación establece el estado global del puente por medio de una calificación relativa en su componente estructural y en su componente de servicio, el cual se utiliza para establecer una priorización en las actividades de mantenimiento de los puentes de la ciudad. El estado se distribuye en la siguientes calificaciones, Malo, Regular, Aceptable y Bueno.

4. Como resultado de la aplicación de la metodología de inspección básica se encuentra que, de los 554 puentes vehiculares inspeccionados, 16 (3%) tienen un estado estructural Malo, 115 (21%) Regular, 330 (60%) Aceptable y 93 (17%) se encuentran en estado estructural Bueno. En términos de servicio, 76 (14%) puentes vehiculares se encuentran en estado Malo, 115 (21%) en regular, 314 (57%) en Aceptable y 49 (9%) en Bueno.

5. Para el caso de los puentes peatonales se encuentra que, de los 405 puentes peatonales inspeccionados, 17 (4%) tienen un estado estructural Malo, 60 (15%) Regular, 240 (59%) Aceptable y 88 (22%) se encuentran en estado estructural Bueno. En términos de servicio, 6 (1%) puentes peatonales se encuentran en estado Malo, 6 (1%) en regular, 303 (75%) en Aceptable y 90 (22%) en Bueno.

6. Se presenta un procedimiento para la priorización de las eventuales intervenciones de los puentes (numeral 4.7.5), empezando principalmente por la actividad de inspección detallada a los puentes que presentan un estado estructural Malo o Regular luego de lo cual se deberá proceder con las reparaciones que recomienden estos estudios. Luego se deberá continuar con la atención y mantenimiento por estado de servicio de los puentes cuyo estado de servicio sea Malo o Regular.

<u>Sobre la metodología para la evaluación del riesgo de la infraestructura de puente de la ciudad</u>

1. La metodología propuesta para la evaluación del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad se basa en tres componentes principales: (i) evaluación de la amenaza sísmica incluyendo los efectos de amplificación por la respuesta dinámica de los suelos; (ii) la conformación de la base de datos de exposición de cada uno de los puentes de la ciudad y sus atributos estructurales principales; (iii) la vulnerabilidad sísmica de cada una de las tipologías de puentes.

2. Se desarrolló un modelo de amenaza sísmica para la zona de estudio que tienen en cuenta la actividad sísmica y la caracterización de los parámetros de recurrencia de las fuentes cercanas a la zona de estudio, el catálogo de sismos históricos actualizado, las leyes de atenuación de las intensidades sísmicas y la integración probabilista de la amenaza. El modelo incluye igualmente la amplificación generada por la respuesta dinámica de los diferentes depósitos de suelo, conocido también como efectos de sitio.

3. Los espectros de amenaza en superficie obtenidos con esta evaluación se compararon con los espectros del código CCP-14 correspondientes a la zona de análisis. Se encontró, como era de esperarse, que los resultados dados por el presente modelo de evaluación de amenaza resultan menores a los del código mencionado, pero presentan consistencia con la sismicidad histórica observada en la zona de influencia de Bogotá. Se evidenció también que los factores de amplificación del suelo indicados por el Código sobreestiman de manera significativa los efectos estimados con la metodología indicada en el presente estudio.

4. La base de datos de exposición se obtuvo a partir de la información actualizada en el sistema de información geográfica de los puentes de la ciudad.

5. La evaluación del riesgo probabilista se lleva cabo utilizando la metodología propuesta por la plataforma CAPRA (www.ecapra.org).

Sobre la caracterización de la base de datos de exposición para el análisis del riesgo

1. El portafolio general de puentes, para efectos del análisis del riesgo sísmico, está compuesto por 554 puentes vehiculares y 405 puentes peatonales para un total de 959 puentes, con un área en planta total de 626,528 m² y una valoración económica aproximada de COP$4.01 billones.

2. El valor total expuesto se distribuye entre las localidades de Bogotá de mayor a menor de la siguiente manera: Fontibón 16.14 %, Barrios Unidos 13.64%, Engativá 13.08%, Puente Aranda 9.20%, Kennedy 8.82%, Teusaquillo 7.34%, Usaquén 6.96%, Suba 6.25%, Chapinero 3.91%, Ciudad Bolívar 3.01%, Bosa 2.08%, Santa Fe 1.89%, Tunjuelito 1.68%, Los Mártires 1.24%, Rafael Uribe Uribe 1.11%, Antonio Nariño 0.98%, Usme 0.90%, Sumapaz 0.63%, Candelaria 0.61% y San Cristóbal 0.54%.

3. La tipología de puentes vehiculares dominante en la ciudad corresponde a VLS_1 (Vehiculares de una sola luz) con un 21.5% del total de puentes, y para los puentes peatonales corresponde a PLS_1 (Peatonales de una sola luz) que representan en número un 15% del portafolio.

Sobre el modelo de valoración económica de puentes

1. Se desarrolló un modelo de valoración económica de puentes que permite obtener el valor de construcción/reposición (valores de costos de obra nueva) a partir de los siguientes pasos:
    - Definición de características del puente (ubicación, geometría, tipología y elementos no estructurales).
    - Cálculo de cantidades de construcción a partir de las características del puente.
    - Cálculo de costos de cada ítem del presupuesto del puente.
    - Estimación del valor medio y la varianza del costo total del puente.

2. Se obtuvieron funciones índice para el cálculo de cantidades de construcción a partir de las características del puente para cada uno de los componentes (superestructura, subestructura y cimentación). Estas funciones índice relacionan propiedades independientes como lo son la luz, el

gálibo o la ubicación con propiedades dependientes como la cantidad de concreto, la cuantía de refuerzo total, entre otros.

3. Se desarrolló un programa que permite el avalúo de puentes de acuerdo con las características geométricas, ubicación y tipología de cada puente, e incluye todos los capítulos de obra típicos de este tipo de infraestructura encontrados en proyectos similares en Bogotá. El programa no requiere de ningún tipo de licencia, incluye un manual de uso y utiliza el Sistema de Información de Precios descargable en la página oficial del IDU.

4. El modelo de valoración económica y el programa desarrollado son versátiles y permiten una fácil actualización mediante la complementación de la información base:
    - Complementación de la información de cantidades de construcción.
    - Modificación de valores unitarios del Sistema de Información de Precios del IDU.
    - Complementación de la información de presupuestos típicos de proyectos de infraestructura de puentes.

5. De acuerdo con el modelo de valoración económica desarrollado, las 1006 estructuras (959 puentes y 47 estructuras con otros usos) contenidos en la base datos SIGIDU se valoran en un total de COP$4.07 billones (US$ 1300 millones), de los cuales el 82.5% corresponde a puentes vehiculares, el 16.1 % a puentes peatonales, y el 1.1% restante a las estructuras con otros usos.

6. Se desarrollaron modelos de costos de reparación para elementos susceptibles de daño identificados según el tipo de componente (estribo, columna, neopreno, entre otros). Estos valores fueron normalizados (convertidos a costos unitarios) para que sean implementados en la valoración de reparación de cualquier tipología de puente de cualquier tamaño. Los precios base fueron obtenidos del Sistema de Información de Precios descargable en la página oficial del IDU.

<u>Sobre la vulnerabilidad sísmica de los puentes de la ciudad</u>

1. Se desarrolló e implementó una metodología, basada en el estado del arte y metodologías modernas similares desarrolladas a nivel mundial, para relacionar el costo de reparación contra alguna medida de intensidad sísmica (aceleración espectral para este caso).

2. De esta parte del estudio, se definió una taxonomía que contiene 12 parámetros de vulnerabilidad sísmica incluyendo el sistema estructural, el nivel de diseño sísmico, el tipo de suelo, entre otros.

3. Los 1006 puentes y estructuras de la base de datos fueron agrupados en 33 sistemas estructurales para puentes (17 sistemas para puentes vehiculares y 16 para peatonales, incluyendo los vernaculares en cada caso), y dos sistemas adicionales para estructuras que n son puentes (alcantarillas y túneles). Los tres parámetros claves para definir la mayoría de los sistemas fueron: la conexión entre la sub-estructura y la super-estructura, la continuidad de la super-estructura y el tipo de sub-estructura en los ejes intermedios.

4. Cada sistema estructural fue sub-clasificado dependiendo del nivel de diseño sísmico, como diseño para cargas gravitacionales (solamente), o diseño considerando especificaciones sísmicas modernas. También se incluyeron tipologías que cumplían parcialmente con los requisitos sísmicos de los códigos modernos.

5. El tipo de suelo fue clasificado en tres rangos: suelo duro ($\overline{V_s} \geq 760$ m/s), intermedio y blando ($\overline{V_s} < 180$ m/s). Basado en los resultados de los estudios de amenaza sísmica, para cada tipo de suelo se seleccionaron y procesaron 33 señales sísmicas representativas del tipo de suelo y de las fuentes sismogénicas identificadas en el estudio de amenaza.

6. Para cada sistema estructural representativo, se realizaron análisis no lineales cronológicos incrementales usando modelos de computador en Opensees; en este programa, es posible caracterizar el comportamiento no lineal de la sub-estructura, el ancho de silla, las llaves de cortante, los elastómeros, el espaldar del estribo, etc. utilizando los resultados de experimentos desarrollados a nivel mundial.

7. A partir de las simulaciones se obtuvieron relaciones entre los parámetros de demanda sísmica (PDS) de cada componente del puente y el parámetro de intensidad sísmica seleccionado (aceleración espectral).

8. Los costos de reparación de cada parte del puente se obtienen a partir de modelos de componentes que usan funciones de fragilidad disponibles de la literatura y estimativos de costos de reparación dependiendo del nivel de daño del componente.

9. Para cada sistema estructural, el costo de reparación total se calculó a partir de simulaciones de Monte Carlo considerando todas las posibles fuentes de incertidumbre (Yamin et al., 2017). Se consideran incertidumbres asociadas al modelo analítico, a los parámetros de demanda sísmica obtenidos en el análisis, a los niveles de daño y a los costos de reparación. Esta metodología permite integrar los resultados de los análisis dinámicos no lineales del modelo computacional con el modelo de componentes susceptibles a daños de cada tipología.

10. Usando los resultados de un estudio de sensibilidad, las curvas obtenidas por sistema estructural y nivel de diseño sísmico son modificadas para considerar los otros 10 parámetros de la taxonomía. El estudio también incluye análisis para tipologías particulares como el puente prototipo Bogotá, box culvert, puentes en arco y atirantados.

11. En total se generaron más de 250 funciones de vulnerabilidad que fueron asignadas a los puentes y estructuras mediante un algoritmo que tiene en cuenta las características particulares de cada caso.

<u>Sobre los resultados del análisis probabilista del riesgo</u>

1. La pérdida anual esperada absoluta para el portafolio de puentes es de aproximadamente COP$9,240 millones correspondientes a un 2.30‰ del valor total expuesto de todo el portafolio.

2. La pérdida máxima probable para el portafolio de puentes para un periodo de retorno de 1,000 años es de aproximadamente COP$730,000 millones, lo que corresponde a un 18% del valor expuesto total.

3. La tipología constructiva que mayor riesgo absoluto concentra es VNI_3 para puentes vehiculares, y PLS_1 para puente peatonales.

4. Las tipologías constructivas que mayor riesgo relativo presentan son en su orden VNI_1, VNI_3 y VNI_2 para puentes vehiculares, y PAA_1 y PNI_3 para puente peatonales.

5. La pérdida anual esperada absoluta de los puentes tipo VNI_3 es de COP$4,579 millones, lo que representa aproximadamente el 50% de la pérdida anual esperada de todo el portafolio de puentes.

6. El riesgo sísmico absoluto se concentra en la localidad Barrios Unidos de Bogotá en la cual se presentan las siguientes tipologías dominantes PPB_1, PLS_1, VLS_1, VBC_1 y VNI_3. Para esta localidad se obtuvo una pérdida anual esperada de COP$2,025 millones, correspondientes al 4.24‰ del valor total expuesto del portafolio de la localidad y al 22% de la pérdida anual esperada absoluta para todo el portafolio.

7. El riesgo sísmico relativo se concentra en las localidades de Chapinero y Barios Unidos con pérdidas anuales al millar de 5.29‰ y 4.24‰ de los portafolios de cada localidad.

Sobre el plan de mitigación del riesgo sísmico

1. El plan de mitigación del riesgo sísmico incluye la propuesta de los siguientes cuatro programas:
    - Programa No. 1: *Intervención de puentes vehiculares*: este programa pretende reducir el riesgo de puentes vehiculares con susceptibilidad media a sufrir daños debido a que presentan algunas deficiencias localizadas que pueden solucionarse. Con las intervenciones propuestas los puentes cumplirían los requisitos básicos de seguridad y funcionalidad de la normativa sismo resistente.
    - Programa No. 2: *Intervención de puentes peatonales*: Este programa pretende intervenir los puentes peatonales con susceptibilidad media a sufrir daños debido a que presentan algunas deficiencias localizadas que pueden solucionarse.
    - Programa No. 3: *Demolición y sustitución de puentes vehiculares*: este programa se plantea con el fin de sustituir los puentes vehiculares de alto potencial de colapso no susceptibles de intervención debido a problemas de funcionalidad o a deficiencias significativas en la conceptualización estructural o en el estado del mismo.
    - Programa No. 4: *Demolición y sustitución de puentes peatonales*: este programa se plantea con el fin de sustituir los puentes peatonales de alto potencial de colapso no susceptibles de intervención debido a problemas de funcionalidad o a deficiencias significativas en la conceptualización estructural o en el estado del mismo.

2. La estimación inicial de recursos financieros requeridos para la implementación de los primeros dos programas (a nivel de prefactibilidad) son los siguientes:

- Programa No. 1: COP $ 42,665 millones
- Programa No. 2: COP $ 6,550 millones

El valor total requerido para implementar los programas es del orden de los COP $ 49,215 millones, donde se tienen en cuenta los costos de todos los puentes que requieren intervención de acuerdo con el análisis realizado. Los programas planteados comprenden la realización de obras para el reforzamiento y/o rigidización de los puentes que presenten deficiencias específicas en su concepción estructural básica, con el fin de reducir la vulnerabilidad sísmica del portafolio de puentes del Distrito. Estos costos solo representan estimativos gruesos de costos de intervención valorados mediante precios unitarios y cantidades de obra considerando un gran número de intervenciones contratadas simultáneamente. No tienen en cuenta además costos indirectos, costos administrativos, de control y contratación, costos asociados a diseños, licencias y supervisión de obras, posibles ampliaciones o cambios en la geometría, trabajos complementarios de reparación o mantenimiento diferentes a las intervenciones indicativas propuestas, o trabajos adicionales que surjan como consecuencia de llevar a cabo dichas intervenciones. Tampoco incluye posibles variaciones en costos del mercado por ejemplo debidas la ocurrencia de un siniestro que genere escasez de recursos o sobre costos asociados a las condiciones de oferta y demanda.

3. La eventual implementación de las medidas de intervención propuestas genera una reducción efectiva del riesgo de acuerdo con lo siguiente: la PAE se reduce de COP$9,240 millones a COP$4,917 millones con una reducción efectiva del 47%. Por su parte la pérdida máxima probable, PMP, para 1000 años de periodo de retorno se reduce de aproximadamente COP$730,000 millones a COP$495,000 millones con una reducción efectiva del 32%.

4. Se establece un plan de priorización de intervenciones a partir la malla vial en la que se encuentra ubicado, el indicador E/C, el estado estructural y la calificación de estado de servicio. Al Programa No. 1 debe dársele prioridad debido a su mayor eficiencia en la reducción del riesgo.

5. El tiempo estimado para la implementación del programa, suponiendo alta prioridad por parte del Gobierno nacional y local y considerando disponibilidad presupuestal en un periodo de un año, es del orden de 4 años.

<u>Sobre la estrategia de protección financiera del portafolio de puentes de la ciudad</u>

1. La estrategia propuesta para la protección financiera del portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá se basa en el concepto de estratificación del riesgo, el cual permite establecer las siguientes capas:
   - Capa de pérdidas bajas y alta recurrencia
   - Capas de pérdidas intermedias de recurrencia intermedia
   - Capas de pérdidas altas de muy baja recurrencia

2. Las capas inferiores (con alta frecuencia de ocurrencia) se pueden dimensionar con base en los eventuales deducibles establecidos en las pólizas de seguros. Considerando que este se puede estimar como el 1% del valor asegurable, esta capa resulta con un valor aproximado en los US$13 millones.

Los instrumentos para la protección financiera que deben considerarse para contar con estos recursos son:

- Fondos de reserva para emergencias o fondos de calamidad
- Créditos para emergencias
- Contingencias presupuestales
- Líneas de crédito contingente en el mercado financiero local

3. Las capas intermedias (con frecuencia media de ocurrencia) corresponden usualmente al riesgo comprendido entre el deducibles y los límites establecidos en los programas de seguros y reaseguros. Para el portafolio de puentes de la ciudad y tomando como referencia la PMP correspondiente a 1000 años de periodo de retorno, el límite superior de esta capa puede estar alrededor de los US$240 millones. Los instrumentos para la protección financiera que deben considerarse para contar con estos recursos son:
    - Aseguramientos paramétricos
    - Seguros indemnizatorios

4. Las capas altas del riesgo (baja frecuencia de ocurrencia) corresponde al riesgo de pérdidas superiores a los valores de PMP establecidos, que en el presente caso corresponderán a valores por encima de los US$240 millones hasta los US$300 millones en pérdidas (valor máximo asegurable). Por tratarse de escenarios catastróficos extremos, los instrumentos para la protección financiera que deben considerarse para contar con estos recursos son:
    - Bonos de catástrofe de la Nación
    - Fondos de reserva, impuestos y otros recursos del Gobierno Nacional
    - Línea de crédito contingente catastrófica

5. En general pérdidas superiores a los valores de PMP tienen una probabilidad de ocurrencia muy baja por lo cual en muchos casos se quedan sin protección. Esto significa que en últimas el Gobierno Nacional y Distrital terminarían generando una protección indirecta para estas capas de riesgo.

10.2 RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS

A continuación, se presentan las principales recomendaciones derivadas de las actividades desarrolladas en este estudio:

Con respecto al sistema de información geográfica y base de datos:

1. Conformar un equipo técnico en el IDU que permita mantener actualizada la base de datos en términos de software y desarrollos tecnológicos, sistemas de cómputo e información contenida en la misma.

2. Actualizar y complementar la información requerida del inventario para nuevos puentes construidos o puentes que no se encontraran en la base de datos hasta el momento.

3. Mantener actualizada la base de datos en cuanto a información de la calificación del estado de los puentes, las obras de intervención que se realizan en cada estructura y la priorización para futuras intervenciones de mantenimiento.

4. Posterior a la implementación en la base de datos corporativa por parte del área de sistemas de la entidad, se proceda con la socialización de la base de datos y su incorporación a los procesos de consulta tanto de usuarios internos como externos. Esto permitirá que, con un adecuado seguimiento y acompañamiento, se consolide el gobierno de la información geográfica y alfanumérica asociada a puentes y se fortalezca la cultura institucional en el manejo, tratamiento y disposición de los datos geográficos estratégicos de la entidad. Cabe resaltar que la Entidad deberá seleccionar en este caso, el tipo o cantidad de la información a hacer pública, y mantener como privada o confidencial en los casos que así se requiera por motivos de seguridad u otros.

5. Formulación, diseño e implementación de un geovisor corporativo para puentes, que por medio de la asignación de roles permita la relación de consultas y despliegue de información asociada a éstos. Así mismo, este visor podría implementarse con acceso a los operativos de inspección y mantenimiento por parte de futuros contratistas o profesionales de la entidad, de tal forma, que permita su actualización básica y/o reporte en línea. También se deberá conformar un equipo de trabajo idóneo, con la asesoría de especialistas en ingeniería estructural y sistemas de información geográfica, con el fin de verificar la información, resultados y análisis de estos.

<u>Con respecto a la información técnica que da soporte a la actualización de estudios técnicos:</u>

1. Implementar y actualizar la base de datos geotécnica en la ciudad con información de perfiles de suelos profundos en las zonas donde se desarrollen nuevos proyectos de puentes o que resulten de cualquier otro proyecto de desarrollo urbano. La información mínima requerida que debe contener cada perfil típico de suelo para que sean útiles dentro de la metodología desarrollada en el presente estudio, es la siguiente:
    - Perfil de velocidad de onda cortante (Vs), hasta una profundidad mínima de 30 metros o hasta que se encuentre el basamento rocoso (Vs > 760 m/s).
    - Caracterización geotécnica de los parámetros estáticos en profundidad incluyendo densidades húmedas, índices de clasificación del suelo (Limites de Atterberg) y demás parámetros o medidas de resistencia al corte y compresibilidad del suelo (SPT, CPT, compresión inconfinada, relación de vacíos, ángulo de fricción, etc.).
    - Descripción y estratigrafía continúa en profundidad de los diferentes estratos que componen el suelo.
    - Caracterización geotécnica dinámica de los depósitos de suelo incluyendo ensayos triaxiales, ensayos de columna resonante, corte directo, “Bender Element”, y cualquier otro ensayo que permita medir la rigidez a cortante y el amortiguamiento asociado a deformaciones a cortante.

2. Llevar a cabo una interpretación detallada de los registros acelerográficos disponibles en equipos instalados en los puentes para eventos sísmicos recientes que hayan generado intensidades importantes. Esta información resulta fundamental para entender la respuesta sísmica de los puentes de la ciudad.

3. Actualizar los estudios de amenaza y respuesta dinámica del subsuelo periódicamente en la medida que:
    - Se actualicen los estudios de amenaza sísmica generales del país o de la ciudad.
    - Se cuente con información de mayor calidad y cantidad en cuanto a los perfiles de suelo característicos de la ciudad.
    - Se lleven a cabo actualizaciones en los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad o el código de diseño sísmico de puentes.

4. Realizar en el futuro caracterizaciones geotécnicas más amplias en la ciudad que permitan entre otras cosas generar recomendaciones específicas referentes a:
    - Tipos de cimentaciones en función al tipo de puente y la zona geotécnica de la ciudad.
    - Posibilidad de asentamientos de largo plazo e implicaciones en el diseño.
    - Posibilidad de efectos de licuefacción del terreno y posibles medidas preventivas en el diseño de las cimentaciones.
    - Otros efectos de la geotecnia en el comportamiento estructural de los puentes de la ciudad.

<u>Con respecto a la metodología propuesta para la inspección y calificación del estado de los puentes:</u>

1. Desarrollar un programa periódico de inspección de puentes que permita mantener actualizada la información del estado de los mismos. Se recomienda realizar inspecciones básicas anuales. El orden en que deberán hacerse estas inspecciones básicas anuales no necesariamente debe definirse a partir de la priorización entregada en esta Consultoría, sino dependerá en mayor medida de la logística y distribución geográfica para realizar de manera más eficiente las visitas.

2. Se recomienda incorporar a la base de datos los nuevos puentes que se construyan en la ciudad, no sólo a partir de los planos, sino también con base en visitas de inspección que se realicen una vez estos entren en servicio.

3. Se recomienda que después de realizar reparaciones y labores de mantenimiento estructural o de servicio a un puente, se realice la actualización de la base de datos geográfica, con el fin de mantener actualizado el orden de priorización de atención y poder realizar un seguimiento efectivo.

4. Se debe garantizar que las personas encargadas de realizar las inspecciones por parte del IDU tenga conocimiento y experiencia en la evaluación de patologías, y que de manera obligatoria sean capacitadas y estén plenamente familiarizadas con el uso y aplicación de la metodología.

5. Desarrollar una aplicación computacional que permita:
    - Subir a la base de datos los resultados del levantamiento geométrico de puentes.

- Determinar de manera automática la evaluación del estado estructural y de servicio de los puentes inspeccionados. Esta actividad deberá contar con la supervisión o acompañamiento de un especialista en ingeniería estructural, con el fin de validar la información ingresada, y los resultados generados en la automatización.
- Priorizar la asignación de recursos para mantenimiento, conservación, habilitación y/o reforzamiento de los puentes. Esta priorización debe estar basada en el estado estructural y de servicio de los mismos, y también de acuerdo a los diferentes criterios que sean propuestos al interior de la Entidad.

6. Implementar un sistema de monitoreo de los puentes de la ciudad de Bogotá que de alertas a la Entidad de tal manera que se programen de manera prioritaria las visitas de inspección. Este sistema de monitoreo debe incluir todos los puentes en el inventario, y podrá considerar atributos existentes o adicionales a la base de datos para servir como criterio de priorización (malla vial, tamaño del puente, tráfico promedio diario, entre otros) según la necesidad o interés de la Entidad.

7. Adaptar esta metodología para la implementación de un procedimiento de evaluación de puentes post desastre que permita realizar la evaluación de daños en puentes después de un evento catastrófico como sismo, inundación, deslizamiento o explosión.

<u>Con respecto a la valoración económica de puentes</u>

1. Complementar los análisis estadísticos de cantidades de puentes para los capítulos de superestructura, subestructura y cimentación mediante la exigencia del diligenciamiento de las hojas de cálculo de cantidades a los contratistas de nuevos proyectos de construcción de puentes.

2. Complementar los análisis estadísticos de distribución de costos por capítulo para los presupuestos de obra nueva mediante el seguimiento a proyectos de construcción de puentes por parte de funcionarios del IDU.

3. Utilizar los valores obtenidos del programa de cálculo como valores de referencia con un rango de costo probable para estudios de pre-factibilidad; no se puede definir un valor determinista del costo de reposición/reparación de puentes debido a las variaciones inherentes proyecto a proyecto que pueden existir.

4. Con el fin de mejorar de forma continua el modelo de valoración económica, y dada la flexibilidad de la hoja de cálculo desarrollada, se recomienda al IDU alimentar sus bases de datos de entrada de forma que las estadísticas utilizadas consideren los proyectos de construcción más recientes, además de la base de datos base desarrollada en el contexto de este contrato. El proceso de actualización de estas bases de datos se encuentra descrito en el manual de usuario adjunto dentro de los entregables del presente proyecto. Por consiguiente, se recomienda al IDU solicitar a los contratistas de futuros proyectos de construcción la siguiente información:
    - Cantidades de concreto, acero de preesfuerzo, acero de refuerzo y acero estructural de los elementos de superestructura, vigas cabezales, pilas y/o pantallas, rampas peatonales, dados

de cimentación, pilotes de cimentación, zapatas, estribos, llaves y topes sísmicos y barandas, por ejes o luces dependiendo del caso particular.

- Características geométricas generales de los puentes como su uso, gálibo, zona de microzonificación, tipo de conexión entre de la superestructura y la subestructura, continuidad de la superestructura, tipos de materiales, número de luces, longitudes, ancho del tablero, área en planta, código de construcción, número de carriles, espesor de capa de rodadura, y cantidad de barandas o new jerseys.
- El costo final del contrato de construcción y los costos de los capítulos de diseño, preliminares, pavimentos, espacio público, estructura, redes, gestión ambiental/social/tráfico, A.I.U, y demás costos que no se puedan incluir dentro de los anteriores.

Con respecto a la vulnerabilidad sísmica de los puentes de la ciudad

1. Solicitar a los contratistas información detallada de los diseños de puentes nuevos y los levantamientos de puentes existentes que se hagan como parte de planes de intervención. La información a solicitar comprende planos definitivos de diseño, construcción, y planos récord, y la toma de características estructurales a partir de estos planos, que son atributos de la base de datos, cómo materiales de los elementos, presencia de llaves de cortante y topes sísmicos, tipologías de los apoyos intermedios, tipología de las vigas, secciones transversales de los elementos, tipo de conexión entre la superestructura y la subestructura, tipo de juntas de dilatación, entre otros. Esta información debería integrarse a la base de datos actual, y se deberá contar con la asesoría de un especialista en ingeniería estructural para verificar la información recopilada de planos y las interpretaciones de lectura de planos que sean requeridas.

2. Desarrollar mapas en tiempo real del movimiento del terreno a partir de la información registrada por la red de acelerógrafos instalada en la ciudad, y el nivel de daño esperado en los puentes de la ciudad mediante las funciones de vulnerabilidad, que permitan priorizar y direccionar los recursos disponibles para atender una emergencia en los minutos después de un evento sísmico a través de simulaciones rápidas y pos-procesamiento de la anterior información.

3. Desarrollar una App de reporte ciudadano de problemas en los puentes de la ciudad en condiciones normales o después de un desastre.

4. Conducir un programa experimental para caracterizar el comportamiento de los componentes más representativos de los puentes de Bogotá; dentro de este programa también se evaluaría la eficacia de las opciones de reforzamiento o reparación que usualmente se proponen. El resultado de este estudio permitiría evaluar el comportamiento de detalles estructurales (anchos de silla, dimensiones y cuantías de refuerzo de topes sísmicos, refuerzo longitudinal y transversal de columnas, entre otros) y prácticas constructivas que se usan en Colombia y que no son muy comunes en otros países.

5. Desarrollar modelos no-lineales detallados de los puentes más importantes de la ciudad. El desarrollo de estos modelos implicaría la extracción de muestras para medir propiedades de los materiales, escaneo del refuerzo de cada componente, planos detallados de las conexiones, etc. Estos modelos no lineales se utilizarían para complementar o actualizar las funciones de vulnerabilidad de las tipologías

de puentes, considerando un nivel de detalle mayor para la modelación de conexiones, refuerzo, propiedades de los materiales, entre otros.

Con respecto a la evaluación del riesgo sísmico y sus aplicaciones

1. Realizar la actualización de los estudios de riesgo cuando se presente información más actualizada que amerite el reproceso de la misma, incluyendo amenaza sísmica, información de los depósitos de suelos, actualización en la base de datos de puentes o metodologías modernos de análisis.

2. Evaluar, revisar y poner en marcha el Plan de Mitigación del Riesgo Sísmico de los puentes de la ciudad, empezando con cualquiera de los cuatro (4) programas propuestos que incluyen reforzamientos y sustitución de puentes vehiculares y peatonales.

3. Renovar la póliza de seguro catastrófico utilizando los resultados del presente estudio. Negociar con las compañías de seguros los valores de primar cobradas en función del estado y salud del portafolio de puentes.

4. Evaluar e implementar las recomendaciones para una adecuada protección financiera de la infraestructura de puentes.

5. Como recomendación final se establece que el Instituto de Desarrollo Urbano, como responsable de la infraestructura urbana de la ciudad y en particular de los puentes, debe contar con una Estrategia de Gestión Financiera de Riesgo de Desastres (GFRD) de manera articulada con la estrategia del nivel nacional liderada por el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (MHCP). Como objetivos específicos de dicha estrategia a nivel nacional se establecen los siguientes: a) Identificación y entendimiento del riesgo fiscal debido a la ocurrencia de desastres; b) Gestión financiera del riesgo de desastres (GFRD) para el sector público y privado; y c) Aseguramiento del riesgo catastrófico de los activos públicos. Los resultados presentados a lo largo de este estudio conforman las bases técnicas para el diseño e implementación de la estrategia que permitirá en el mediano plazo una reducción efectiva del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad.

10.3 RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN GENERAL DE LOS PUENTES DE LA CIUDAD

Se plantean los siguientes proyectos específicos que permitirían orienta un plan general para la Gestión de la Infraestructura de los Puentes de la ciudad:

1. Elaboración de un plan general para la gestión de la infraestructura de puentes de la ciudad.

2. Estandarización óptima para el diseño de nuevos puentes urbanos para la Ciudad de Bogotá. A través de la estandarización del diseño de puentes y sus especificaciones técnicas, se pretende identificar que diseños de puentes son más óptimos para ser desarrollados en la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta la resiliencia sísmica, la eficiencia constructiva, el mantenimiento, entre otros aspectos, con el fin de

que el IDU desarrollo un "know how" que le permita no solo definir los parámetros necesarios para el diseño y construcción de nuevos puentes, sino además le permita ser más eficiente en el mantenimiento y evaluación de estos puentes. Se espera que al desarrollar este proyecto, el IDU se convierta en un referente a nivel nacional y Latinoamericano en el diseño, construcción, mantenimiento y evaluación de puentes estándares, minimizando los sobrecostos que se tienen en estas actividades gracias a la reducción de la incertidumbre que genera el desarrollo de esta iniciativa.

3. Desarrollo de mapas de amenaza sísmica y otros aspectos reglamentarios para el diseño de puentes de acuerdo con la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-2014). Teniendo en cuenta la última versión de CCP (2014), se hace necesario definir varios aspectos de orden normativo y técnico, que son responsabilidad de la entidad contratante de los diseños y construcción de los puentes, como lo es el IDU en la cuidad de Bogotá. Dentro de los aspectos necesarios que garanticen un diseño adecuado desde el punto de la sismorresistencia, se tiene que dado al avance en la amenaza sísmica que ha tenido el IDU, se defina para uso por parte de los contratistas del gobierno local, mapas de amenaza sísmica para el diseño de puentes críticos, esenciales y otros, tal como lo define el numeral 3.10.5 del CCP-2014. Además, se pretende proponer mapas de diseño que no solo cubran puentes convencionales, sino también puentes que se definan cómo críticos para la cuidad, basado en una metodología, que será parte del desarrollo de esta iniciativa. Se espera que este proyecto específico, minimice o reemplace estudios particulares de sitio (numeral 3.10.2.2 del CCP-2014), ya que se propone desarrollar una plataforma gráfica que permita visualizar en la cuidad de manera gráfica y a través de una aplicación o página web, las características para el diseño sísmicos de los puentes para la cuidad de Bogotá. Por último, se pretende adelantar una revisión normativa del CCP-2014, para que el IDU no solo conozca los aspectos normativos que deberá reglamentar, sino también se tomen medidas y soluciones para definir estos aspectos que pueden ser mal interpretados y que pueden generar futuros problemas contractuales de índole técnico-legales.

4. Sistema para evaluación post-desastres de los puentes de Bogotá La infraestructura de los puentes de la cuidad de Bogotá, deberá ser rápidamente evaluada una vez suceda una catástrofe tales como sismos fuertes, inundaciones, explosiones terroristas, etc. Por lo anterior, y dado el desarrollo tenido recientemente en la evaluación y diagnóstico de los puentes, el cual está enfocado al mantenimiento, se propone dar un paso adelante en la evaluación, desarrollando una metodología que permita ser implementada y desarrollada, para que ingenieros (no necesariamente del IDU), puedan realizar la evaluación y se puedan tomar decisiones de manera rápida por parte de las autoridades. Para esto no solo se desarrollará la metodología, sino se desarrollará una aplicación para ser usada en dispositivos móviles, para que el diagnóstico pueda ser realizado de una manera ágil y progresivamente rápida. Esta iniciativa contará con un plan de capacitación a nivel local, con el fin de preparar capacitadores, que permitan generar todo un plan de capacitación, necesario para atender diferentes escenarios catastróficos. Además, se proporcionarán una serie de medidas para que el IDU, pueda evaluar y tomar en el caso de la atención de los desastres.

5. Diseño de puentes prototipo para la ciudad de Bogotá, cantidades de obra, presupuestación, especificaciones técnicas de referencia.

6. Guía para el reforzamiento sísmico de puentes urbanos en Bogotá.

7. Guía para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes urbanos en Bogotá.

8. Guía para el diseño de cimentaciones de puentes urbanos en la ciudad de Bogotá.

9. Sistema para la inspección y calificación del estado de los puentes de Bogotá y priorización y especificación de las intervenciones.

10. Investigación experimental para caracterizar el comportamiento sísmico de componentes estructurales representativos de los puentes de la ciudad y recomendaciones para su utilización en puentes nuevos o en el reforzamiento de puentes: columnas con diferentes niveles de diseño, neoprenos, aisladores, llaves de cortante, espaldares en estribos,

11. Priorización de inversión en rehabilitación de puentes para maximizar la funcionalidad de la red vital después de un sismo: esto requeriría trabajo en conjunto con el grupo de transporte para poder cuantificar los efectos de rehabilitar un puente en términos del tráfico en la ciudad. La motivación es que no siempre es más eficiente destinar recursos a los puentes más dañados (o los más grandes) sino rehabilitar parcialmente muchos pequeños con el objetivo de evitar caos en la movilidad de la ciudad.

12. Desarrollo de un sistema de alerta para mantenimiento preventivo para los puentes de Bogotá. Considerar el estado actual de los puentes de la red vital desde el punto de vista de vida útil remanente (habría que incluir el análisis del ciclo de vida) y desarrollar un método que le diga al distrito cuando debe sacar un proyecto de mantenimiento preventivo para cada puente en la ciudad.

13. Métodos de reforzamiento y rehabilitación estándar para los puentes de Bogotá. Similar a la motivación de la cartilla de puentes prototipo, pero con un nivel de urgencia mayor para la ciudad dado que la mayoría de los puentes ya existen. El objetivo sería identificar la mejor forma de mejorar cada una de las vulnerabilidades que ya se identificaron en los puentes de la ciudad y definirla técnicamente y presupuestarla, de tal manera que el distrito tenga completo dominio de los trabajos a contratar específicamente cuando existan licitaciones de reforzamiento. De esa manera se tiene control sobre el presupuesto, se minimiza la probabilidad de adiciones, y se evita que el contratista proponga una solución que pueda ser económicamente buena para él, pero no la mejor para el Distrito.

11 REFERENCIAS

Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 23-44.

Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula log N = a - bM and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 237-239.

AON Risk Services. (2003). *Análisis de PML terremoto y terrorismo.* Bogotá.

Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica AIS. (2009). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia de 2009.* Bogotá.

ATC. (2009). *Quantification of building seismic performance factors - Fema P695.* Federal Emergency Management Agency.

Aviram, A., Mackie, K., & Stojadinovic, B. (2008). *Guidelines of Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California.* PEER Report.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). *Instrumento de financiamiento contingente.* Washington D.C.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., & Augliera, P. (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 using the RESORCE dataset. *Bulleting of Earthquake Engineering*, 391-430.

Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemestry, Geophysics, Geosystems.*

Bruneau, M., Anagnostopoulou, M., & Palermo, A. (2010). Preliminary Report on Bridge Damage from the Darfield (New Zealand) M7.1 earthquake of September 4, 2010.

Caterino, N., Maddaloni, G., & Occhiuzzi, A. (2014). Damage analysis and seismic retrofitting of a continuous prestressed reinforced concrete bridge.

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1583-1606.

Cummins, J. a. (2009). *Catastrophe Risk Financing in Developing Countries: Principles for Public Intervention: The World Bank.* Washington, DC.

D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Crowley, H., & Silva, V. (2013). *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment - Low/Mid-Rise.* GEM Technical Report. doi:https://doi.org/10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12

Departamento de Antioquia, S. d. (1972). *Modelos de puentes.* Medellin.

Desroches, R., Padgett, J., Ramanathan, K., & Dukes, J. (2012). *Feasibility Studies for Improving Caltrans' Bridge Fragility Relationships Final Report.* State of California Department of Transportation.

Federal Highway Administration. (2011). Post-Earthquake Reconnaissance Report on Transportation Infrastructure: Impact of the February 27, 2010, Offshore Maule Earthquake in Chile.

FHWA. (2006). *SEISMIC RETROFITTING MANUAL FOR HIGHWAY STRUCTURES: PART 1 – BRIDGES - FHWA-HRT-06-032.* Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research,

University at Buffalo, State University of New York. Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration.

Forbes. (27 de Enero de 2014). ¿Qué es un bono catastrófico? *Forbes*, https://www.forbes.com.mx/que-es-un-bono-catastrofico/.

Ghesquiere, F. a. (2010). *Financial protection of the state against natural disasters: a primer: The World Bank.* Washington, DC.

Herrera, C. (2017). *Evaluación probabilista de la amenaza sísmica para Colombia - Revisión crítica.* Bogotá: Universidad de los Andes.

Hube, M., MArtínez, A., & Rubilar, F. (2017). *Experimental Behavior of Elastomeric Bearings and Seismic Bars of Simply Supported Chilean Bridges.*

IGAC. (1997). *Guía metodológica para la obtención de alturas sobre el nivel medio del mal utilizando el sistema GPS.* Bogotá, D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, División de Geodesia, Subdirección de Geografía y Cartografía.

Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. (2018). *Subduciton Zone*. Obtenido de http://diss.rm.ingv.it/diss/index.php/help/58-definition-of-subduction-source

Insurance Information Institute. (2010). *Insurance Handbook.* New York.

J. Ghosh, J. E. (2011). Probabilistic Seismic Loss Assessment of Aging Bridges Using a Component-Level Cost Estimation Approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics (40)*, 1743-1761.

Khalili-Tehrani, P., Shamsabadi, A., Stewart, J., & Taciroglu, E. (2016). Backbone curves with physical parameters for passive lateral response of homogeneous abutment backfills. *Bulletin of Earthquake Engineering, 14*(11), 3003-3023.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering.* Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc.

Mackie, K. (2008). *Post-Earthquake Bridge Repair Cost Evaluation Methodology*. The Sixth National Seismic conferenec on Bridges Y Highways.

Mackie, K. R. (2008). *Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced-Concrete Bridges* . Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

MAPFRE. (2018). *Seguros y pensiones para todos*. Obtenido de https://segurosypensionesparatodos.fundacionmapfre.org/syp/es/seguros/definicion-seguro-asegurar/el-seguro/

Megally, S., Silva, P., & Seible, F. (2002). Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments.

Ministerio de hacienda y crédito público. (2013). *Colombia: Lineamientos y objetivos para el reaseguramiento de los bienes fiscales ante la ocurrencia de desastres por fenómenos de la naturaleza.*

Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Dirección General de Crédito Público y Tesoro Nacional, Subdirección de Riesgo. (2012). Obtenido de http://www.minhacienda.gov.co/HomeMinhacienda/ShowProperty?nodeId=%2FOCS%2FP_MHCP_WCC-059133%2F%2FidcPrimaryFile&revision=latestreleased

Moehle, J., & Eberhard, M. (2000). Earthquake Damage to Bridges. *Bridge Engineering Handbook.*

Omrani, R., Mobasher, B., Liang, X., Gunay, S., Mosalam, K., Zareian, F., & Taciroglu, E. (2015). *Guidelines for Nonlinear Seismic Analysis of Ordinary Bridges: Version 2.0.* Caltrans Final Report No. 15-65A0454. doi:https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4946.6648

Ordaz, M. (2000). *Metodologías para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto.* México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Ordaz, M., Aguilar, A., & Arboleda, J. (2007). CRISIS2007. Ciudad de México, México.

Ospina, J. E. (2018). Comunicación personal.

Pacific Northwest Seismic Network PNSN. (2018). *Crustal Faults*. Obtenido de https://pnsn.org/outreach/earthquakesources/crustalfaults

Ramanathan, K., DesRoches, R., & Padgett, J. (2010). Analytical Fragility Curves for Multispan Continuous Steel Girder Bridges in Moderate Seismic Zones. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2202*, 173-182. doi:https://doi.org/10.3141/2202-21

Reasenberg, P. (1985). Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982. *Journal of geophysical research*, 5479-5495.

Schnabel, P. B., Lysmer, J., & Seed, H. B. (1972). SHAKE a Computer Program for the Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. University of California, Berkeley: EERC report 72.

Servicio Geológico Colombiano. (04 de 2018). *Consulta Catálogo Aceleraciones*. Obtenido de https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/consulta-aceleraciones.aspx

Servicio Geológico Colombiano. (04 de 2018). *Portal Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/Geociencias/Paginas/MapaGeologico.aspx

Servicio Geológico Colombiano SGC. (06 de 2017). *Visor catálogo sísmico*. Obtenido de http://catalogosismico.sgc.gov.co/VisorCatalogoSismos/mapa.html

Swiss Re. (Agosto de 2018). *What is parametric insurance?* Obtenido de https://corporatesolutions.swissre.com/insights/knowledge/what_is_parametric_insurance.html

The World Bank. (09 de Julio de 2017). *Cat DDOs: More than emergency lending for desaster relief*. Obtenido de https://blogs.worldbank.org/taxonomy/term/16900

Tobón, A. M. (2017). *Active plate tectonics and main fault systems in Colombia for probabilistic seismic hazard applications.* Bogotá: Universidad de los Andes.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia. (2016). *Guía de aseguramiento. Bienes inmuebles públicas y la transferencia del riesgo.* Bogotá.

United States Geological Survey USGS. (2018). *Earthquake Glossary*. Obtenido de https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=subduction%20zone

United States Geological Survey USGS. (05 de 2018). *Earthquake Hazards Program*. Obtenido de https://web.archive.org/web/20060420131956/http://earthquake.usgs.gov/learning/topics/mag_vs_int.php

United States Geological Survey USGS. (2018). *ShakeMap*. Obtenido de https://earthquake.usgs.gov/data/shakemap/

Universidad de los Andes. (2016). *Evaluación del riesgo sísmico de los puentes vehiculares y peatonales de la ciudad de Bogotá y definición de estrategias de gestión del riesgo.* Bogotá.

Vamvatsikos, D., & Allin Cornell, C. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31*(3), 491-514. doi:https://doi.org/10.1002/eqe.141

Williamson, E. B., Bayrak, O., Davis, C., & Williams, D. (2011). *Performance of Bridge Columns Subjected to Blast Loads. II: Results and Recommendations.*

Yamin, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Colombia.* Bogotá: Banco Mundial.

Yamin, L. E., Reyes, J. C., Rueda, R., Prada, E., Rincón, R., Herrera, C., . . . Riaño, A. C. (2018). Practical seismic microzonation in complex geological environment.

Yamin, L., Huertado, A., Barbat, A., & Cardona, O. (2014). Seismic and wind vulnerability assessment for the GAR-13 global risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 10*(PB), 452-460. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.05.007

Yamin, L., Hurtado, A., Rincón, R., Dorado, J., & Reyes, J. (2017). Probabilistic seismic vulnerability assessment of buildings in terms of economic losses. *Engineering Structures, 138*, 308-323. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.013

Zakeri, B., Padgett, J., & Amiri, G. (2014). Fragility Analysis of Skewed Single-Frame Concrete Box-Girder Bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 28*(3), 571-582. doi:https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000435

Zakeri, B., PAdgett, J., & Amiri, G. (2015). Fragility assessment for seismically retrofitted skewed reinforced concrete box girder bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 29*(2), 1-12. doi:https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000502