

BOLETÍN TÉCNICO No 05

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LOS PUENTES DEL DISTRITO.



JUNIO 2019

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO URBANO
DIRECCIÓN TÉCNICA ESTRATÉGICA

CONTENIDO

1. Introducción
2. Marco Conceptual
3. Definiciones
4. Evaluación probabilista del riesgo del portafolio de puentes del Distrito
5. Vulnerabilidad sísmica de puentes
6. Riesgo sísmico para el portafolio general de puentes
7. Conclusiones

Yaneth Rocío Mantilla Barón
Directora General

William Orlando Luzardo Triana
Subdirección General de Desarrollo Urbano

Joanny Camelo Yépez
Dirección Técnica Estratégica

Equipo de la Dirección Técnica Estratégica

Vicente Edilson Leal Moreno
Nattalia Romero Hermosilla
Oscar Mauricio Velásquez Bobadilla
Yuly Caterin Díaz Jimenez

Calle 22 # 6-27
Sede alterna: Calle 20 No. 9-20
Código postal: 110311
Teléfono: (571) 338 6660

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 el primer paso hacia una evaluación rigurosa del riesgo. Por otro lado, la caracterización de la exposición pretende identificar los componentes de infraestructura o 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.

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.

2. MARCO CONCEPTUAL

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 contrato de consultoría IDU-1556-2017, se utilizó 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 tienen 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 según sus 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 ilustra el enfoque metodológico propuesto.



Figura 1. Metodología riesgo sísmico

3. DEFINICIONES

Se presenta a continuación la definición de las principales métricas de riesgo sísmico utilizadas:

- **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.
- **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. En términos relativos la PAE se expresa como una fracción al millar (‰) del valor expuesto de los componentes del modelo de exposición.
- **Pérdida Máxima Probable (Por sus siglas en inglés - 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. El valor de PML se puede expresar en términos relativos con respecto al valor expuesto del portafolio analizado.
- **Periodo de retorno:** corresponde al número promedio de años entre eventos de una intensidad determinada.
- **Resiliencia:** es la capacidad de recuperación de la funcionalidad de un sistema en el tiempo ante una perturbación.

4. EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO DEL PORTAFOLIO DE PUENTES DEL DISTRITO

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.

4.1. AMENAZA SÍSMICA

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, $S_a(T)$. 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 Figura 2 presenta de manera simplificada los pasos de la metodología para el análisis probabilista de amenaza sísmica en cada punto de la zona de interés.

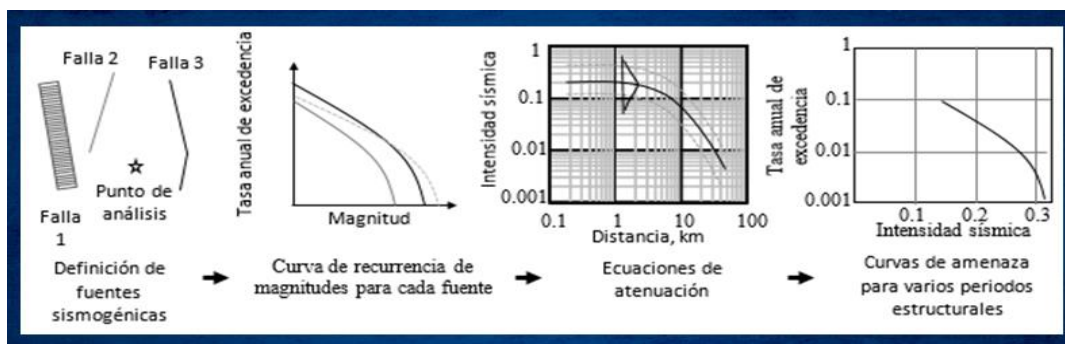


Figura 2. Metodología del análisis probabilista de amenaza sísmica

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.

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 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 y la Figura 4 presentan las fuentes sismogénicas corticales y las zonas de subducción definidas para el presente estudio respectivamente.

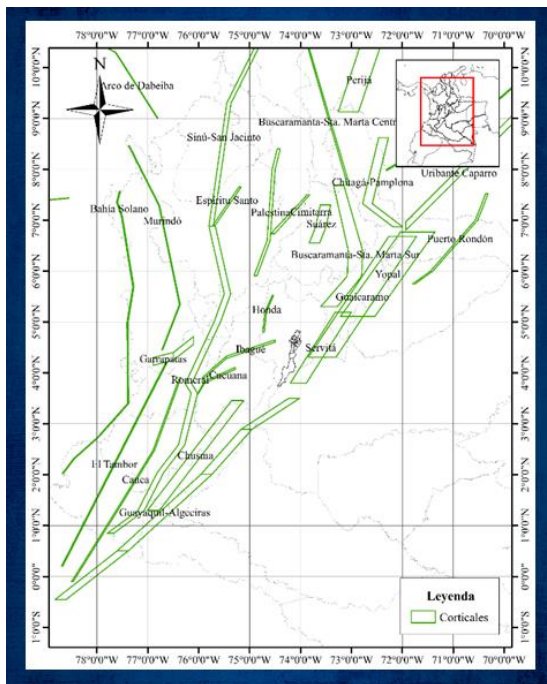


Figura 3. Zonas sismogénicas corticales

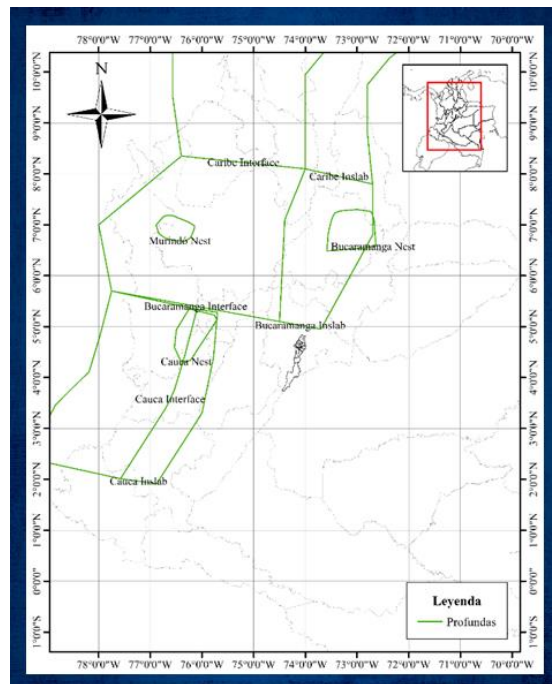


Figura 4. Zonas sismogénicas de subducción

4.2. BASE DE DATOS DE EXPOSICIÓN.

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. El portafolio actual de puentes corresponde a 959 puentes. 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

La infraestructura de puentes expuesta a la amenaza es categorizada a través de las tipologías estructurales asignadas con base en el uso principal del puente: Vehicular o Peatonal. No obstante, dentro de la base de datos se encontraron estructuras que pueden no ser consideradas puentes como son los Túneles y las Alcantarillas, clasificados bajo el uso Otros. Se excluyen además los puentes clasificados como artesanales puesto que no es posible garantizar que su diseño ingenieril provea una adecuada resistencia de cargas. Estos se clasifican igualmente bajo el uso Otros. La base de datos de exposición final está representada por los parámetros indicados en la Tabla 1.

La Figura 5 presenta el resumen de la exposición en formato gráfico.

Tabla 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

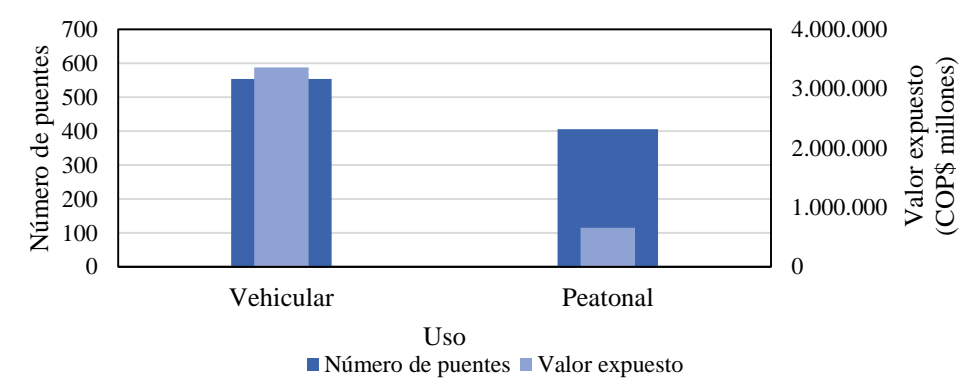


Figura 5. Número de puentes y valor expuesto por uso estructural

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.

4.2.1. Taxonomía

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.

El parámetro principal para la asignación de la taxonomía es el sistema estructural de los puentes, el cual 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 2 se puede ver el resumen de los sistemas estructurales principales identificados en el portafolio de puentes de Bogotá.

Tabla 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

En la Figura 6 se pueden identificar algunos ejemplos de sistemas estructurales más representativos en cuanto a la cantidad de puentes del portafolio de exposición.

Figura 6. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal



Figura 6. Parámetro taxonómico: Sistema estructural principal



4.2.2. Caracterización de puentes vehiculares

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.

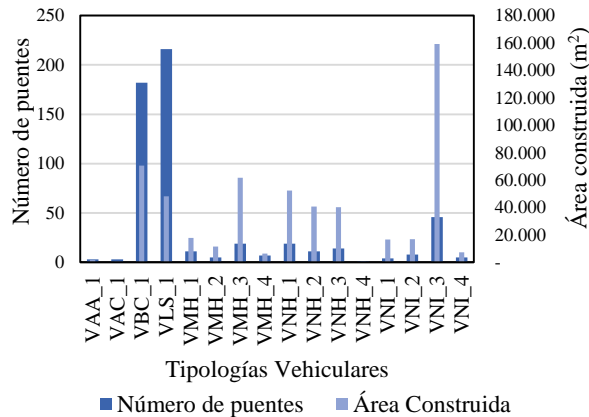


Figura 7. Número de puentes y área construida para las tipologías Vehiculares.

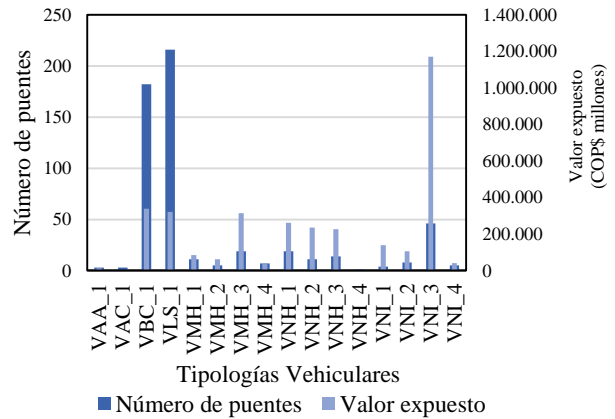


Figura 8. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías Vehiculares.

4.2.3. Caracterización de puentes peatonales

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.

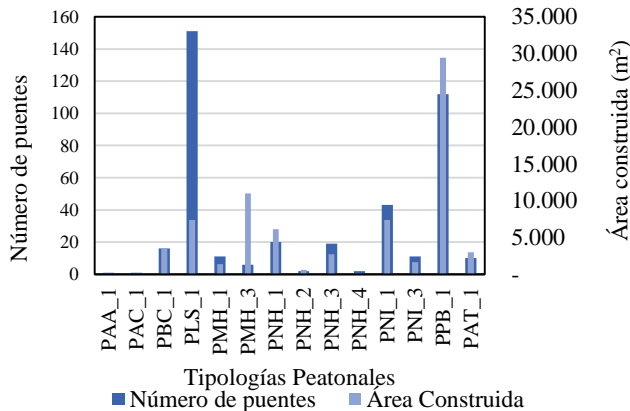


Figura 9. Número de puentes y área construida para las tipologías Peatonales.

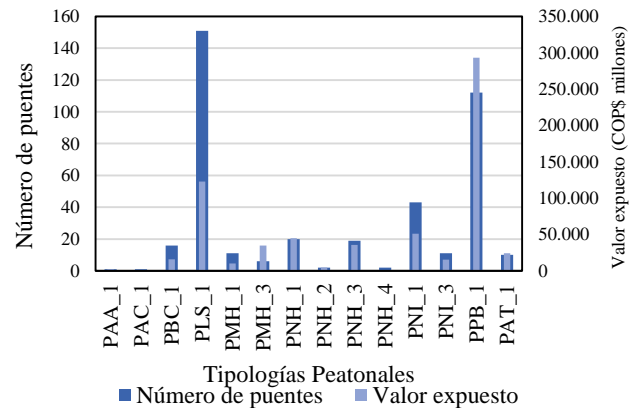


Figura 10. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías Peatonales.

4.2.4. Agrupación puentes según malla vial

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 3 se resumen los valores de exposición de puentes de acuerdo a la malla vial.

Tabla 3. 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

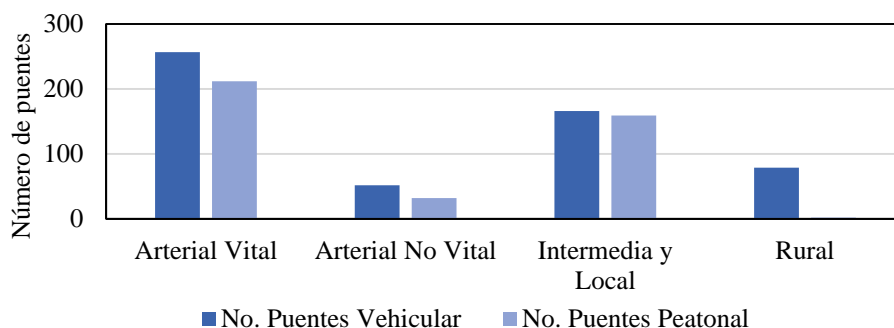


Figura 11. Número de puentes asociados a cada red de análisis

Como se observa en la Figura 11, la red Arterial Vital cuenta con el mayor número de puentes, tanto vehiculares como peatonales, seguida por la red Intermedia y Local.

5. VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES

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.

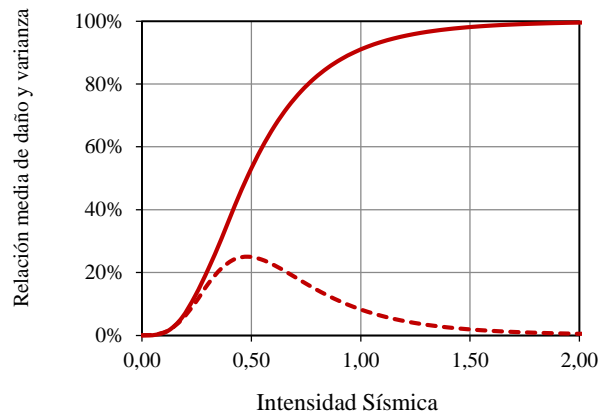


Figura 12. Función de vulnerabilidad típica

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 respecto a 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.
7. Evaluación y definición de las funciones de vulnerabilidad consistentes con los costos de reparación a diferentes niveles de intensidad sísmicas.

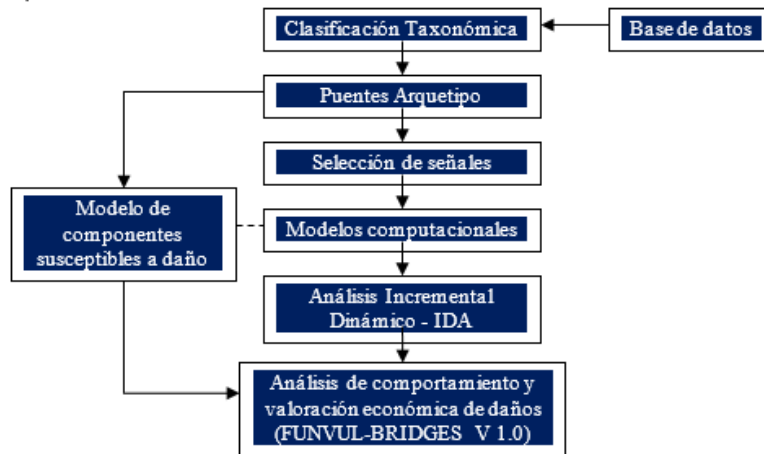


Figura 13. Metodología de evaluación de vulnerabilidad de puentes

5.1. PUENTES ARQUETIPO

A partir de la clasificación 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. 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.

5.2. 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 (S_a , $T=0.5\text{seg}$), ambos para un periodo de retorno de 1000 años. En la Figura 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.

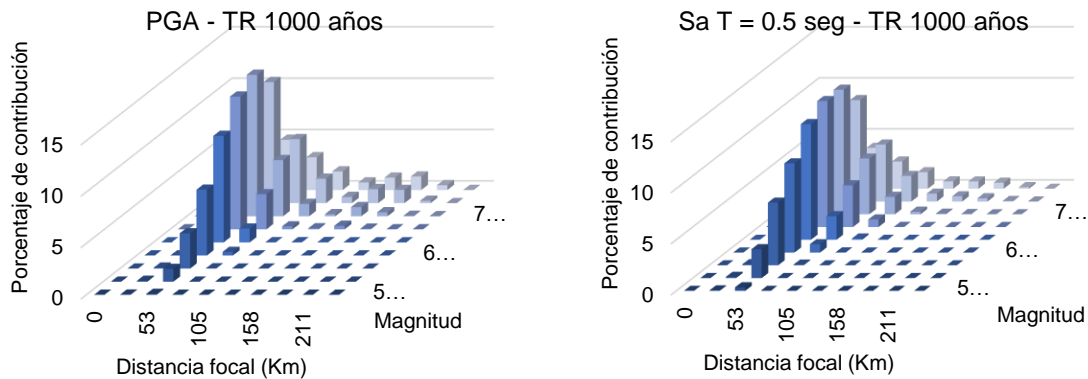


Figura 14. Desagregación Sísmica para Bogotá

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 representan la sismicidad de la zona de estudio.

5.3. 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.

5.3.1. Identificación de elementos estructurales críticos por tipología

La Tabla 4 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 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 4. 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	μf_L μf_T 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)

Tabla 4. Tipologías representativas de puentes

Tipología	Sección transversal	Elemento	PDS
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) μ fL μ fT δ (mm) δ (mm) δ (mm)
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) μ fL μ fT 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)

Tabla 4. Tipologías representativas de puentes

Tipología	Sección transversal	Elemento	PDS
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)

5.3.2. Conformación de modelos no lineales paramétricos

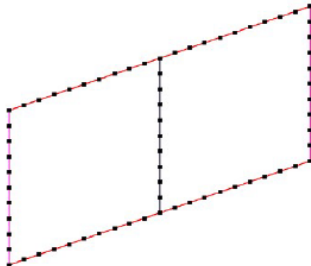
Se realizó la conformación de modelos no lineales con el fin de simular el comportamiento dinámico no lineal de cada una de las tipologías representativas. Cada tipología tiene una configuración geométrica particular, y puede tener o no algún tipo de componente determinado. Por esta razón, se ha preparado 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 tipologías más representativas del portafolio de puentes de la ciudad.

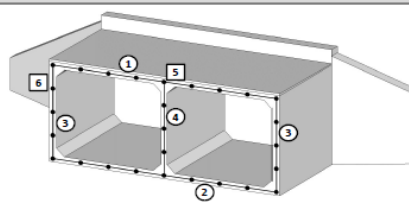
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees

Tipología VBC-1

Modelo

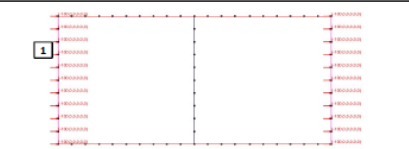


Losa superior, inferior y muros



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 línea
Elementos sin longitud

Figura 15. Formato de modelación - Tipología VBC-1

Modelación de tipologías de puentes en OpenSees															
Tipología VNI-3															
Modelo															
Estribos - Superestructura															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tope sísmico</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Conexión continua tablero - elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Neopreno Llave de cortante interna Relleno de estribo</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Tablero</td> </tr> </tbody> </table>	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		
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															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tope sísmico</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Conexión continua tablero - elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Neopreno Llave de cortante interna</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Tablero</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Viga cabezal</td> </tr> </tbody> </table>	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
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															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Cimentación</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Columna</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Viga cabezal</td> </tr> </tbody> </table>	Componentes y conectividad		1	Cimentación	2	Columna	3	Elemento rígido	4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal	5	Viga cabezal		
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															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes cargados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Viga cabezal</td> </tr> <tr> <th colspan="2">Masa</th> </tr> <tr> <td colspan="2">Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia</td> </tr> </tbody> </table>	Componentes cargados		1	Viga cabezal	Masa		Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia							
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 línea <input type="radio"/> Elementos sin longitud <input type="checkbox"/>														

Figura 16. Formato de modelación - Tipología VNI-3

Modelación de tipologías de puentes en OpenSees																	
Tipología PNI-1																	
Modelo																	
Pilas extremas - Superestructura																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tope sísmico</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Conexión continua tablero - elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Neopreno</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Llave de cortante interna</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Tablero</td> </tr> </tbody> </table>	Componentes y conectividad		1	Tope sísmico	2	Elemento rígido	3	Conexión continua tablero - elemento rígido	4	Neopreno		Llave de cortante interna	5	Tablero		
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																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tope sísmico</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Conexión continua tablero - elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Neopreno</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Llave de cortante interna</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Tablero</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Viga cabezal</td> </tr> </tbody> </table>	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
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																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Cimentación</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Columna</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Elemento rígido</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Viga cabezal</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Tope sísmico</td> </tr> </tbody> </table>	Componentes y conectividad		1	Cimentación	2	Columna	3	Elemento rígido	4	Conexión continua elemento rígido columna - viga cabezal	5	Viga cabezal	6	Tope sísmico		
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																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes cargados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tablero</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Masa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia</td> </tr> </tbody> </table>	Componentes cargados		1	Tablero	Masa		Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia									
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 línea	<input type="radio"/>																
Elementos sin longitud	<input type="checkbox"/>																

Figura 17. Formato de modelación - Tipología PNI-1

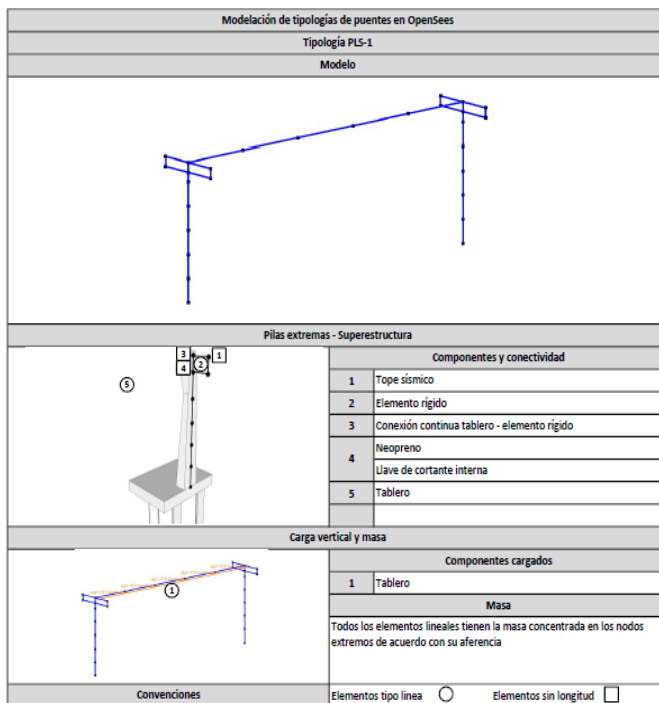


Figura 18. Formato de modelación - Tipología PLS-1

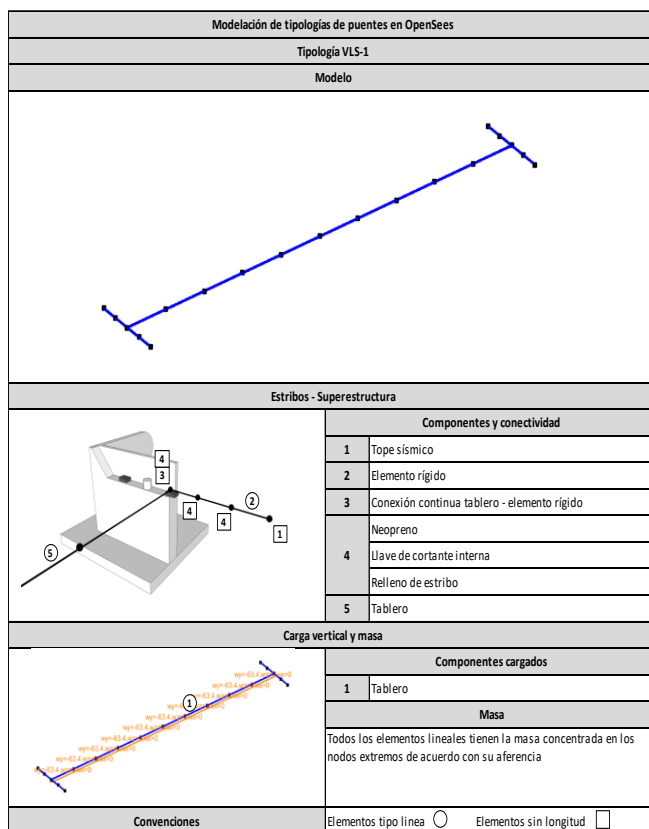


Figura 19. Formato de modelación - Tipología VLS-1

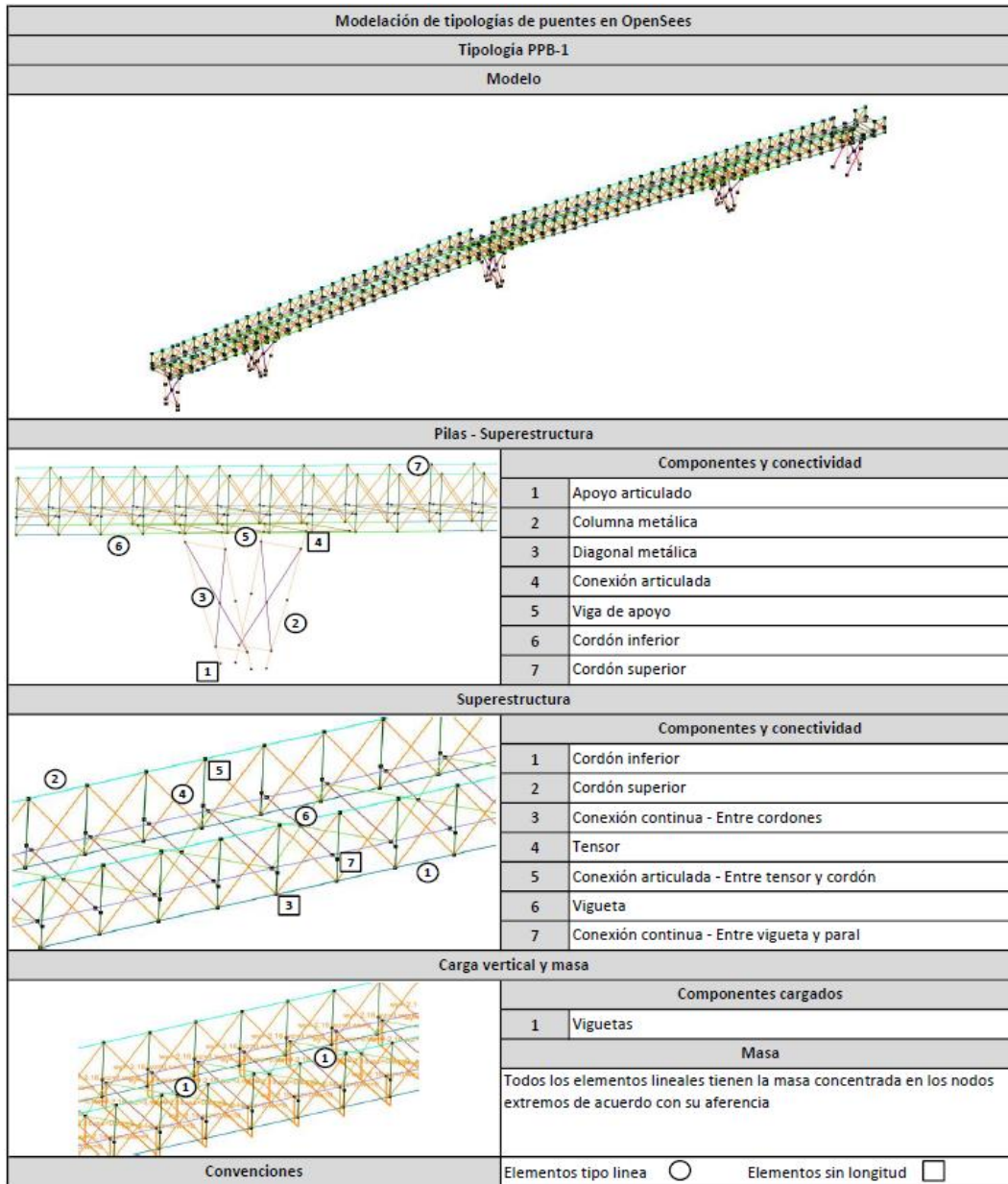


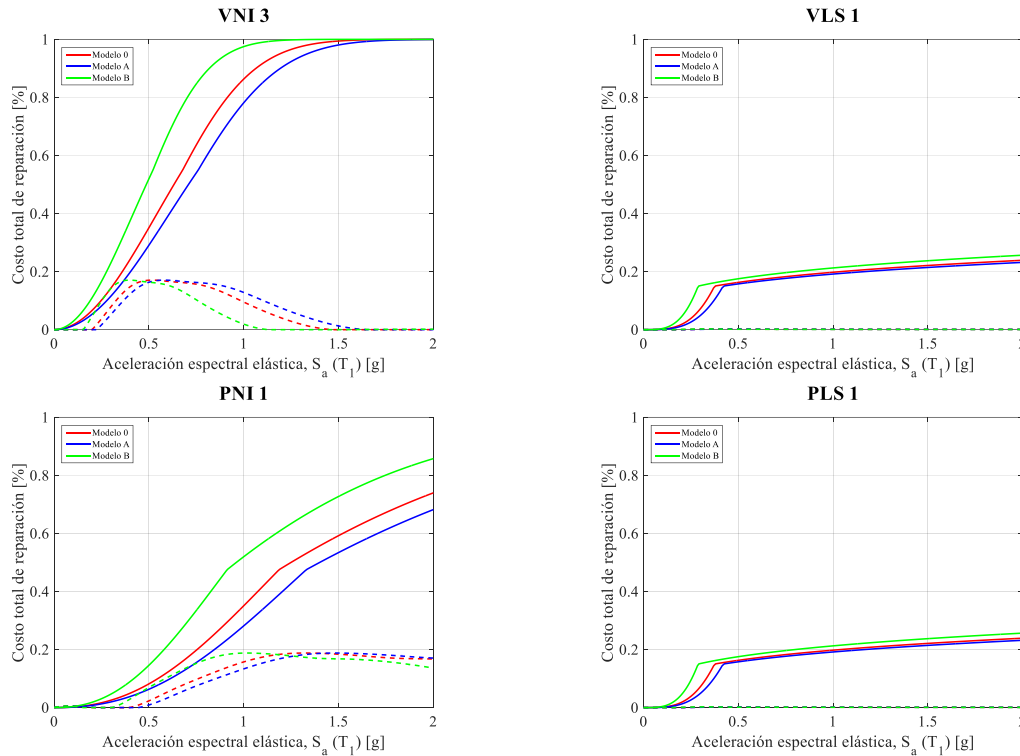
Figura 20. Formato de modelación - Tipología PPB-1

5.4. CATÁLOGO DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

En la Figura 21 se presentan las funciones de vulnerabilidad de las tipologías más representativas 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 21. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología



6. 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 22 presenta la curva de pérdida máxima probable para el portafolio completo de puentes de la ciudad. La Tabla 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 23 y Figura 24 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.

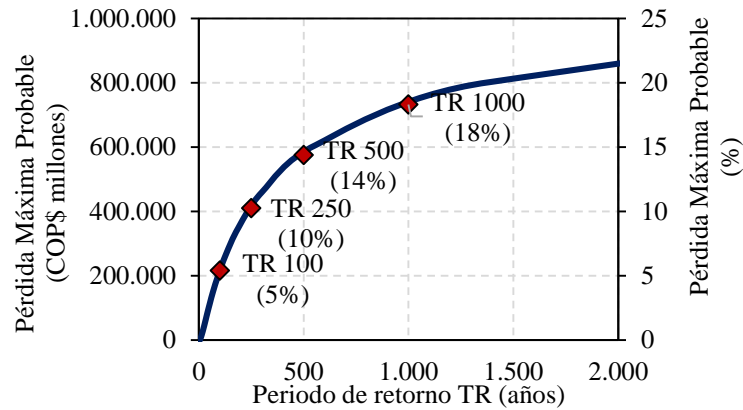


Figura 22. Curva de Pérdida Máxima Probable (PMP)

Tabla 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

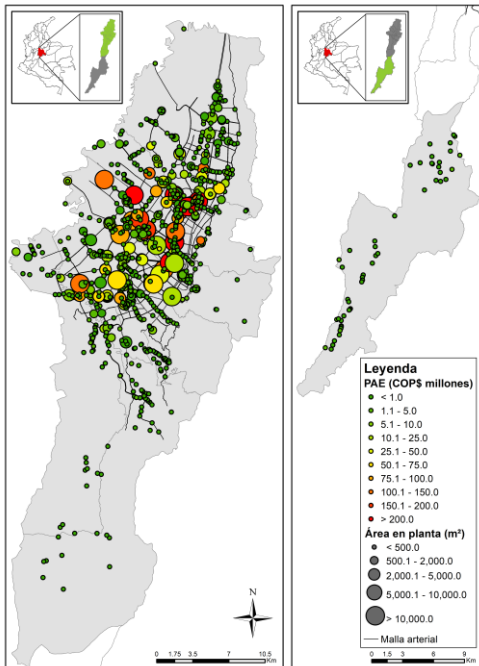


Figura 23. Distribución geográfica de la PAE absoluta para el portafolio de puentes de Bogotá

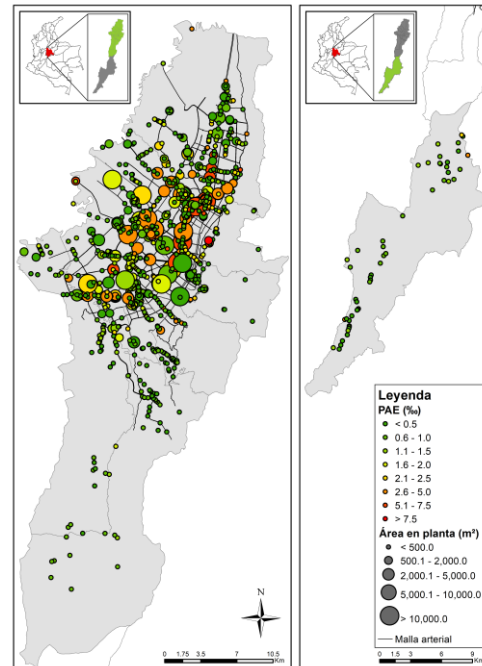


Figura 24. Distribución geográfica de la PAE relativa para el portafolio de puentes de Bogotá

La distribución de la PAE absoluta y PAE relativa de los puentes agrupados en los usos Vehicular y Peatonal se evidencian en la Figura 25. 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 26 y Figura 27, y para los Peatonales en la Figura 28 y Figura 29. 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 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

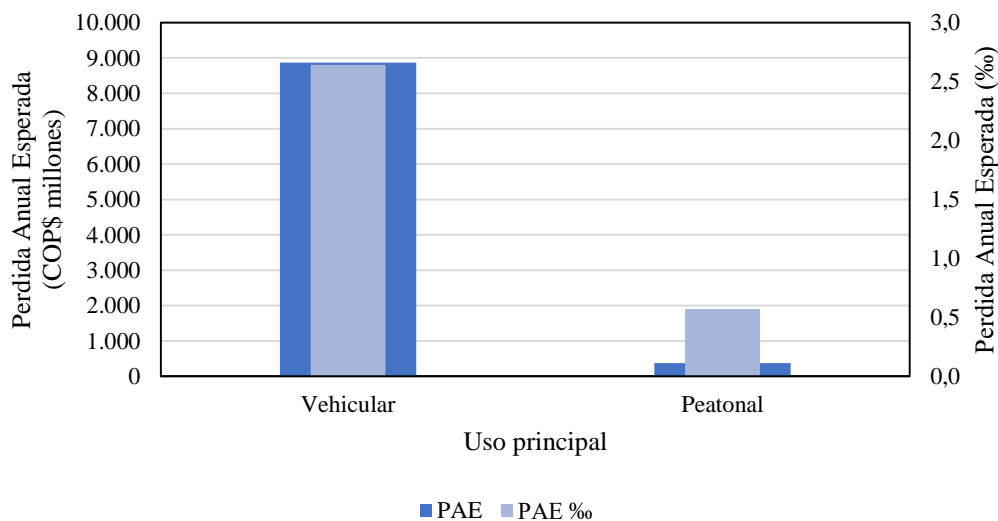


Figura 25. PAE absoluta y relativa del portafolio general por Usos

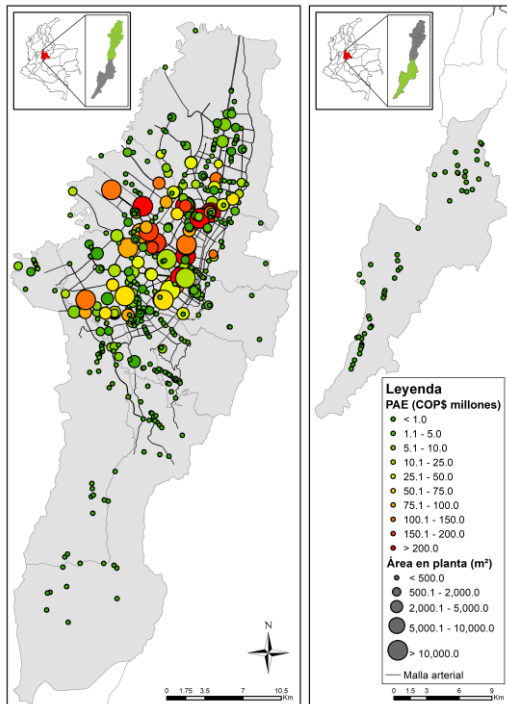


Figura 26. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes Vehiculares

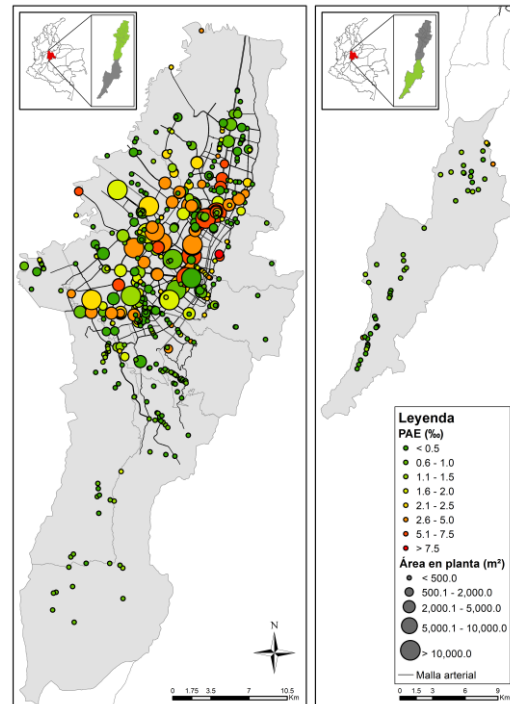


Figura 27. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes Vehiculares

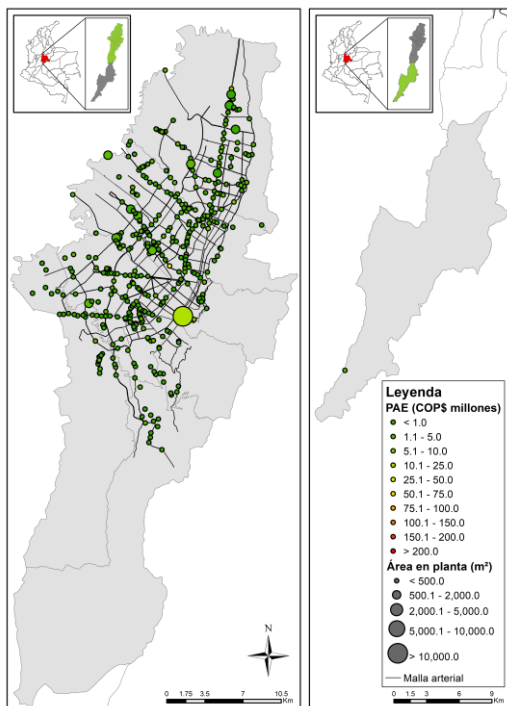


Figura 28. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes Peatonales

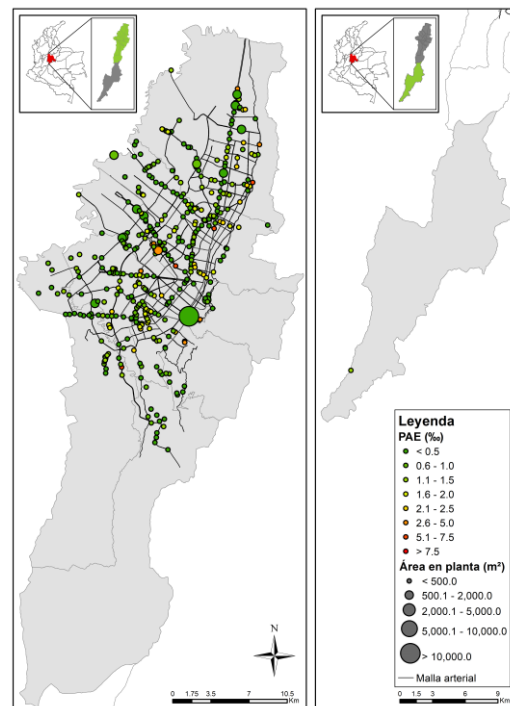


Figura 29. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes Peatonales

6.1. 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 30 y Figura 31 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.

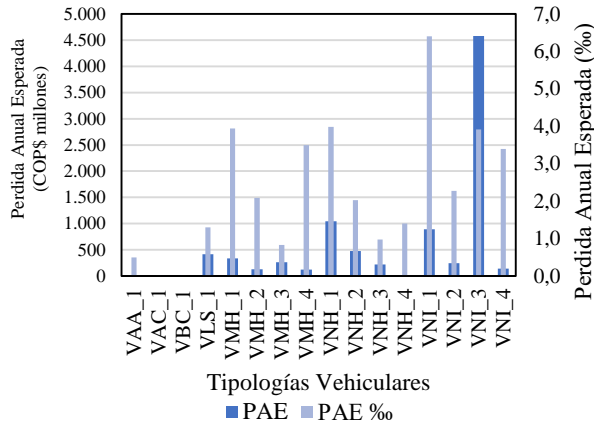


Figura 30. PAE absoluta y relativa para las tipologías Vehiculares

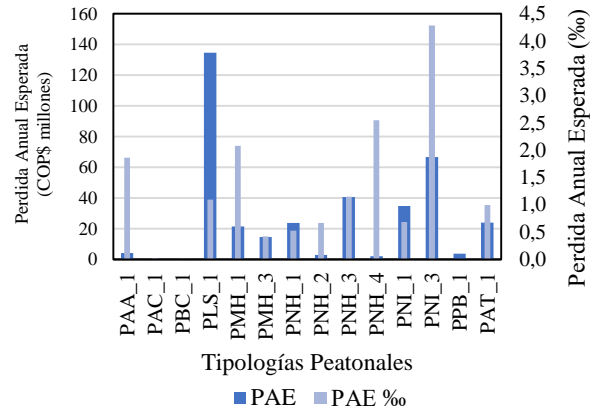


Figura 31. PAE absoluta y relativa para las tipologías Peatonales

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 pérdida 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 pérdida relativa de 0.01%, debido a su baja vulnerabilidad sísmica.

Los resultados agrupados por el tipo de malla vial se presentan en la Figura 32 para los puentes vehiculares, y en la Figura 33 para los puentes peatonales. Se presentan además los resultados correspondientes a la distribución de tipologías vehiculares y peatonales para cada Malla vial (ver Figura 34 a Figura 41).

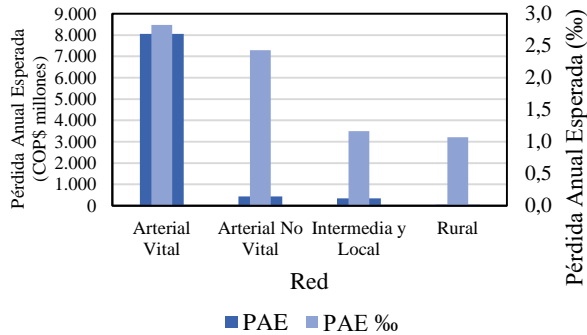


Figura 32. PAE absoluta y relativa de los puentes Vehiculares según la Malla vial

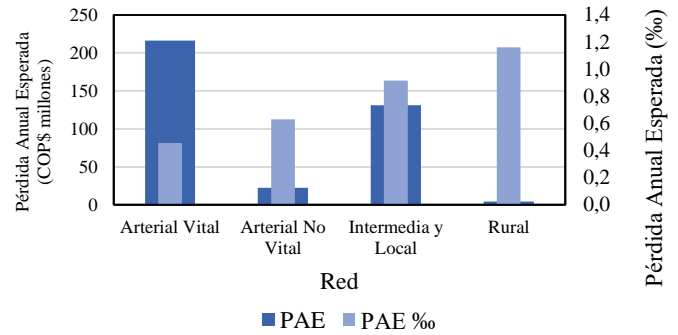


Figura 33. PAE absoluta y relativa de los puentes Peatonales según la Malla vial

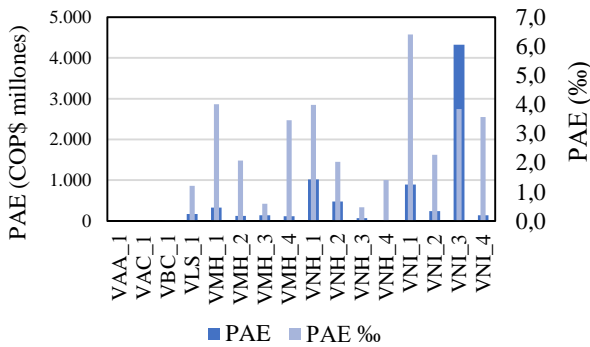


Figura 34. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Arterial Vital

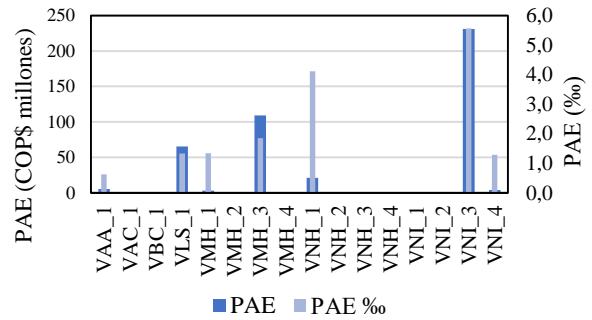


Figura 35. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Arterial No Vital

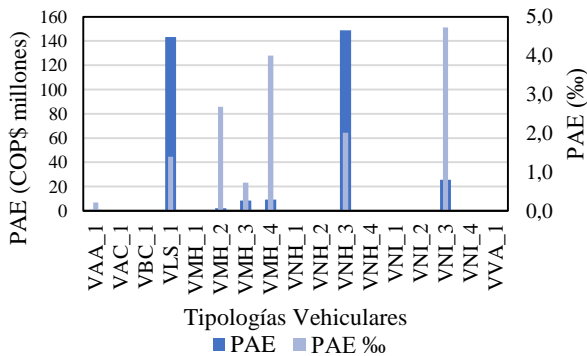


Figura 36. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Intermedia y Local

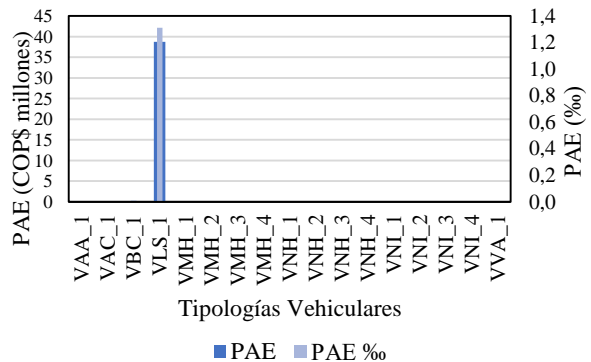


Figura 37. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Rural

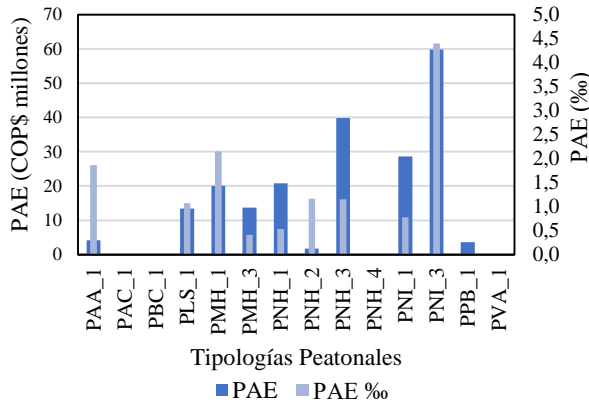


Figura 38. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Arterial Vital

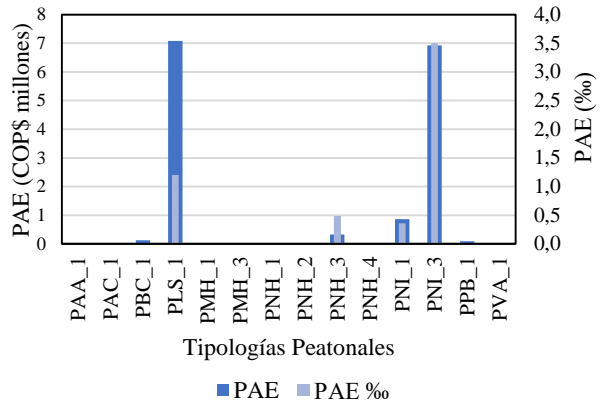


Figura 39. PAE absoluta y relativa de las tipologías Vehiculares en la red Rural

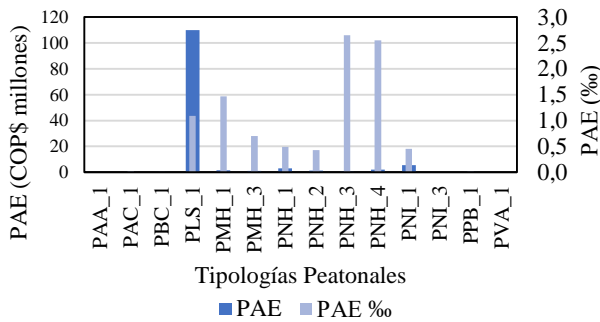


Figura 40. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Intermedia y Local

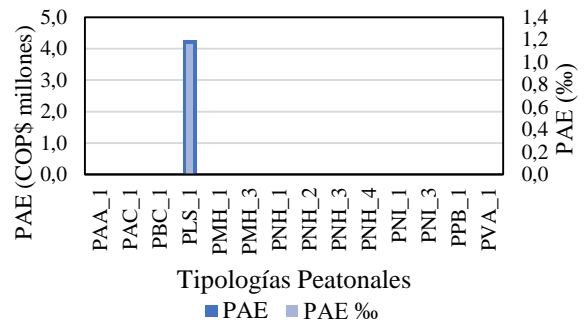


Figura 41. PAE absoluta y relativa de las tipologías Peatonales en la red Rural

6.2. 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 42 y Figura 43, 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 44 y Figura 45, 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.

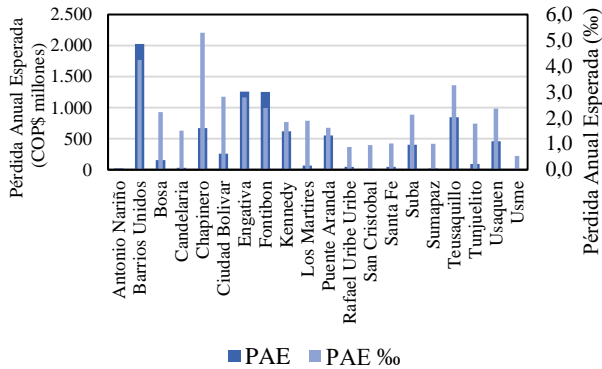


Figura 42. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes Vehiculares

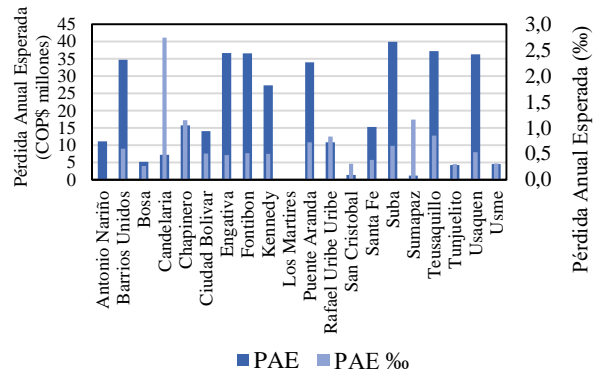


Figura 43. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes Peatonales

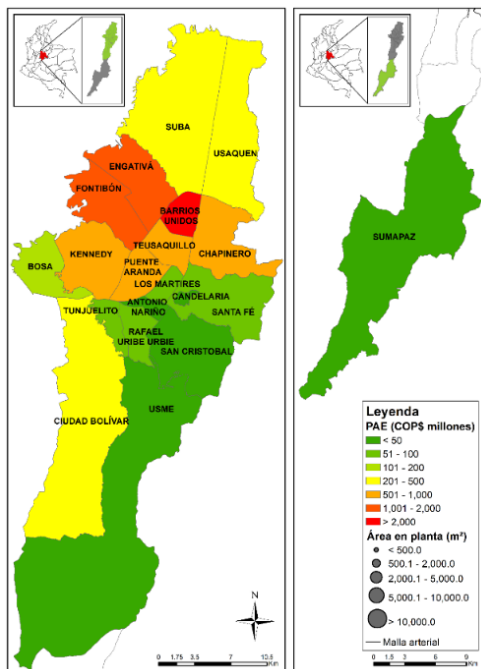


Figura 44. Distribución geográfica de PAE absoluta por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá

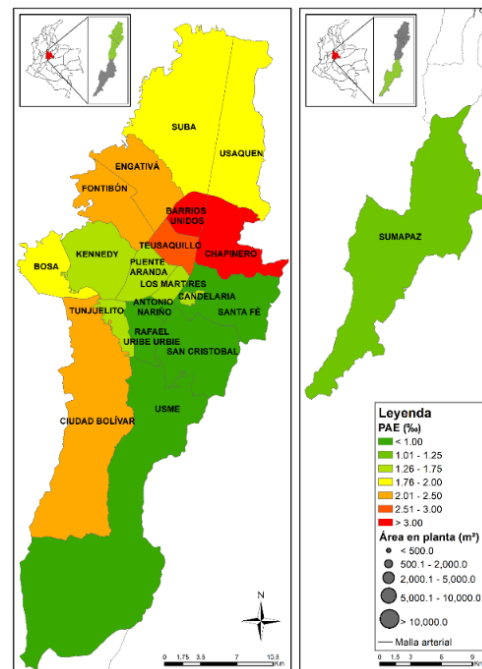


Figura 45. Distribución geográfica de PAE relativa por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá

6.3. EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA ESCENARIOS DETERMINISTAS

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 cuatro sismos representativos. La Tabla 7 presenta las características principales para los cuatro escenarios de sismos en la Falla de Frontal Cordillera Oriental. 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 8 y Tabla 9. 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.

Tabla 7 Escenarios utilizados en el análisis determinista del riesgo

Escenario No.	Magnitud	PGA máximo en terreno firme en Bogotá (cm/s ²)
1	5.38	52
2	6.13	108
3	6.88	231
4	7.63	293

Tabla 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 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 Figura 46 a la Figura 49 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.

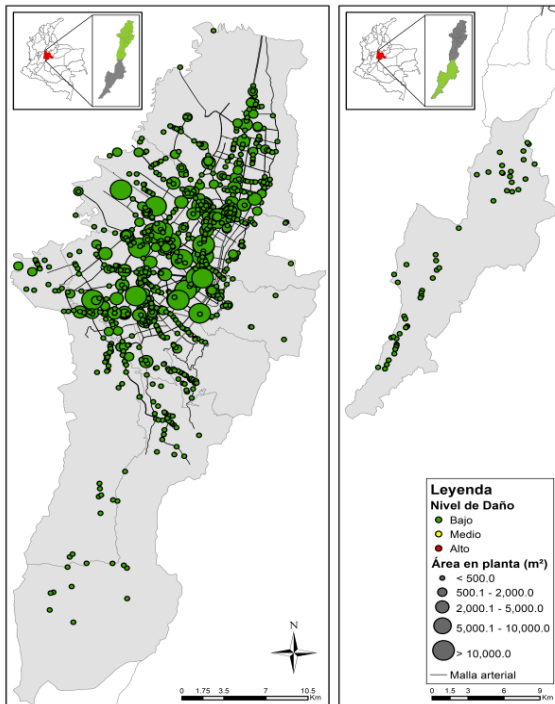


Figura 46. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 1 (M = 5.38)

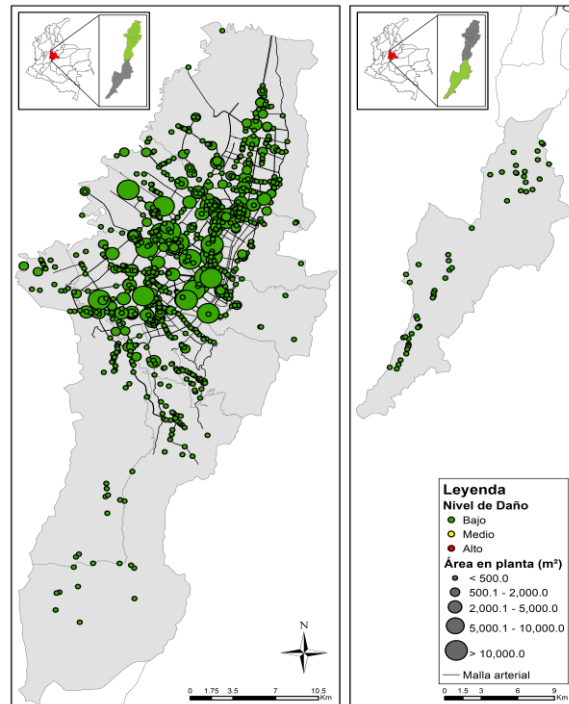


Figura 47. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 2 (M = 6.13)

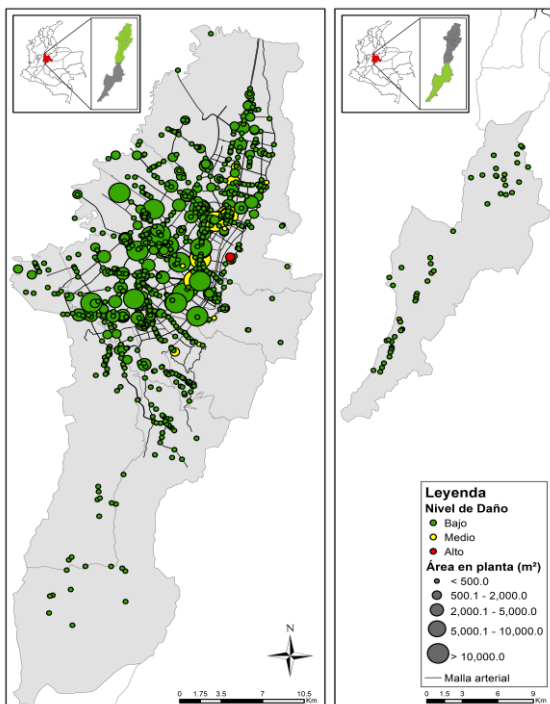


Figura 48. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 3 (M = 6.88)

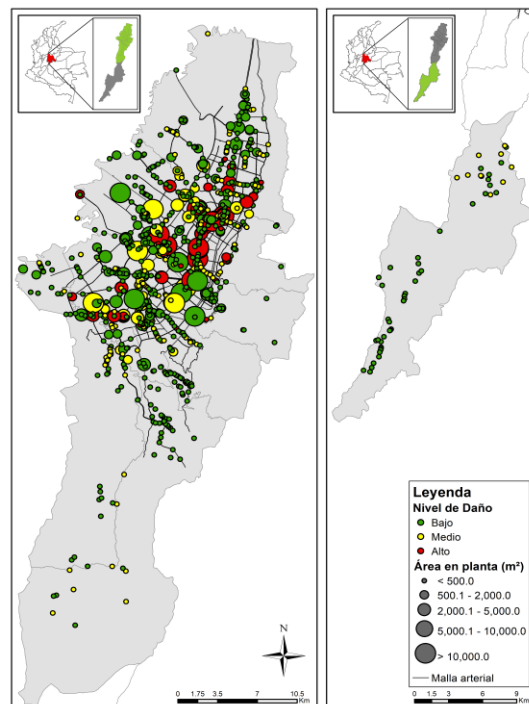


Figura 49. Nivel de daño esperado en el portafolio de puentes para el Escenario No. 4 (M = 7.68)

7. CONCLUSIONES

- ✓ 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).
- ✓ 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.
- ✓ 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 no 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.
- ✓ 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.
- ✓ El tipo de suelo fue clasificado en tres rangos: suelo duro ($\bar{V}_s \geq 760$ m/s), intermedio y blando ($\bar{V}_s < 180$ 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.
- ✓ 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.
- ✓ 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).
- ✓ 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.
- ✓ 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.

- ✓ 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.
- ✓ A partir del análisis probabilista de riesgo sísmico desarrollado para el portafolio de puentes se tiene lo siguiente:
 - ✓ 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.
 - ✓ 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.
 - ✓ 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.
 - ✓ La tipología constructiva que mayor riesgo absoluto concentra es VNI_3 para puentes vehiculares, y PLS_1 para puente peatonales.
 - ✓ 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.
 - ✓ 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.
 - ✓ El valor total expuesto se distribuye entre las localidades de Bogotá D.C 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%.
 - ✓ El riesgo sísmico absoluto se concentra en la localidad Barrios Unidos, 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.
 - ✓ El riesgo sísmico relativo se concentra en las localidades de Chapinero y Barrios Unidos con pérdidas anuales al millar de 5.29‰ y 4.24‰ de los portafolios de cada localidad.

Este boletín resume los principales aspectos técnicos desarrollados en la evaluación del riesgo sísmico de los puentes del Distrito, en el marco de la ejecución del contrato No. 1556 de 2017.