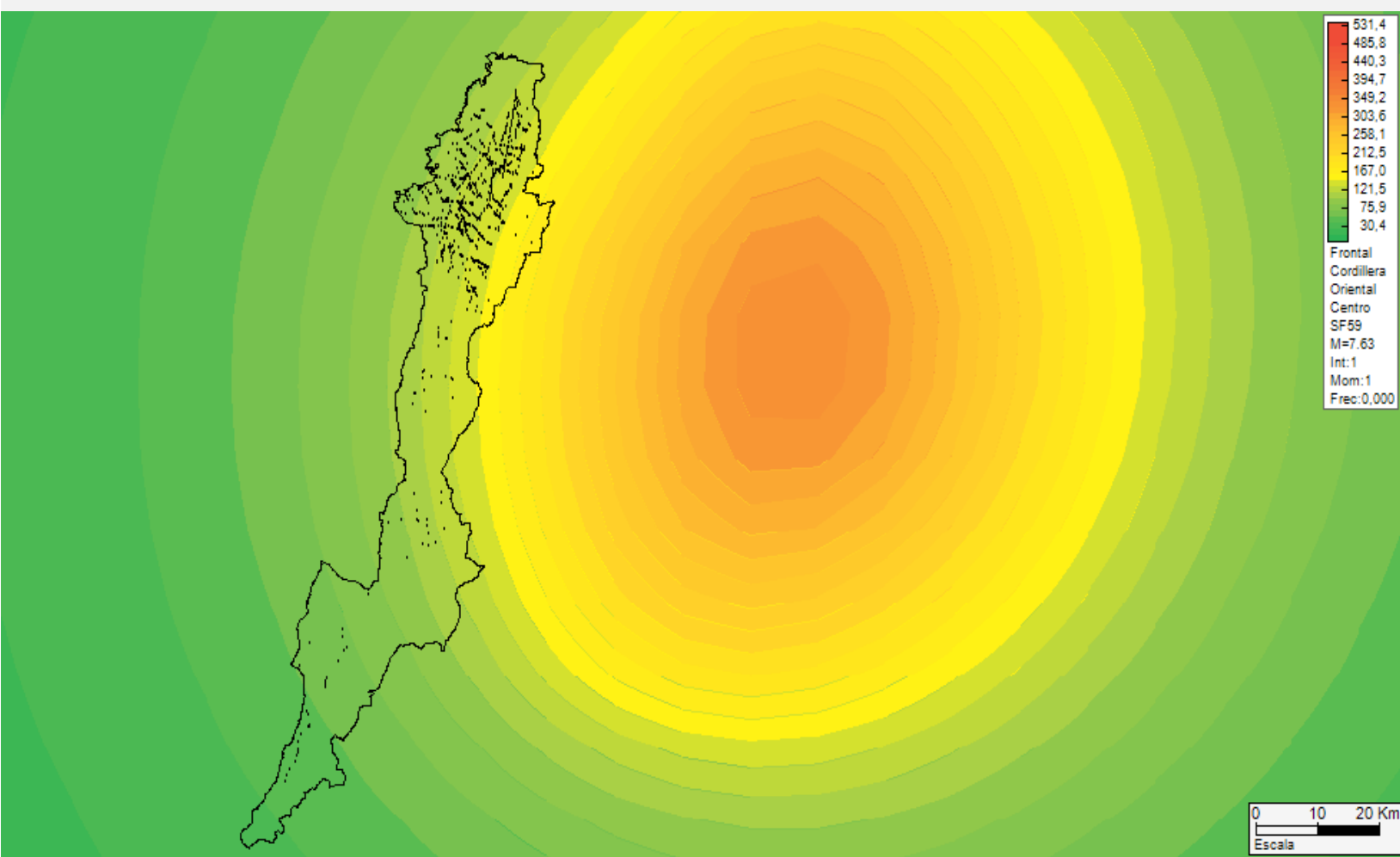


## BOLETÍN TÉCNICO No. 09

### EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LOS PUENTES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C (2020-I)



JULIO 2020

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

## CONTENIDO

1. Introducción
2. Esquema general y definiciones
3. Componentes para la actualización de la evaluación del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad de Bogotá D.C.
  - 3.1. Amenaza sísmica
  - 3.2. Exposición
  - 3.3. Vulnerabilidad sísmica de puentes
4. Riesgo sísmico para el portafolio general de puentes
  - 4.1. Riesgo sísmico del portafolio de exposición de acuerdo con su caracterización
  - 4.2. Riesgo sísmico del portafolio de exposición por localidad
5. Conclusiones

**Diego Sánchez Fonseca**  
Director General

**José Felix Gómez Pantoja**  
Subdirector General de Desarrollo Urbano

Equipo Dirección Técnica Estratégica  
**Sully Magalis Rojas Bayona**  
**Vicente Edilson Leal Moreno**  
**Nattalia Romero Hermosilla**  
**Oscar Mauricio Velásquez Bobadilla**  
**Juan Pablo Forero Redondo**  
**Yuly Caterin Díaz Jiménez**

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

### 1. INTRODUCCIÓN

Una actividad de gran importancia que viene realizando el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, es la relacionada con la evaluación del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad de Bogotá D.C para el portafolio de exposición de esta infraestructura. Esta actividad permite identificar parámetros relacionados con los impactos físicos y las pérdidas económicas que la infraestructura de puentes puede presentar ante la ocurrencia de un conjunto de eventos sísmicos. Así mismo, la evaluación del riesgo sísmico permite realizar análisis técnicos relevantes, que suministran insumos para las diferentes estrategias de conservación de la infraestructura de puentes, así como, criterios de priorización y planes o programas de intervención.

La metodología aplicada para la evaluación del riesgo sísmico del portafolio de puentes, se basa en la evaluación probabilista del riesgo la cual considera los modelos de amenaza sísmica, exposición y vulnerabilidad de los componentes que conforman esta infraestructura. La identificación de las amenazas que pueden afectar una región determinada constituye el primer paso hacia una evaluación rigurosa del riesgo. La caracterización de la exposición pretende identificar los componentes de infraestructura expuesta que puede verse afectada por posibles eventos futuros, para lo cual se hace necesario identificar los diferentes componentes individuales incluyendo su ubicación geográfica, sus características geométricas, físicas e ingenieriles principales, su vulnerabilidad, su valoración económica, entre otros. Por último, la vulnerabilidad da cuenta del nivel de daño o afectación que puede llegar a ocurrir en función de la intensidad local que afecta cada componente.

El presente boletín técnico da a conocer la actualización de los resultados de la evaluación del riesgo sísmico utilizando la plataforma CAPRA-GIS, para el portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá D.C, a corte de junio de 2020, con 992 puentes inventariados.

## 2. ESQUEMA GENERAL Y DEFINICIONES

La integración de los tres componentes: Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad; permite realizar la evaluación del riesgo sísmico y 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 esquema general de la metodología aplicada.

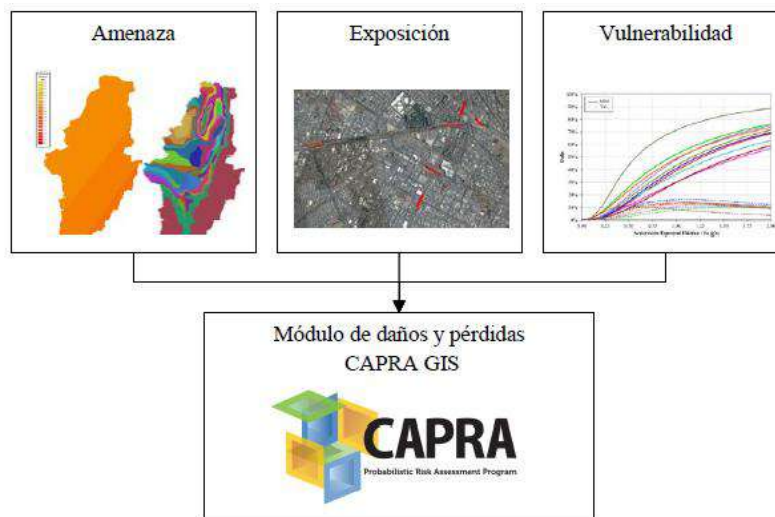


Figura 1. Metodología riesgo sísmico

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

Por otra parte, se presenta a continuación la definición de las principales métricas de riesgo sísmico basadas en el informe final de consultoría IDU-1556-2017:

- **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.

### 3. COMPONENTES PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LOS PUENTES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

#### 3.1. AMENAZA SÍSMICA

Para efectos de la actualización de la evaluación del riesgo sísmico del portafolio de puentes del Distrito, 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, los cuales tienen 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. 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.

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.

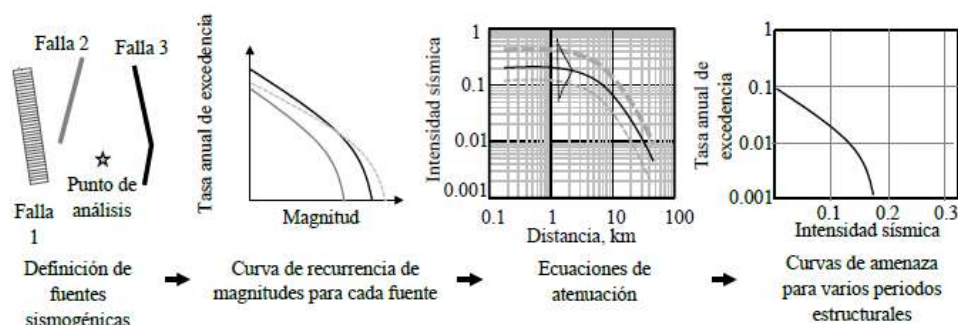


Figura 2. Metodología del análisis probabilista de amenaza sísmica

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

Para el presente estudio se utilizó el catálogo sísmico 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 a este valor. Lo anterior de acuerdo a lo utilizado en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia de



2009 y a lo indicado por United States Geological Survey en 2018 en relación a que sismos con magnitud inferior a 4 generan un efecto casi imperceptible en las estructuras. Una vez realizado el proceso de exclusión de los eventos con magnitud menor a la magnitud umbral se obtuvo un catálogo con un total de 8,389 eventos.

La definición de las fuentes sísmogénicas se realiza a partir de una recopilación de estudios referentes a los movimientos de las placas que convergen en el norte de Suramérica y su correspondiente interpretación, las cuales definen de manera importante la concentración de la sismicidad en el país. De igual manera, se consultó la última versión del mapa geológico de Colombia publicado por el Servicio Geológico Colombiano SGC 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 un 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 sísmogénicas en todo el territorio nacional.

La Figura 3 y la Figura 4 presentan las fuentes sísmogénicas corticales y las zonas de subducción definidas para el presente estudio respectivamente.

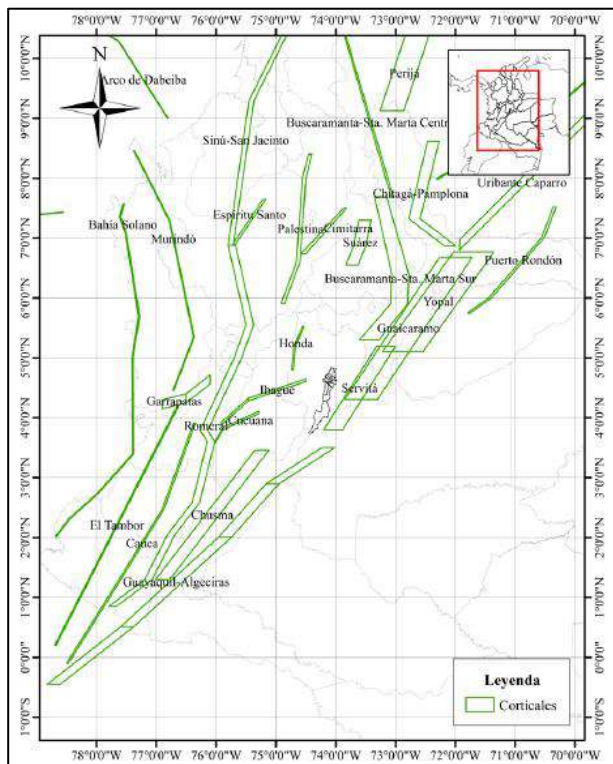


Figura 3. Zonas sísmogénicas corticales

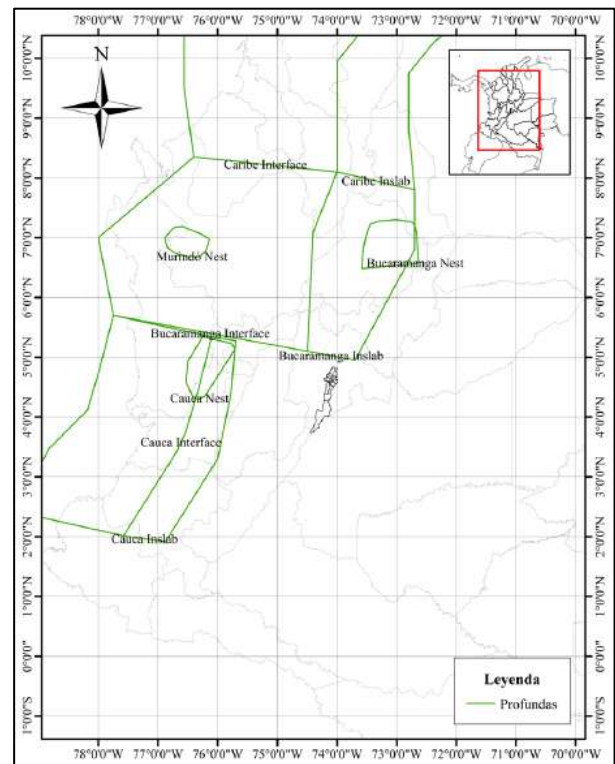


Figura 4. Zonas sísmogénicas de subducción

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

La información relacionada con el componente de amenaza sísmica y utilizada en la presente evaluación del riesgo sísmico del portafolio de puentes de la ciudad, fue procesada y definida mediante la ejecución del contrato de consultoría IDU-1556-2017.

### 3.2. EXPOSICIÓN

La actualización del portafolio de exposición consistió en la identificación de nuevas estructuras que no hacían parte del portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá D.C, para lo cual se identificaron 33 nuevos puentes a los cuales se les realizó el levantamiento geométrico y caracterización estructural. A cada una de estas estructuras, se les definió las variables relacionadas con la estimación del valor físico expuesto, como lo son: tipo de puente, longitud, ancho, número de luces, gálibo, material predominante, tipo de subestructura, ubicación geográfica y nivel del puente. La estimación del valor físico corresponde al valor de reposición a utilizar en el análisis probabilista del riesgo sísmico de los puentes de la ciudad, valor que sirve como una referencia y no consiste ni pretende ser un valor fijo de contratación de proyectos de construcción y/o reparación de puentes.

Con lo anterior, se definió la base de datos de exposición a corte de junio de 2020, el cual corresponde al portafolio de 992 estructuras definidas como puentes, las cuales se encuentran georreferenciadas y contienen información de los parámetros que se requieren para la evaluación del riesgo y la caracterización de su comportamiento.

Para efectos de la actualización de la evaluación probabilista del riesgo sísmico se utilizó la siguiente información:

- Identificación del puente según PK\_ID
- Localización geográfica
- Valoración económica del puente (valor físico expuesto o valor de reposición a nuevo)
- Taxonomía para asignación de la función de vulnerabilidad
- Indicadores y caracterización del portafolio de exposición

La información base para la estimación del valor físico de estos puentes, corresponde a la relacionada con la base de precios de referencia del IDU a corte 2018- I. El valor físico o expuesto del portafolio de exposición, se actualizó a partir del Índice de Costos de la Construcción Pesada –ICCP- con corte a abril de 2020.

El portafolio de puentes expuesto a la amenaza sísmica es categorizada a través de las tipologías estructurales asignadas con base en el uso principal del puente: vehicular o peatonal. 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 tipo de puente

Tipo de puente	Número de puentes	Distribución porcentual número de puentes (%)	Área construida (m2)	Distribución porcentual área construida (%)	Valor expuesto (COPS millones)	Distribución porcentual valor expuesto (%)
Vehiculares	565	56,96	564614,98	87,90	\$ 3.675.208,66	83,44
Peatonales	427	43,04	77702,11	12,10	\$ 729.279,67	16,56
<b>TOTAL</b>	<b>992</b>	<b>100</b>	<b>642317,10</b>	<b>100</b>	<b>\$ 4.404.488,34</b>	<b>100</b>

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

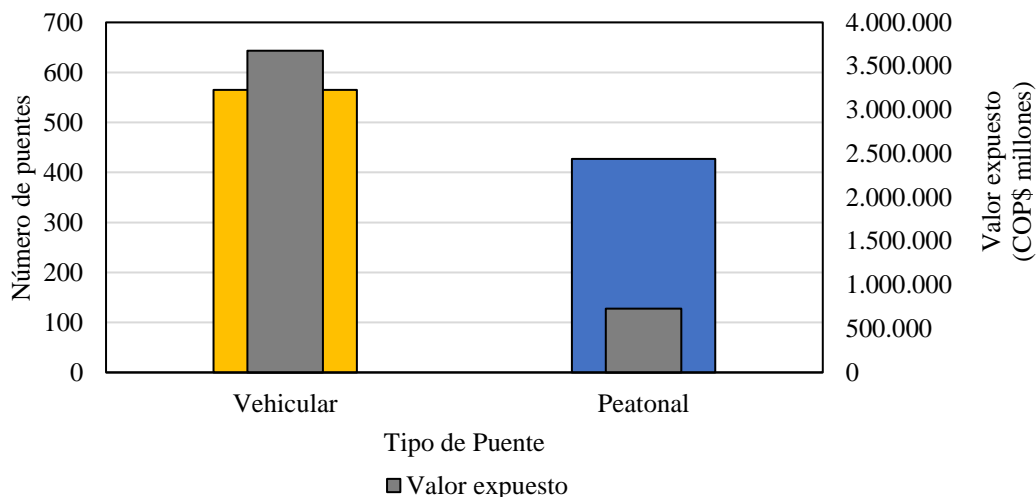


Figura 5. Número de puentes y valor expuesto por tipo de puente

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

Como se puede observar en la Tabla 1, los puentes vehiculares acumulan aproximadamente el 88% del área construida y el 83% del valor económico expuesto del portafolio completo. Aunque los puentes peatonales representan en número aproximadamente el 43% del inventario de la base de datos de exposición, agrupan únicamente el 12% del área construida y el 17% del valor económico expuesto. Las diferencias encontradas en la distribución porcentual de los atributos usados para caracterizar los puentes por tipo (vehicular y peatonal) evidencian la necesidad de un análisis particular para cada uno de ellos.

### 3.2.1. Taxonomía

La taxonomía es el sistema de clasificación de puentes a partir de los atributos geométricos y estructurales que conforman de la base de datos del portafolio de exposición. 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. 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). Por otro lado, existen tipologías particulares como son los box culvert, los puentes de una sola luz y los puentes Prototipo Bogotá (tipo Transmilenio).

Para los 33 nuevos puentes que hacen parte del presente portafolio de exposición, se les procedió a realizar la correspondiente clasificación teniendo en cuenta su sistema estructural. En la Tabla 2 se puede ver el resumen de los principales sistemas estructurales identificados en el portafolio de puentes del Distrito con corte a junio 2020.

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	-
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

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

### 3.2.2. Indicadores y caracterización del portafolio de puentes

- Caracterización puentes vehiculares

El portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá D.C, lo conforman 565 puentes vehiculares los cuales están clasificados en 16 tipologías estructurales. La Figura 6 y la Figura 7 presentan la distribución de cada tipología, en relación con el número de puentes, área de construida y valor expuesto.

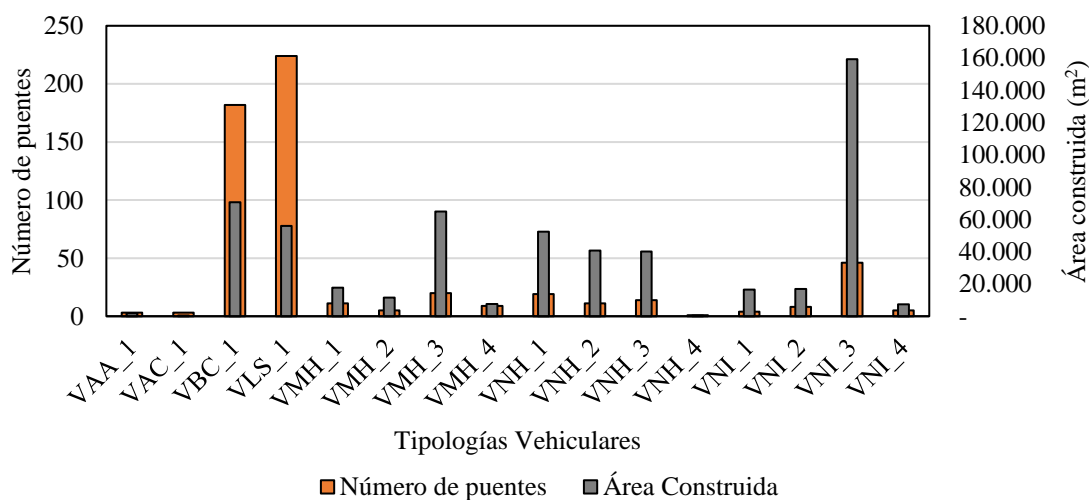


Figura 6. Número de puentes y área construida para las tipologías vehiculares.

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU



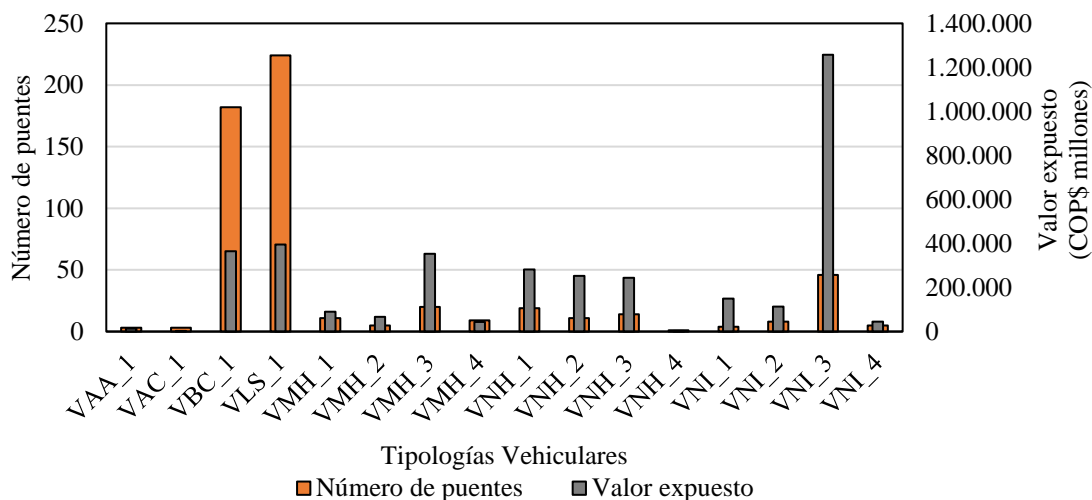


Figura 7. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías vehiculares

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

La mayor parte de los puentes vehiculares se encuentran clasificados como VLS\_1 (224 puentes) y VBC\_1 (182 puentes) que corresponden a puentes de una sola luz y box culverts respectivamente. No obstante, la mayor parte del área construida y el valor expuesto corresponde a los puentes No monolíticos Isostáticos apoyados sobre pórticos representados en la tipología 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 siete tipologías vehiculares mencionadas acumulan el 75% de los metros cuadrados en planta construidos y el 72% del valor de reposición de la totalidad de los puentes de Bogotá D.C, y son por ende las estructuras de mayor aporte en métricas del riesgo como la PAE y la PML.

#### • Caracterización puentes peatonales

427 son los puentes peatonales que hacen parte del portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá D.C, estos están distribuidos y clasificados en 14 tipologías estructurales. La Figura 8 y la Figura 9 presentan la caracterización de los puentes peatonales en cuanto al número de puentes, área de construida y valor expuesto

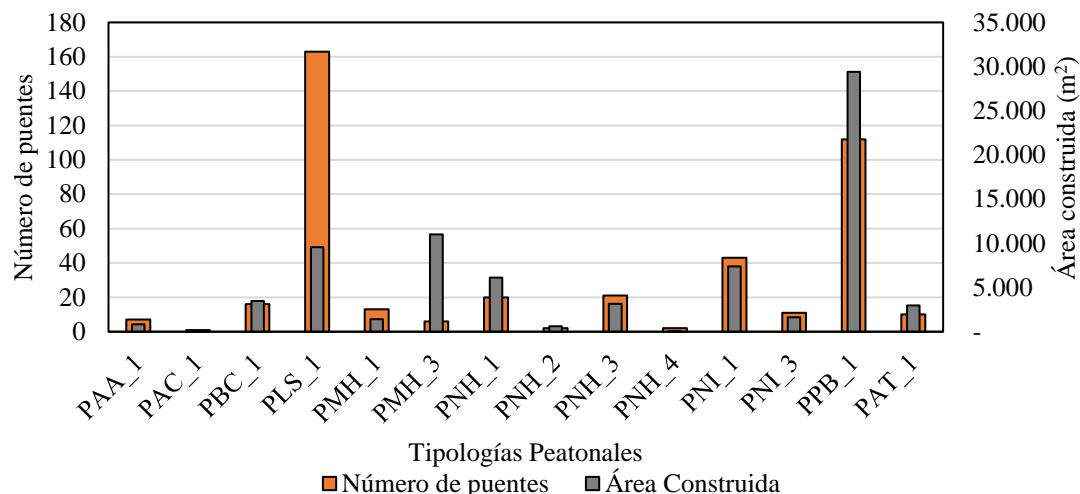


Figura 8. Número de puentes y área construida para las tipologías peatonales.

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

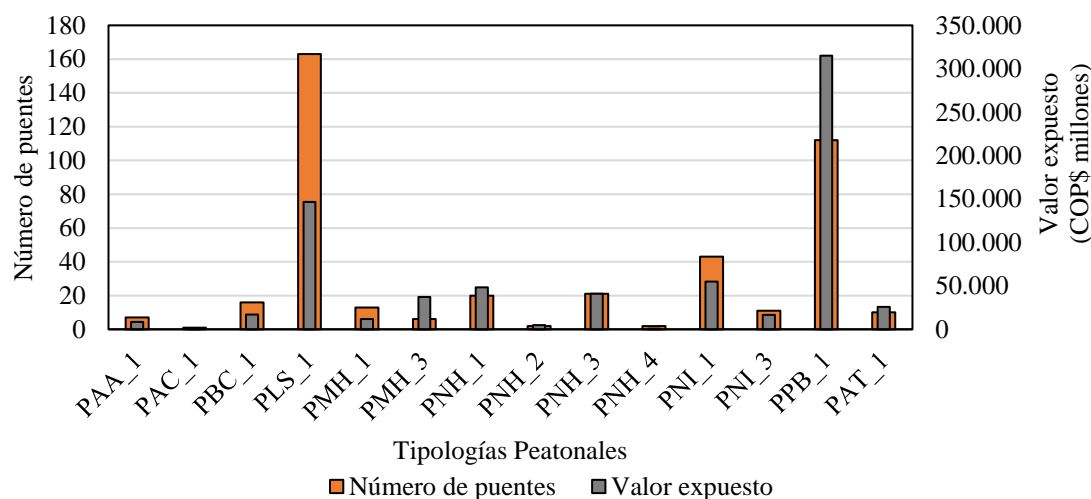


Figura 9. Número de puentes y valor expuesto para las tipologías peatonales.

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

En cuanto a los puentes peatonales, los puentes de una sola luz - PLS\_1 (163 puentes) presentan la mayor cantidad de estructuras dentro del inventario, seguidos por la tipología Prototipo Bogotá - PPB\_1 (112 Puentes). Por otro lado, las tipologías PPB\_1 y PMH\_3 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 (PPB\_1, PLS\_1 y PMH\_3) son las más importantes dentro de los puentes peatonales del inventario, solo representan el 8% del área y el 11% del valor expuesto de todo el inventario de puentes de la ciudad.

- **Caracterización puentes según malla vial**

El portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá D.C se puede caracterizar de acuerdo al tipo de malla vial donde se localiza y teniendo en cuenta la red vital de la ciudad, la cual representa la red vial más importante e indispensable en caso de una situación de emergencia, evento o incidente adverso de gran magnitud definida por la Secretaría Distrital de Movilidad. Para esta caracterización se tiene cuatro grupos de análisis: puentes por malla vial arterial vital, puentes por malla vial no vital, puentes por malla vial intermedia y local y puentes por malla vial rural.

Los diferentes grupos de análisis integran el sistema vial de la ciudad de Bogotá D.C, para cada uno de estos se tienen clasificados los puentes del portafolio, teniendo en cuenta el tipo de puente, área de construcción, y valor expuesto. En la Tabla 3 se resumen los valores de exposición de puentes de acuerdo al tipo de malla vial.

Tabla 3. Caracterización de la exposición de los puentes por tipo de malla vial

Malla vial	No. Puentes Vehicular	No. Puentes Peatonal	Área Construcción (m²) Vehicular	Área Construcción (m²) Peatonal	Valor expuesto Vehicular (COP\$ Millones)	Valor expuesto Peatonal (COP\$ millones)
Arterial Vital	257	214	457.529,20	58.918,43	3.060.651,54	509.468,96
Arterial No Vital	61	50	49.865,93	7.495,02	260.749,21	53.300,07
Intermedia y Local	168	161	51.536,22	11.073,68	314.883,50	162.556,57
Rural	79	2	5.683,64	214,99	38.924,41	3.954,08
<b>TOTAL</b>	<b>565</b>	<b>427</b>	<b>564.614,98</b>	<b>77.702</b>	<b>\$ 3.675.208,66</b>	<b>\$ 729.279,67</b>

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

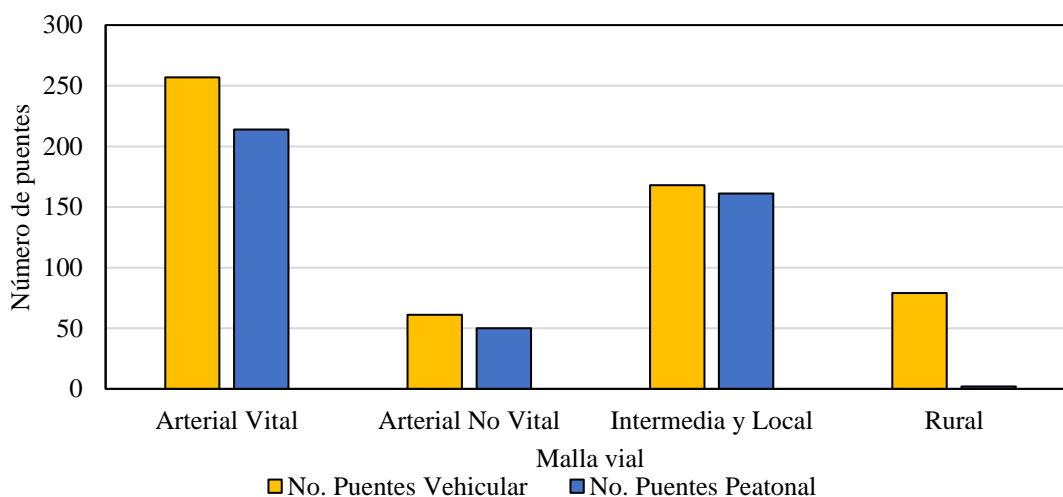


Figura 10. Número de puentes asociados a cada malla vial de análisis

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

Como se observa en la Figura 10, la malla vial arterial vital cuenta con el mayor número de puentes, tanto vehiculares como peatonales, seguida por la malla vial Intermedia y Local.

### 3.3. VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES

La información relacionada con el componente de vulnerabilidad sísmica para el portafolio de puentes de la ciudad y utilizada en la presente evaluación del riesgo sísmico, fue procesada y definida mediante la ejecución del contrato de consultoría IDU-1556-2017. A continuación, se presenta de forma general el contenido de este componente:

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.

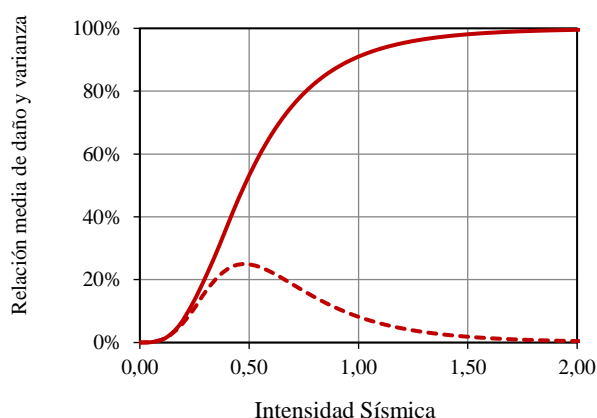


Figura 11. Función de vulnerabilidad típica  
Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

#### 3.3.1. 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 D.C. 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 12 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.

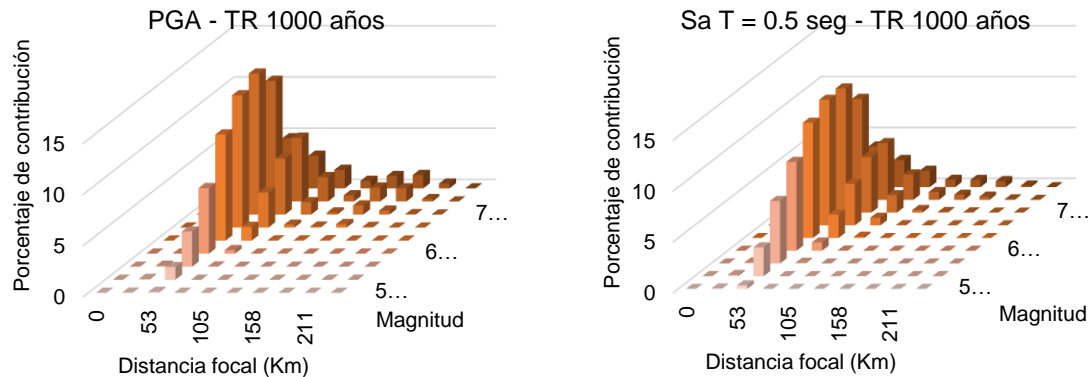


Figura 12. Desagregación Sísmica para Bogotá  
Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

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.

### 3.3.2. 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.

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.



- 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 (PDS) 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

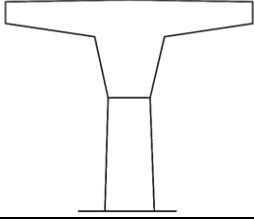
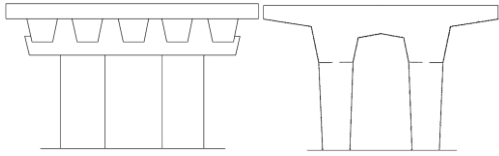
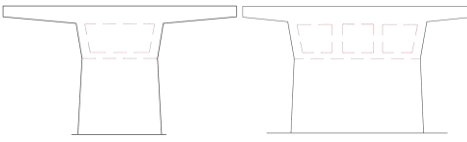
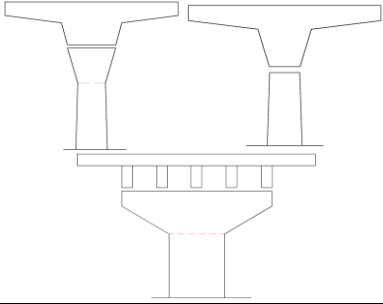
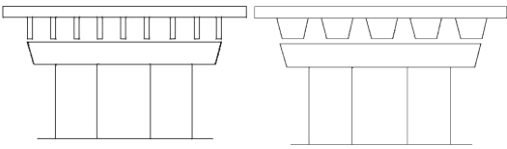
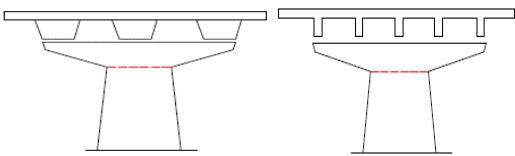
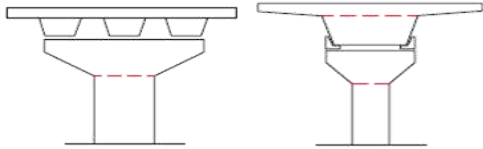
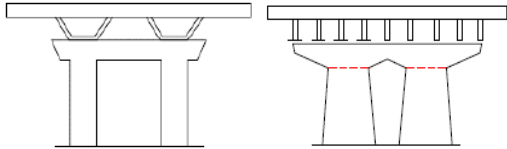
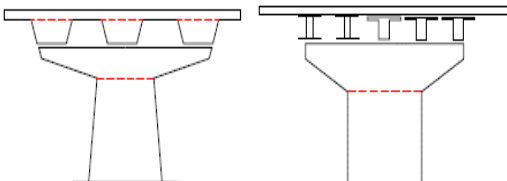
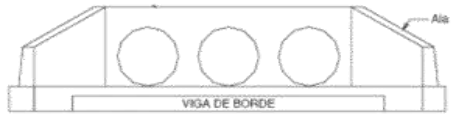
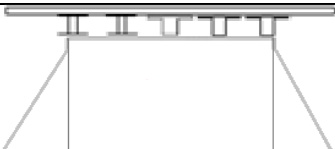
Tipología	Sección transversal	Elemento	PDS
VMH-1, VMH-2 y PMH-1		Columna longitudinal Columna transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal Neopreno Llave de cortante interna	$\mu f_L$ $\mu f_T$ $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm)
VMH-3 y PMH-3		Columna longitudinal Columna transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal Neoprenos Llave de cortante interna	$\mu f_L$ $\mu f_T$ $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm)
VMH-4		Pantalla longitudinal Pantalla transversal Ancho de silla longitudinal Estribo pasivo Estribo transversal	$D_L$ $D_T$ $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (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	$\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $D_L$ $D_T$ $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (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	$\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\mu f_L$ $\mu f_T$ $\delta$ (mm) $\delta$ (mm) $\delta$ (mm)

Tabla 4. Tipologías representativas de puentes

Tipología	Sección transversal	Elemento	PDS
VNI_4		<p>Tope sísmico</p> <p>Neopreno longitudinal</p> <p>Neopreno transversal</p> <p>Neopreno rotacional</p> <p>Pantalla longitudinal</p> <p>Pantalla transversal</p> <p>Ancho de silla longitudinal</p> <p>Estribo pasivo</p> <p>Estribo transversal</p>	<p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>D_L</math></p> <p><math>D_T</math></p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p>
VNH_1, VNH_2, PNH_1 y PNH_2		<p>Tope sísmico</p> <p>Neopreno longitudinal</p> <p>Neopreno transversal</p> <p>Neopreno rotacional</p> <p>Pantalla longitudinal</p> <p>Pantalla transversal</p> <p>Ancho de silla longitudinal</p> <p>Estribo pasivo</p> <p>Estribo transversal</p>	<p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>D_L</math></p> <p><math>D_T</math></p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p>
VNH_3 y PNH_3		<p>Tope sísmico</p> <p>Neopreno longitudinal</p> <p>Neopreno transversal</p> <p>Neopreno rotacional</p> <p>Columna longitudinal</p> <p>Columna transversal</p> <p>Ancho de silla longitudinal</p> <p>Estribo pasivo</p> <p>Estribo transversal</p>	<p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\mu f_L</math></p> <p><math>\mu f_T</math></p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p>
VNH_4 y PNH_4		<p>Tope sísmico</p> <p>Neopreno longitudinal</p> <p>Neopreno transversal</p> <p>Neopreno rotacional</p> <p>Pantalla longitudinal</p> <p>Pantalla transversal</p> <p>Ancho de silla longitudinal</p> <p>Estribo pasivo</p> <p>Estribo transversal</p>	<p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>D_L</math></p> <p><math>D_T</math></p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p>
VBC_1 y PBC_1		<p>Pantalla longitudinal</p> <p>Pantalla transversal</p>	<p><math>D_L</math></p> <p><math>D_T</math></p>
VLS_1 y PLS_1		<p>Neopreno longitudinal</p> <p>Neopreno transversal</p> <p>Neopreno rotacional</p> <p>Estribo pasivo</p> <p>Estribo transversal</p>	<p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p> <p><math>\delta</math> (mm)</p>

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

- **Conformación de modelos no lineales paramétricos**

La conformación de modelos no lineales se realiza con el fin de simular el comportamiento dinámico no lineal de cada una de las tipologías más representativas. Cada tipología tiene una configuración geométrica particular, y puede tener o no algún tipo de componente determinado.

En la Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se presentan los formatos para las tipologías más representativas del portafolio de puentes de la ciudad a corte junio de 2020, los cuales incluyen la configuración geométrica y la ubicación de los diferentes tipos de componentes dentro de los modelos ejecutados.

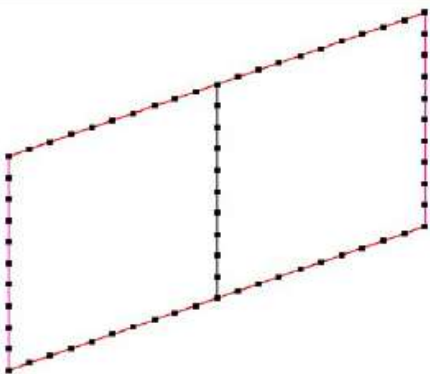
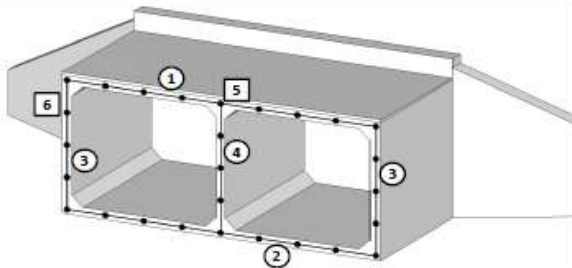
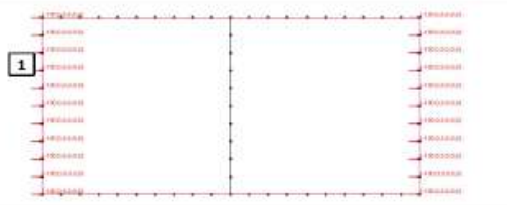
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees															
Tipología VBC-1															
Modelo															
															
Losa superior, inferior y muros															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Losa superior</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Losa inferior</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Muro exterior</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Muro interior</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Conexión continua losa - muro</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Suelo de relleno</td> </tr> </tbody> </table>	Componentes y conectividad		1	Losa superior	2	Losa inferior	3	Muro exterior	4	Muro interior	5	Conexión continua losa - muro	6	Suelo de relleno
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															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes cargados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Nodos muro exterior</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	Nodos muro exterior	Masa		Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia							
Componentes cargados															
1	Nodos muro exterior														
Masa															
Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia															
<p>Convenciones</p>	<p>Elementos tipo linea <input type="radio"/> Elementos sin longitud <input type="checkbox"/></p>														

Figura 13. Formato de modelación - Tipología VBC-1

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

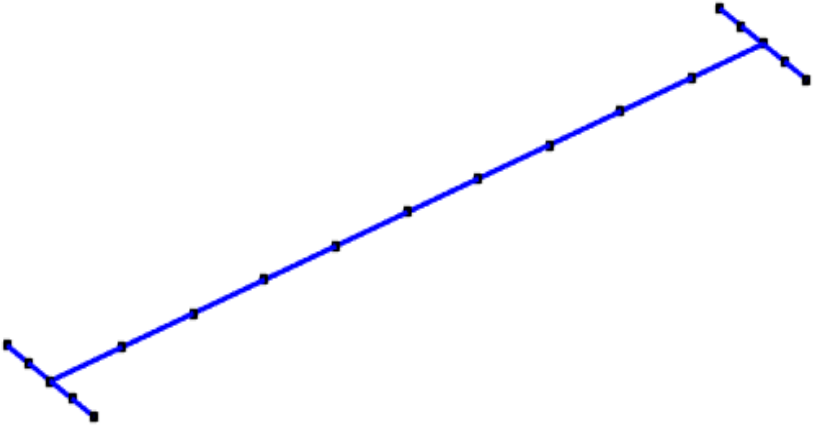
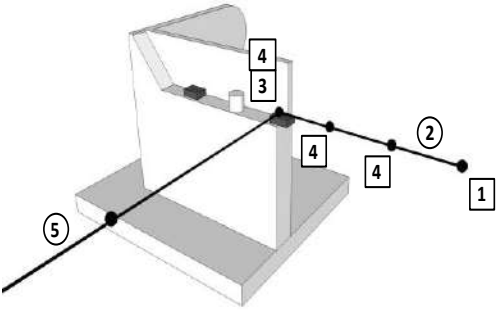
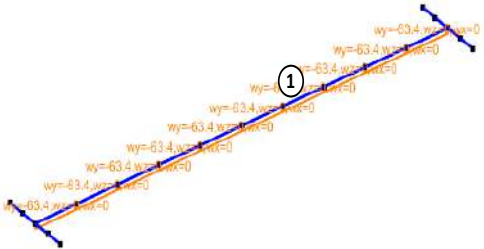
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees	
Tipología VLS-1	
Modelo	
	
Estribos - Superestructura	
	Componentes y conectividad
	1 Tope sísmico
	2 Elemento rígido
	3 Conexión continua tablero - elemento rígido
	4 Neopreno
	5 Tablero
Carga vertical y masa	
	Componentes cargados
	1 Tablero
	Masa
	Todos los elementos lineales tienen la masa concentrada en los nodos extremos de acuerdo con su aferencia
Convenciones	Elementos tipo línea ○ Elementos sin longitud □

Figura 14. Formato de modelación - Tipología VLS-1

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

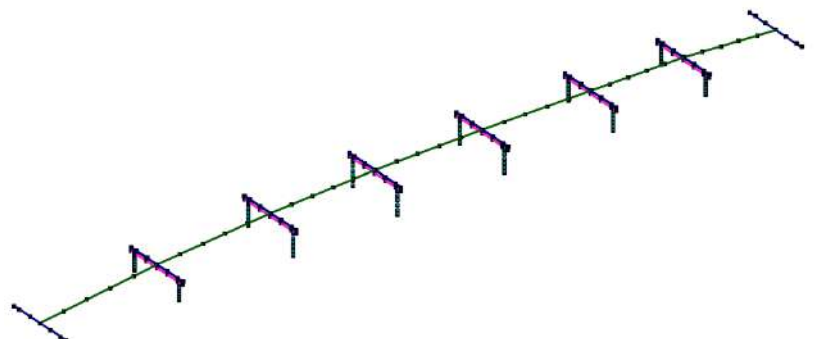
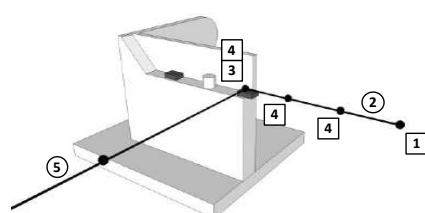
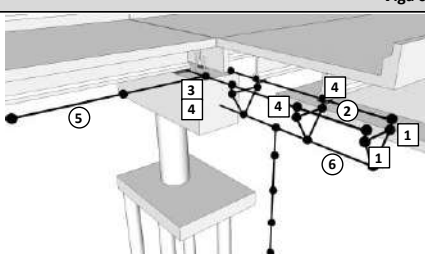
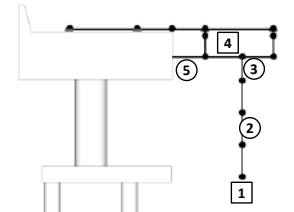

Modelación de tipologías de puentes en OpenSees	
Tipología VNI-3	
Modelo	
	
Estribos - Superestructura	
	Componentes y conectividad
	1 Tope sísmico
	2 Elemento rígido
	3 Conexión continua tablero - elemento rígido
	4 Neopreno
	4 Llave de cortante interna
	4 Relleno de estribo
	5 Tablero
Viga cabezal - Superestructura	
	Componentes y conectividad
	1 Tope sísmico
	2 Elemento rígido
	3 Conexión continua tablero - elemento rígido
	4 Neopreno
	4 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 línea <input type="radio"/> Elementos sin longitud <input type="checkbox"/>

Figura 15. Formato de modelación - Tipología VNI-3

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017



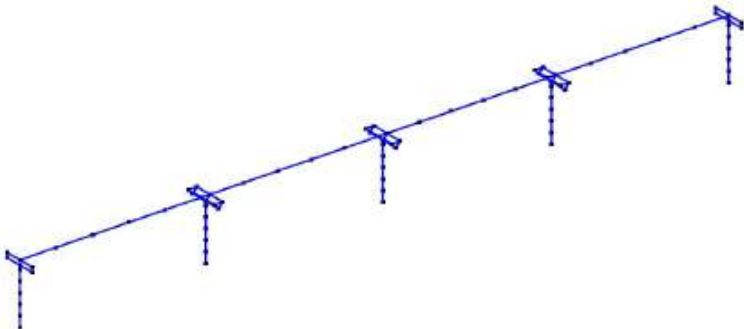
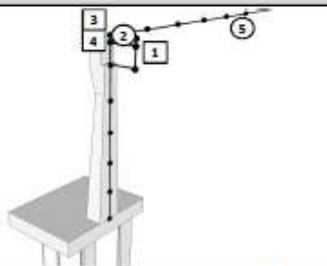
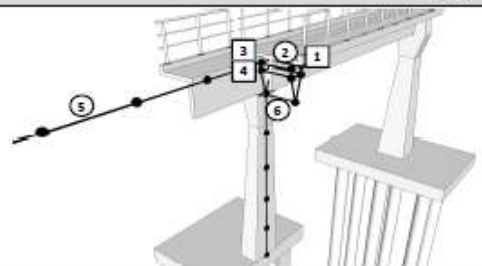
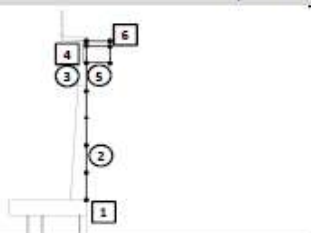
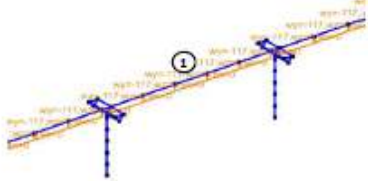
Modelación de tipologías de puentes en OpenSees	
Tipología PNI-1	
Modelo	
	
Pilas extremas - Superestructura	
	Componentes y conectividad
	1 Tope sísmico
	2 Elemento rígido
	3 Conexión continua tablero - elemento rígido
	4 Neopreno
	5 Tablero
Pilas internas - Superestructura	
	Componentes y conectividad
	1 Tope sísmico
	2 Elemento rígido
	3 Conexión continua tablero - elemento rígido
	4 Neopreno
	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 referencia	
Convenciones	Elementos tipo línea <input type="radio"/> Elementos sin longitud <input type="checkbox"/>

Figura 16. Formato de modelación - Tipología PNI-1

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

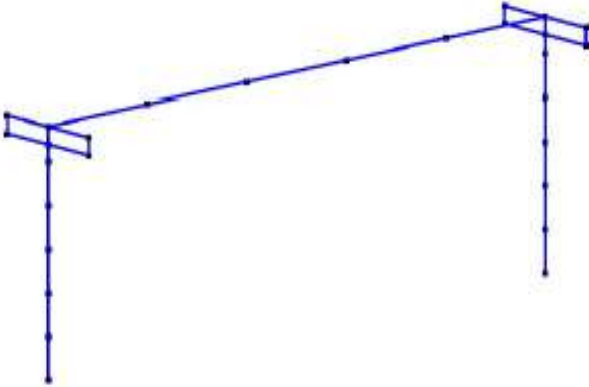
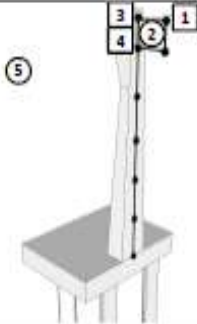

Modelación de tipologías de puentes en OpenSees															
Tipología PLS-1															
Modelo															
															
Pilas extremas - Superestructura															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Componentes y conectividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <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														
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															
<b>Convenciones</b>	Elementos tipo linea <input checked="" type="radio"/> Elementos sin longitud <input type="checkbox"/>														

Figura 17. Formato de modelación - Tipología PLS-1

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

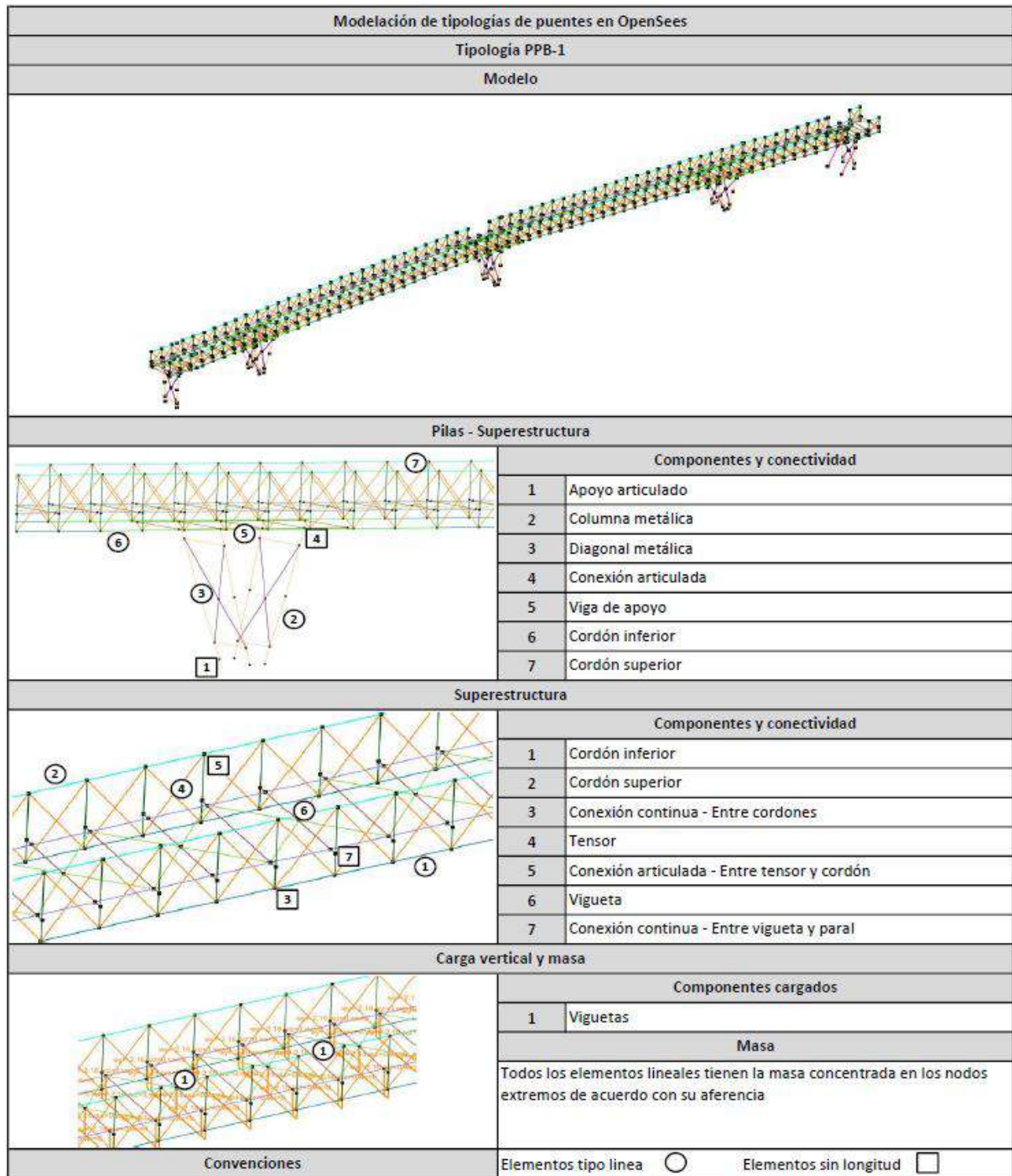


Figura 18. Formato de modelación - Tipología PPB-1

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

#### • Catálogo de funciones de vulnerabilidad

En la Figura 19 se presentan las funciones de vulnerabilidad de las tipologías más representativas presentes en el portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá a corte junio de 2020. 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.

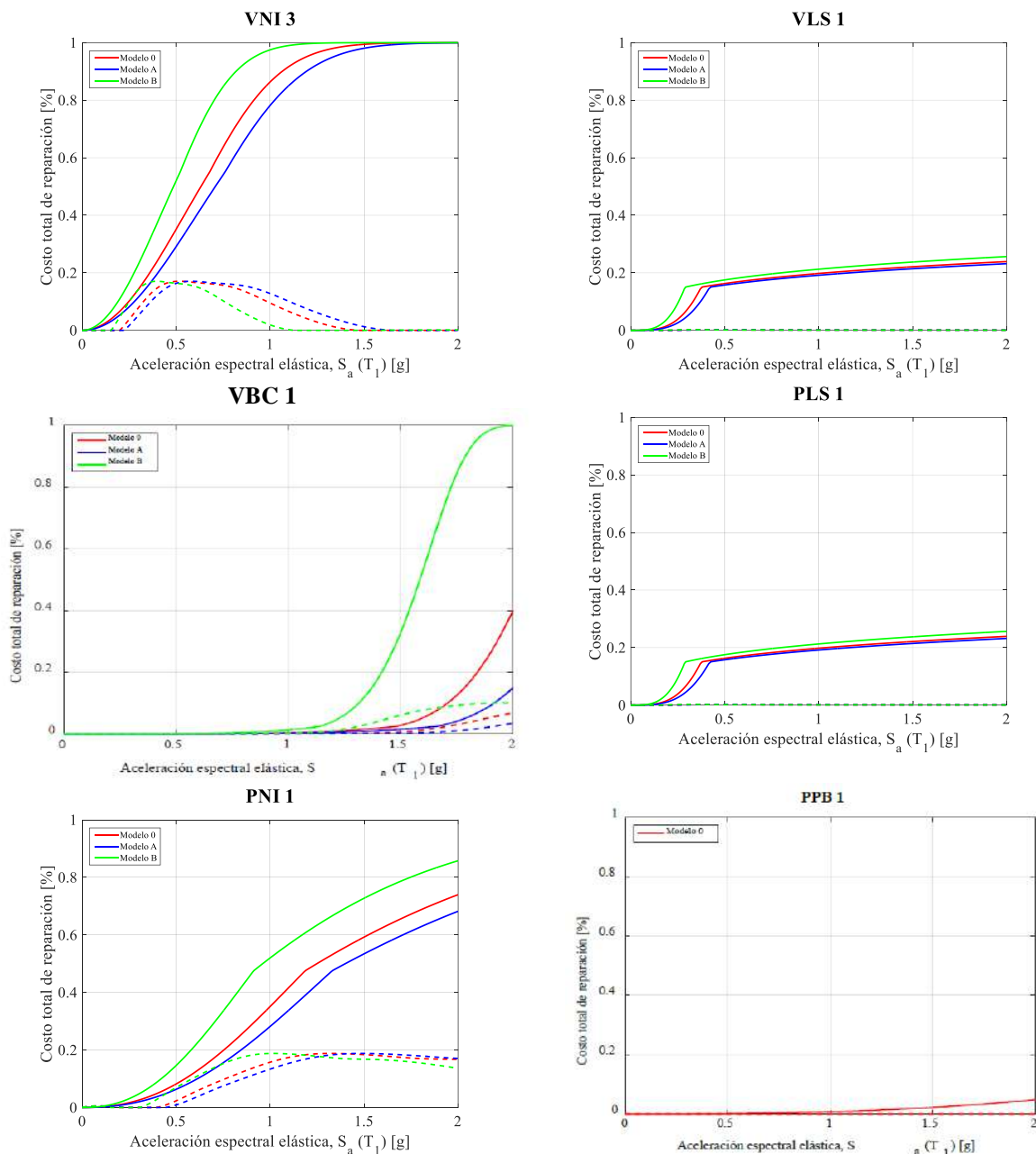


Figura 19. Funciones de vulnerabilidad tridimensional por tipología

Fuente: Contrato de consultoría IDU-1556-2017

A los 33 nuevos puentes que hacen parte del presente portafolio, se les asignó la correspondiente función de vulnerabilidad, con el fin de ser utilizada en la evaluación del riesgo sísmico. La información base para

la asignación de las funciones de vulnerabilidad, corresponde a la relacionada con el catalogo elaborado mediante el contrato de consultoría IDU-1556-2017. Esta asignación se realizó teniendo en cuenta los parámetros representativos de cada puente como lo son: nivel de diseño, tipo de suelo, curvatura horizontal o vertical, ángulo esviaje, numero de luces y cantidad de elementos verticales.

#### 4. RIESGO SÍSMICO PARA EL PORTAFOLIO GENERAL DE PUENTES

El riesgo sísmico del portafolio de puentes de la ciudad a corte junio de 2020, se representa mediante las pérdidas máximas probables (PML) y las pérdidas anuales esperadas (PAE) en términos absolutos (COP\$ millones) o en términos relativos (‰ - al millar). La Figura 20 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.

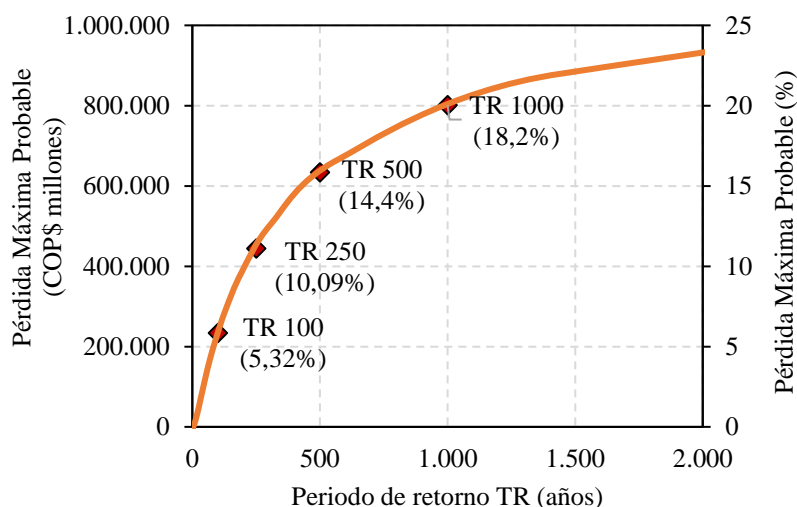


Figura 20. Curva de Pérdida Máxima Probable (PML)

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

Tabla 5. Pérdida anual esperada y pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno

<b>Valor Total Expuesto</b>	COP\$ millones	4.404.488
<b>Pérdida Anual Esperada (PAE)</b>	COP\$ millones	9.981
	‰	2,27
<b>PMP</b>		
<b>Periodo de retorno (TR)</b>	<b>%</b>	<b>COP\$ millones</b>
100	5,32	234.100
250	10,09	444.387
500	14,40	634.106
1000	18,20	801.402

(Valores a abril de 2020)

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

Los resultados de la evaluación probabilista del riesgo pueden ser visualizados como mapas de distribución de PAE absoluta y PAE relativa. La Figura 21 y Figura 22 presentan las distribuciones geográficas de la PAE absoluta y relativa, respectivamente para el portafolio de exposición.



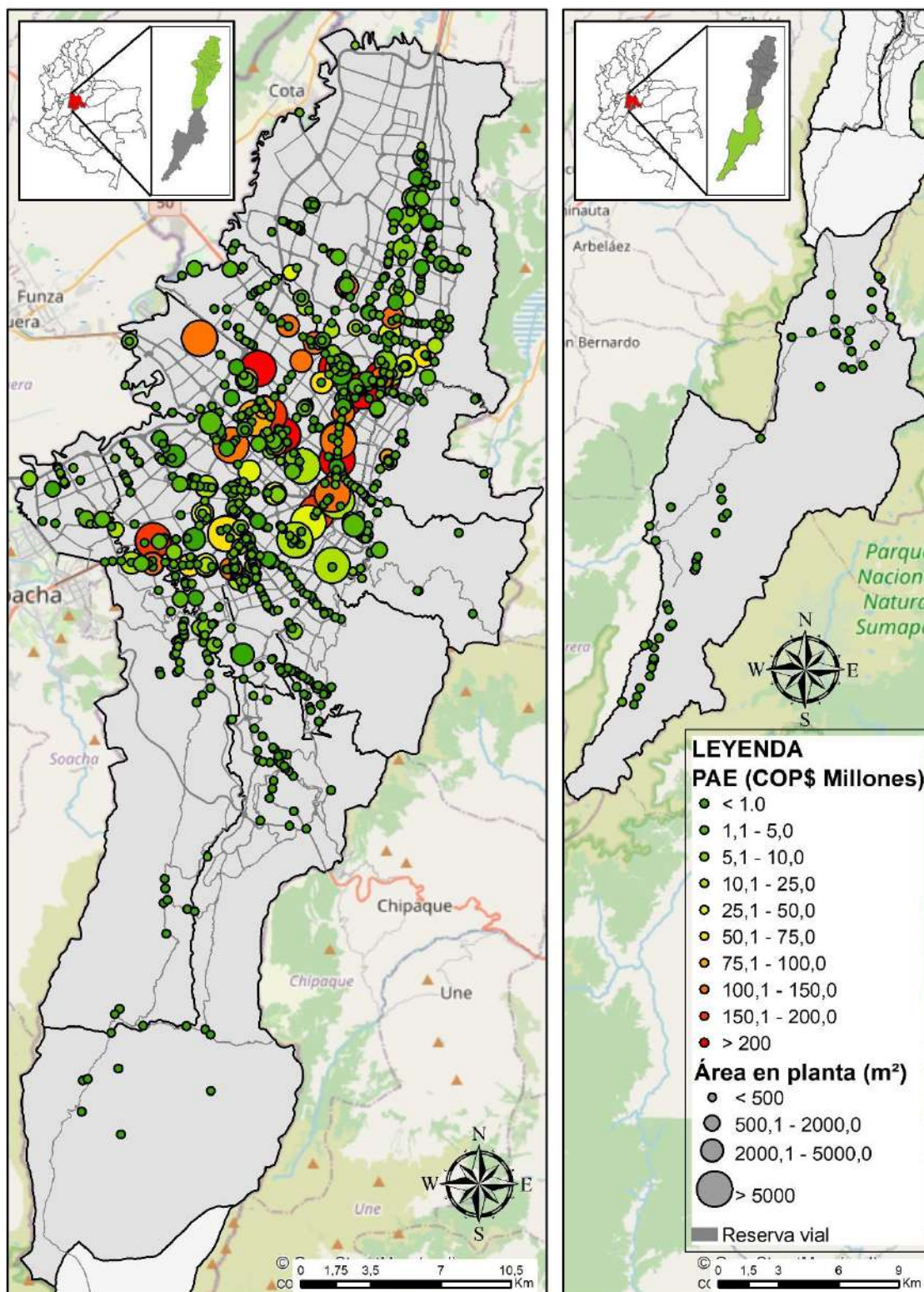


Figura 21. Distribución geográfica de la PAE absoluta para el portafolio de puentes de Bogotá

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

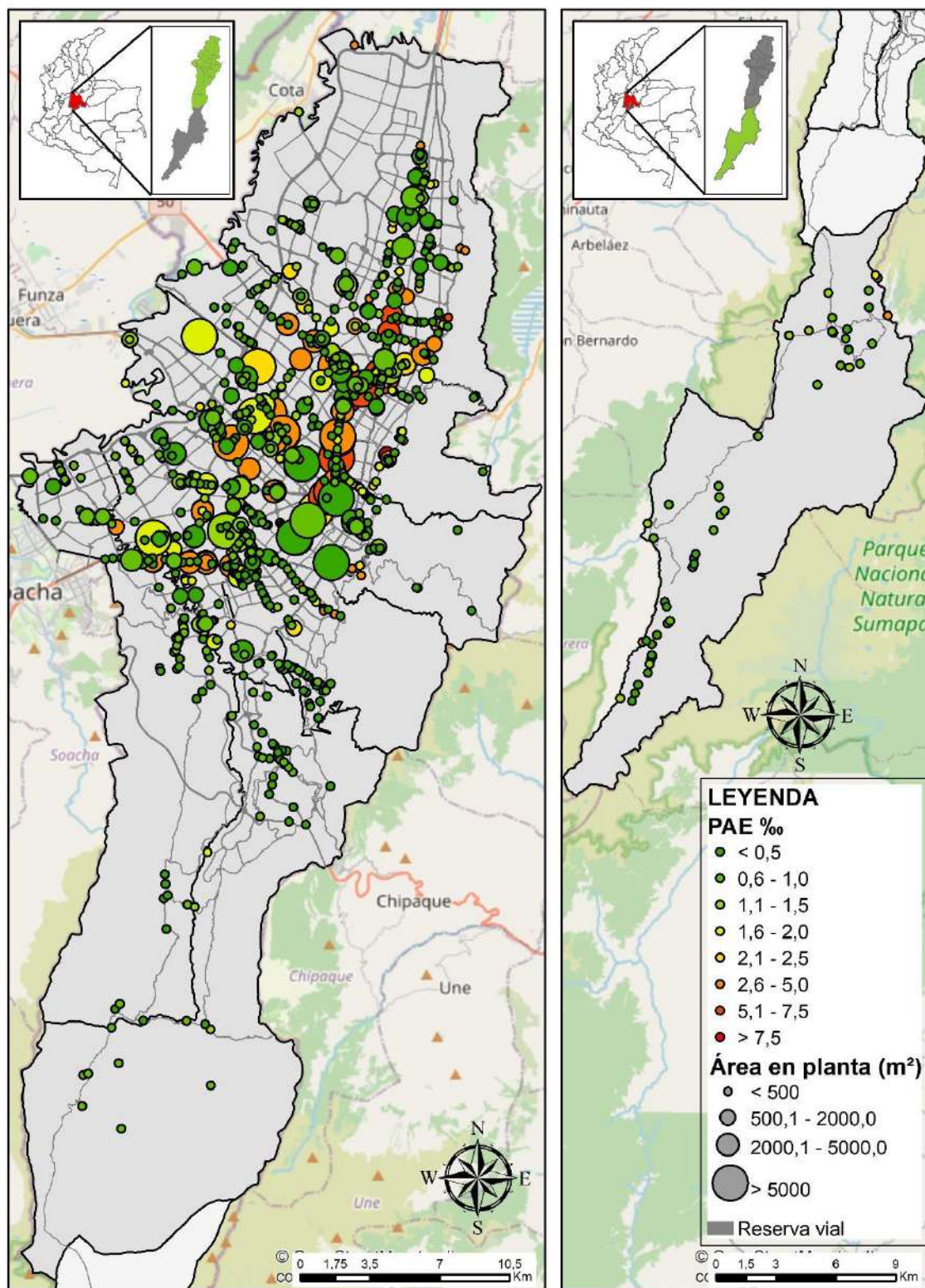


Figura 22. Distribución geográfica de la PAE relativa para el portafolio de puentes de Bogotá

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU



En las anteriores figuras se puede observar cómo 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.

La distribución de la PAE absoluta y PAE relativa de los puentes agrupados en los usos vehicular y peatonal se evidencian en la Tabla 6 y en la Figura 23.

Tabla 6. PAE absoluta y relativa por tipo de puente para el portafolio general

Tipo de Puente	Número	Pérdida Anual Esperada (COPS millones)	Pérdida Anual Esperada (‰)	Valor expuesto (COPS millones)
Vehicular	565	\$ 9.549,94	2,60	\$ 3.675.208,66
Peatonal	427	\$ 430,75	0,59	\$ 729.279,67
<b>TOTAL</b>	<b>992</b>	<b>\$ 9.980,69</b>	<b>2,27</b>	<b>\$ 4.404.488,34</b>

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

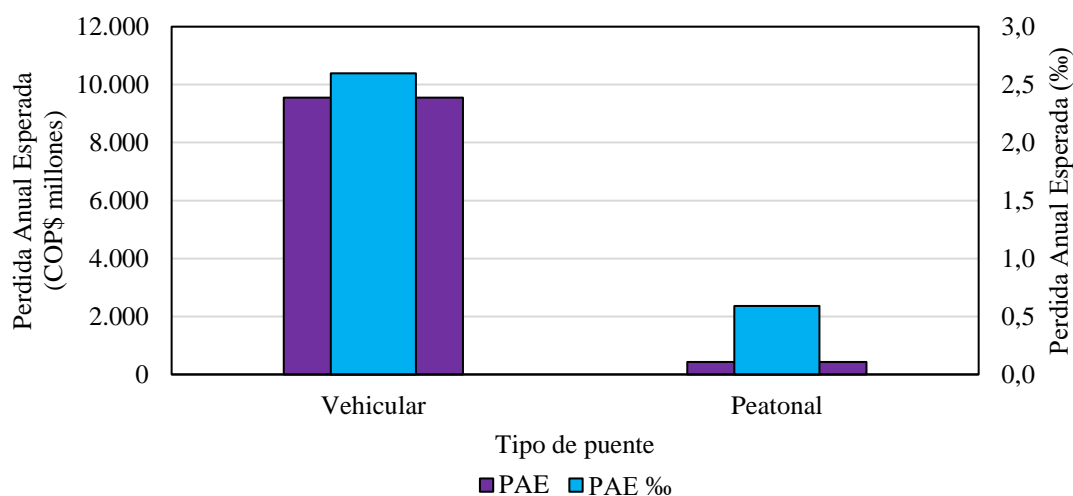


Figura 23. PAE absoluta y relativa del portafolio general por tipo de puente

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

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.

Los mapas de distribución de PAE absoluta y relativa para los puentes vehiculares se presentan en la Figura 24 y Figura 25, y para los peatonales en la Figura 26 y Figura 27. 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.

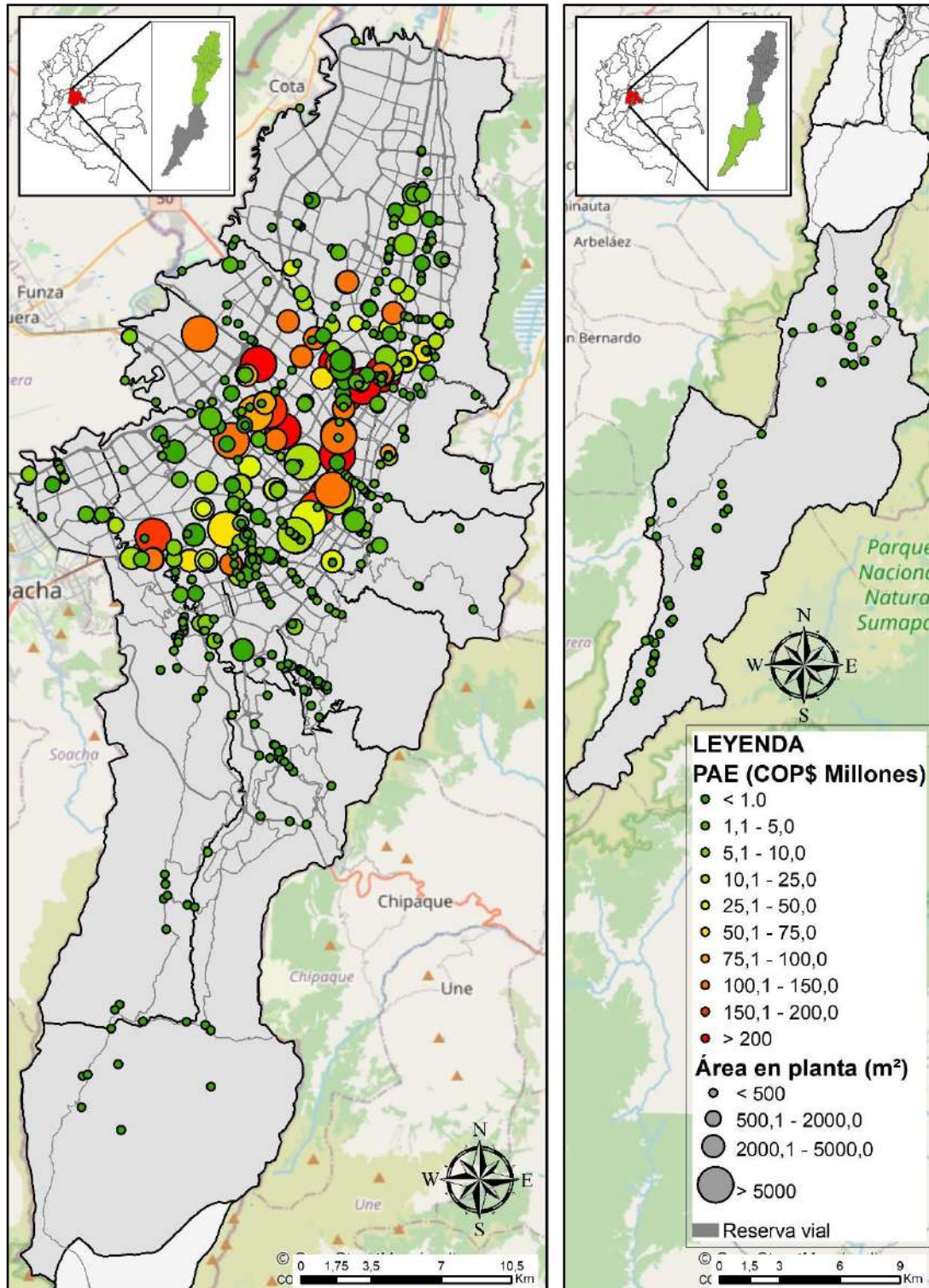


Figura 24. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes vehiculares

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU



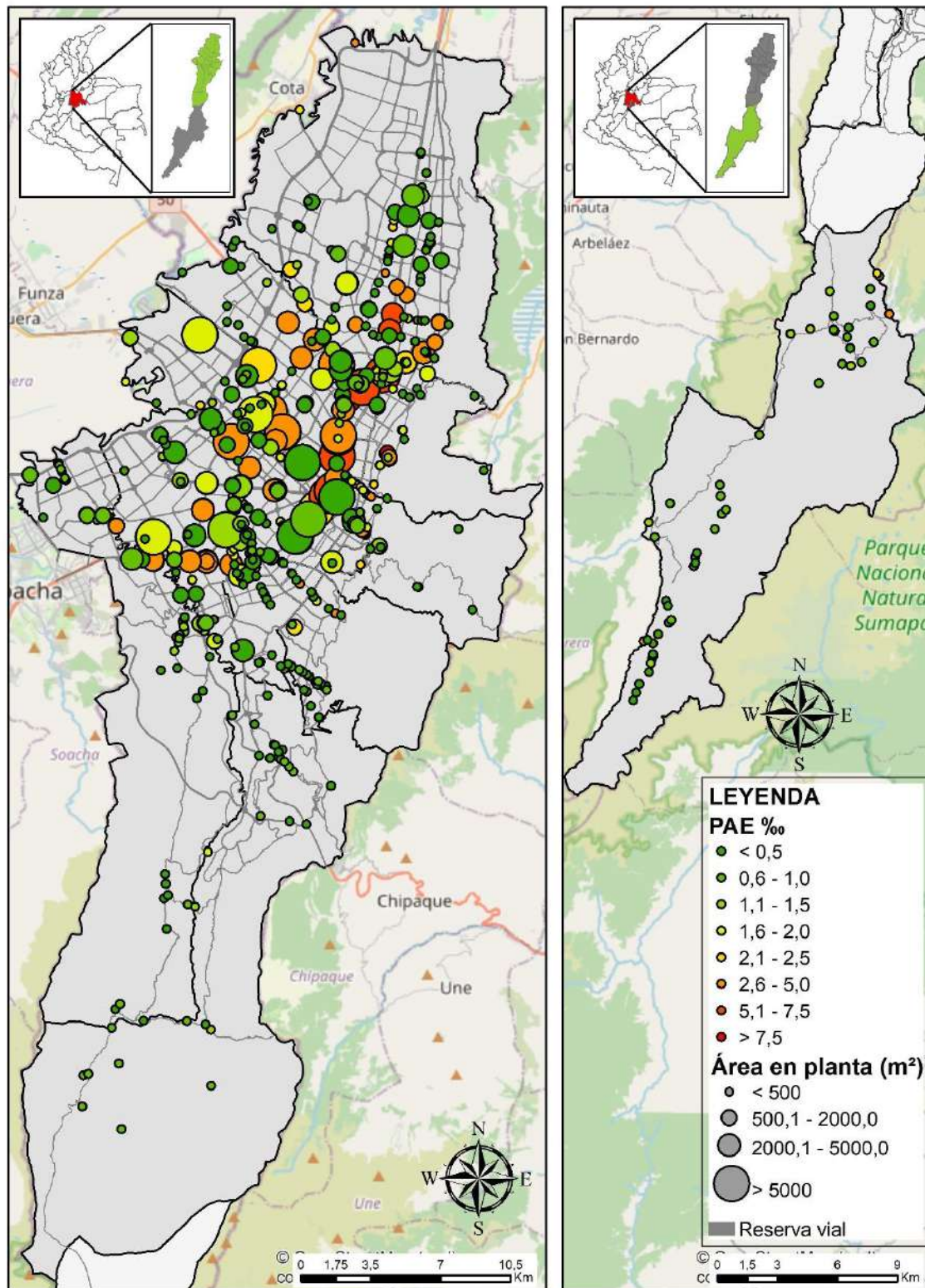


Figura 25. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes vehiculares

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU



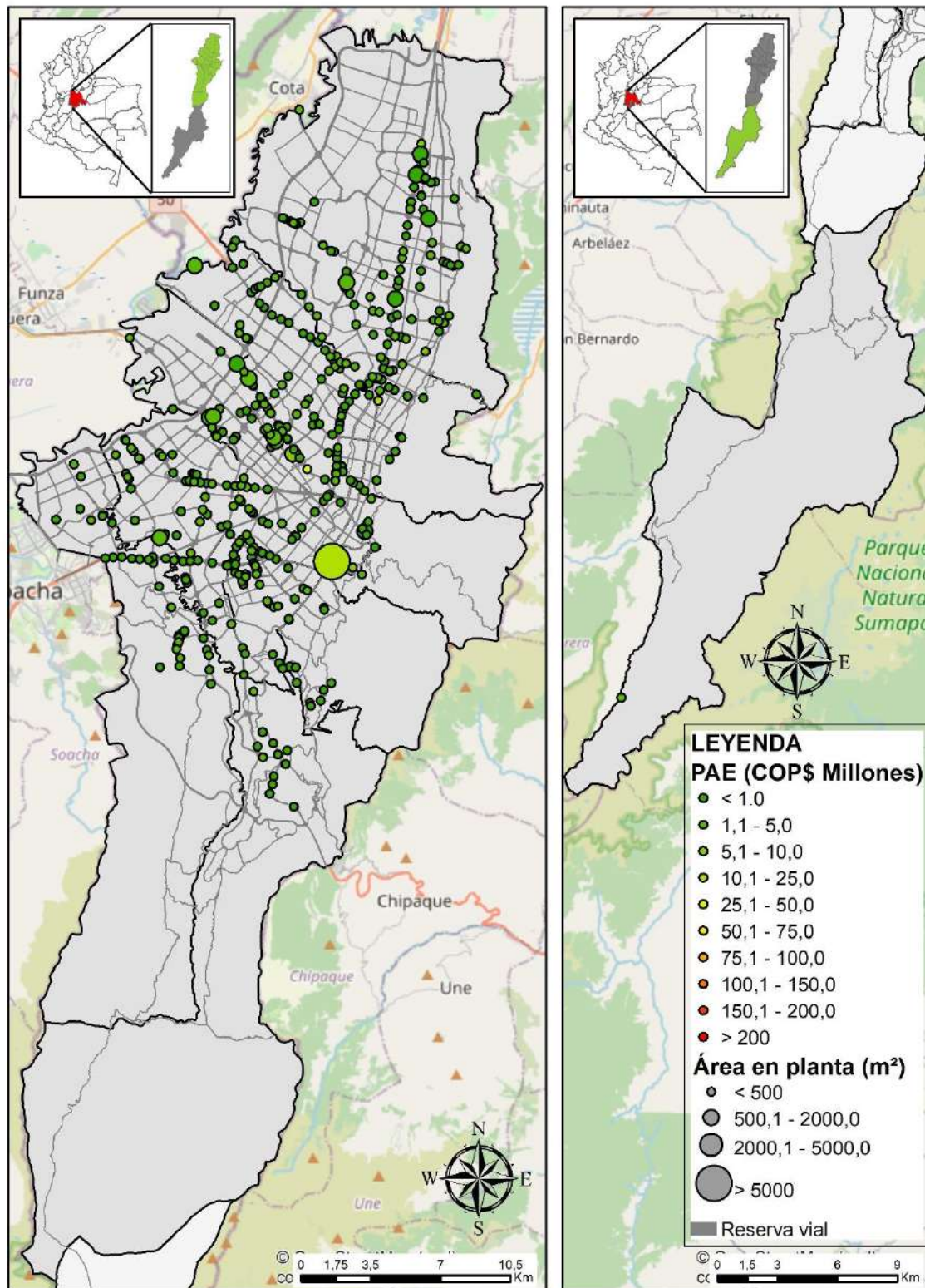


Figura 26. Distribución geográfica de PAE absoluta para los puentes peatonales

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU

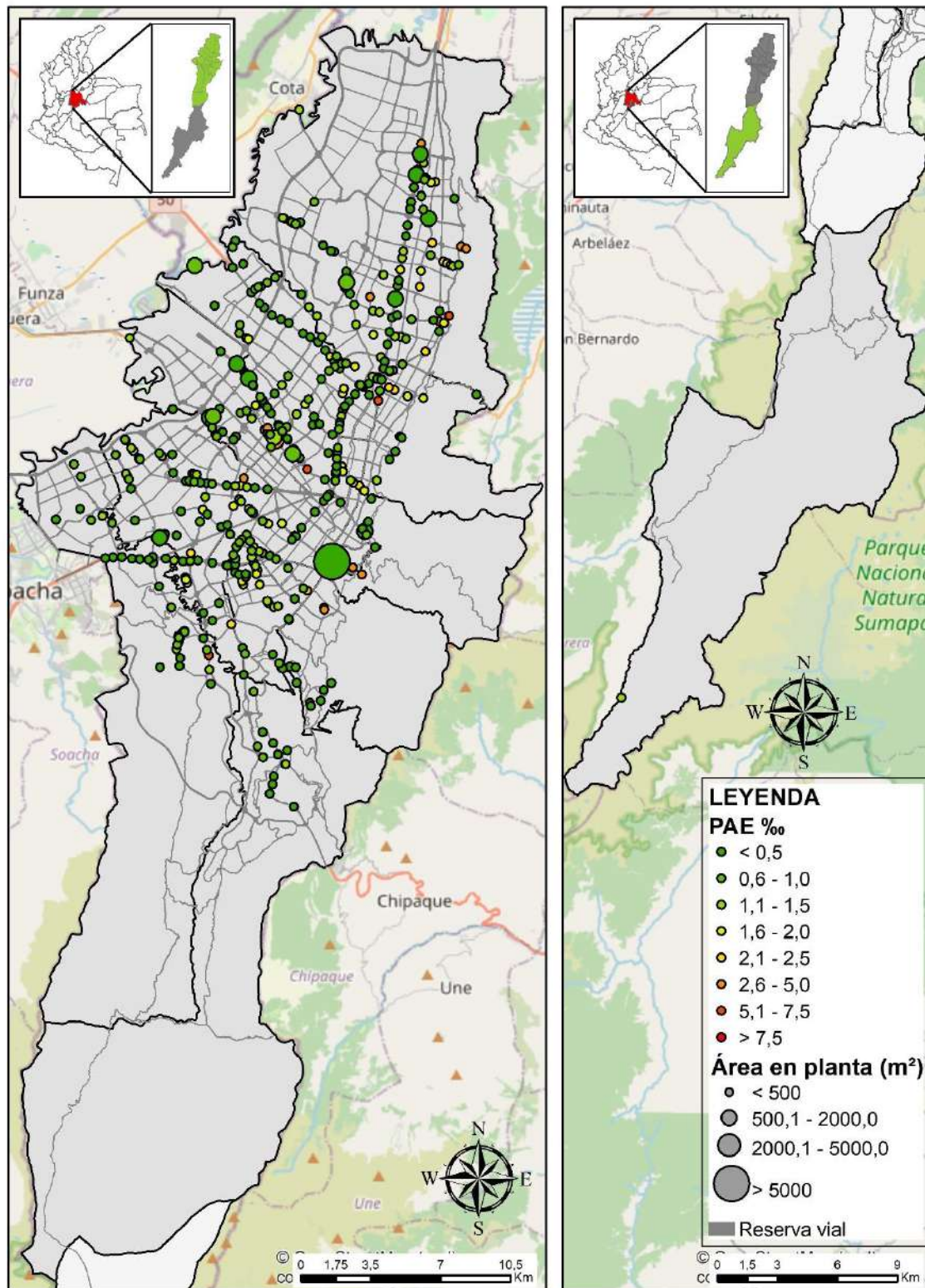


Figura 27. Distribución geográfica de PAE relativa para los puentes peatonales

Fuente: Dirección Técnica Estratégica - IDU



#### 4.1. RIESGO SÍSMICO DEL PORTAFOLIO DE EXPOSICIÓN DE ACUERDO CON SU CARACTERIZACIÓN

##### 4.1.1. Riesgo sísmico del portafolio de exposición por tipologías estructurales

Los resultados de la evaluación del riesgo en términos de la PAE para los usos vehicular y peatonal se agrupan por tipologías estructurales, lo que permite identificar en cuales tipologías se concentra en mayor medida el riesgo sísmico.

La Figura 28 y Figura 29 presentan la pérdida anual esperada absoluta y relativa para cada una de las tipologías definidas, para los puentes de tipo vehicular y peatonal respectivamente.

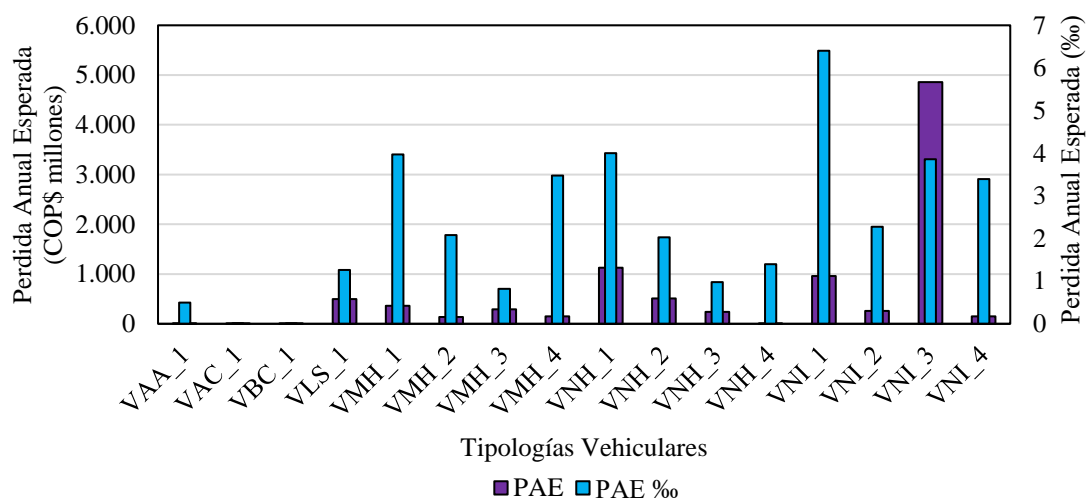


Figura 28. PAE absoluta y relativa para las tipologías vehiculares

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

En el caso de los puentes vehiculares se observa que 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 4.0%, respectivamente.

Por otra parte, la pérdida económica absoluta más alta tiene un valor de COP\$4.858 millones y está asociada a la tipología con la mayor área construida y el mayor valor físico expuesto, es decir la VNI\_3. Este valor de PAE representa el 3.9% 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 6.4%. Por último, la tipología con menor PAE relativa dentro de los puentes vehiculares corresponde a la tipología VBC\_1, con una pérdida relativa aproximada de 0.01%, debido a su baja vulnerabilidad sísmica.

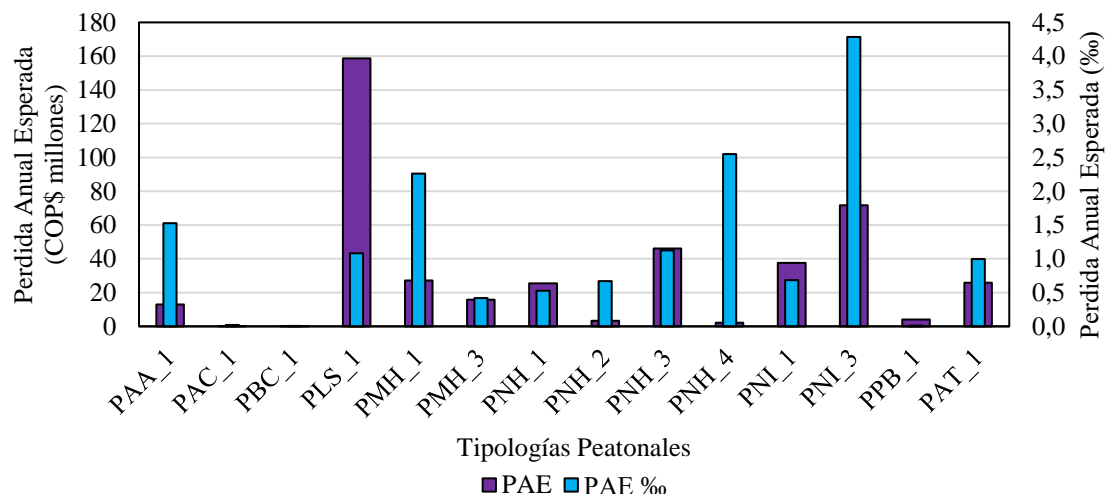


Figura 29. PAE absoluta y relativa para las tipologías peatonales

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

Para los puentes peatonales, la tipología PLS\_1 presenta los valores máximos de pérdida absoluta física (COP\$158.6 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 (2.26% y 1.53%, 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 aproximada de 0.01%, debido a su baja vulnerabilidad sísmica.

#### 4.1.2. Riesgo sísmico del portafolio de exposición por tipo de malla vial

Los resultados para el portafolio de puentes por el tipo de malla vial en el que se ubica se presentan en la Figura 30 para los puentes vehiculares, y en la Figura 31 para los puentes peatonales.

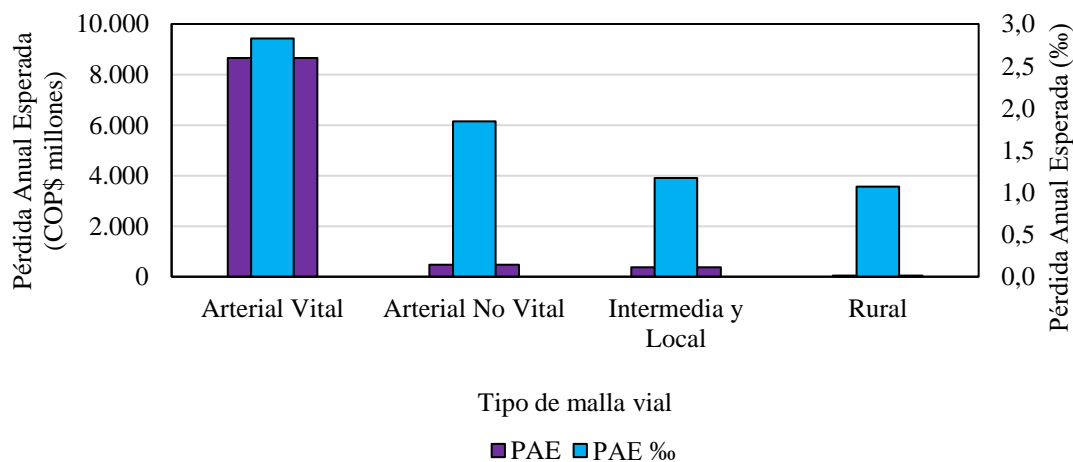


Figura 30. PAE absoluta y relativa de los puentes vehiculares según el tipo de malla vial

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

Para los puentes vehiculares ubicados en los cuatro grupos de análisis del riesgo, la pérdida absoluta y la pérdida relativa presentan una tendencia decreciente iniciando con un valor mayor para los puentes localizados en la malla vial arterial vital y finalizando con un menor valor para las estructuras ubicadas en la malla vial rural.

De los 565 puentes vehiculares que hacen parte del portafolio de exposición, 257 se ubican sobre la malla arterial vital, para estos puentes la PAE presenta un valor de COP\$8.658 millones y una PAE relativa de 2,83%.

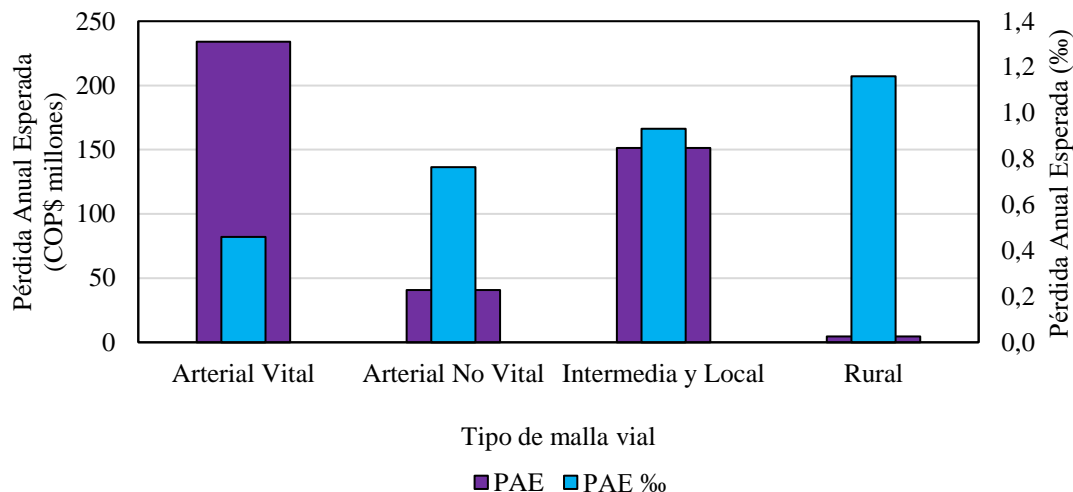


Figura 31. PAE absoluta y relativa de los puentes peatonales según el tipo de malla vial

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

En cuanto a los puentes peatonales la mayor PAE absoluta la presenta las estructuras ubicadas en la malla vial arterial vital con un valor de COP\$234 millones, seguida por los puentes ubicados en la malla vial intermedia y local con un valor de COP\$151 millones, los puentes localizados en la malla vial arterial no vital con un valor de COP\$40,7 millones y las estructuras ubicadas en la malla vial rural con un valor de COP\$4,6 millones.

La pérdida relativa presenta una tendencia creciente iniciando con un valor menor para los puentes ubicados en la malla vial arterial vital y finalizando con un mayor valor para las estructuras ubicadas en la malla vial rural.

Por otra parte, en la Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39, se presentan los resultados correspondientes al análisis de la distribución de tipologías vehiculares y peatonales para cada tipo de malla vial.

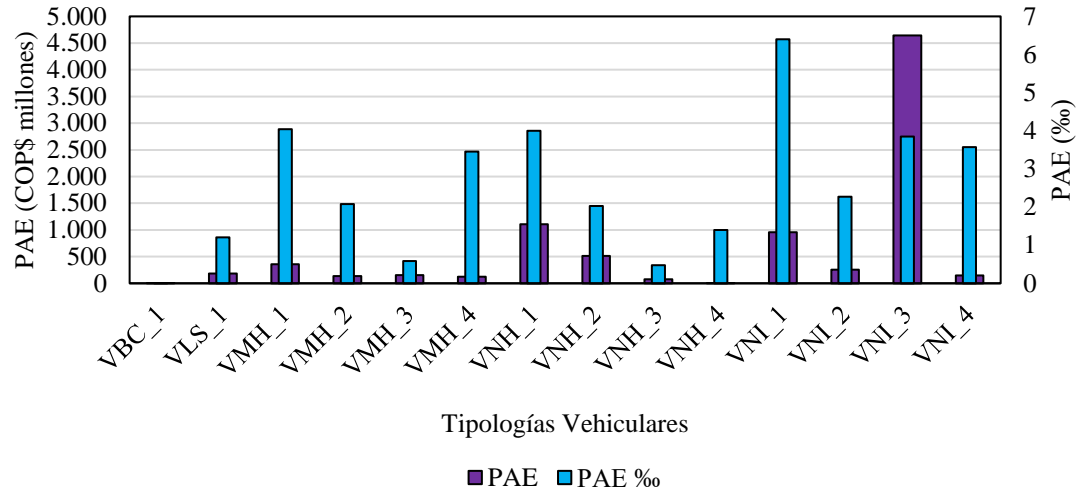


Figura 32. PAE absoluta y relativa de las tipologías vehiculares en la malla vial arterial vital  
Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

En el caso de los puentes vehiculares que se ubican en la malla vial arterial vital se observa que 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 4.05‰, respectivamente.

Por otra parte, la pérdida económica absoluta más alta tiene un valor de COP\$4.645 millones y está asociada a la tipología con la mayor área construida y el mayor valor físico expuesto, es decir la VNI\_3.

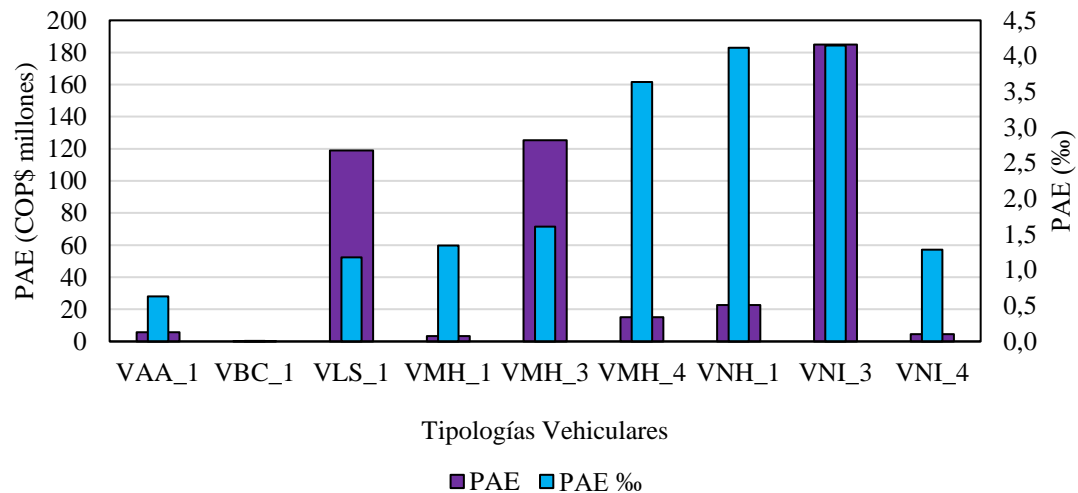


Figura 33. PAE absoluta y relativa de las tipologías vehiculares en la malla vial arterial no vital  
Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

En cuanto a los puentes vehiculares ubicados en la malla vial arterial no vital, se observa que la pérdida económica absoluta más alta tiene un valor de COP\$185 millones y está asociada a la tipología con la mayor área construida y el mayor valor físico expuesto, es decir la VNI\_3. Las tipologías más vulnerables al riesgo sísmico son VNI\_3, VNH\_1 y VMH\_4 presentando valores de PAE relativa de 4.15‰, 4.12‰ y 3.64‰, respectivamente.

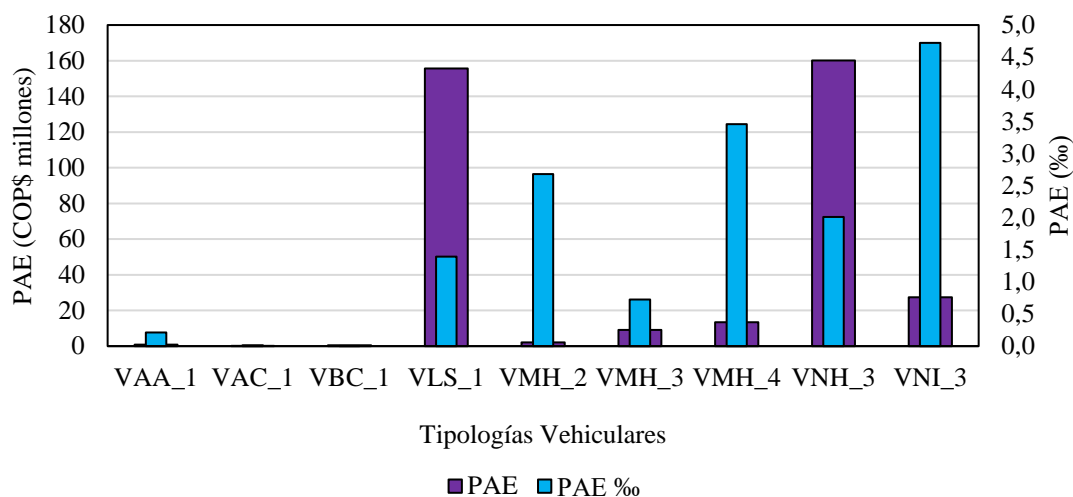


Figura 34. PAE absoluta y relativa de las tipologías vehiculares en la malla vial intermedia y local  
Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

Para las estructuras vehiculares ubicadas en la malla vial intermedia y local, las tipologías que presentan mayor PAE relativa son VNI\_3, VMH\_4 y VMH\_2 con 4.72‰, 3.46‰ y 2.68‰ respectivamente, lo que nos indica que estas tipologías son las más vulnerables al riesgo sísmico ubicadas en este tipo de malla vial.

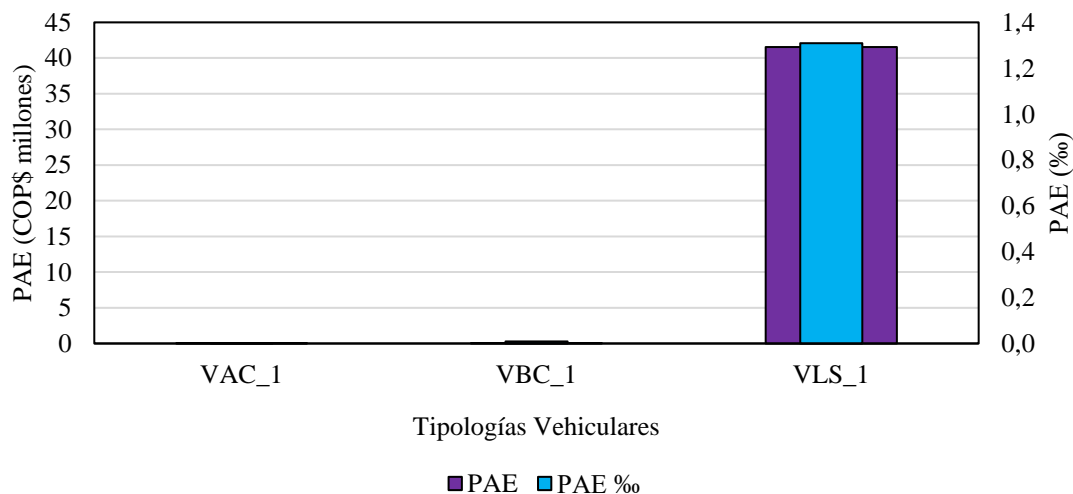


Figura 35. PAE absoluta y relativa de las tipologías vehiculares en la malla vial rural  
Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

Los puentes vehiculares que se encuentran ubicados en la malla vial rural, se encuentran representados por tres tipologías correspondientes a la VLS\_1, VBC\_1 y VAC\_1, siendo la tipología VLS\_1 la más vulnerable al riesgo sísmico con una PAE relativa de 1.31‰.



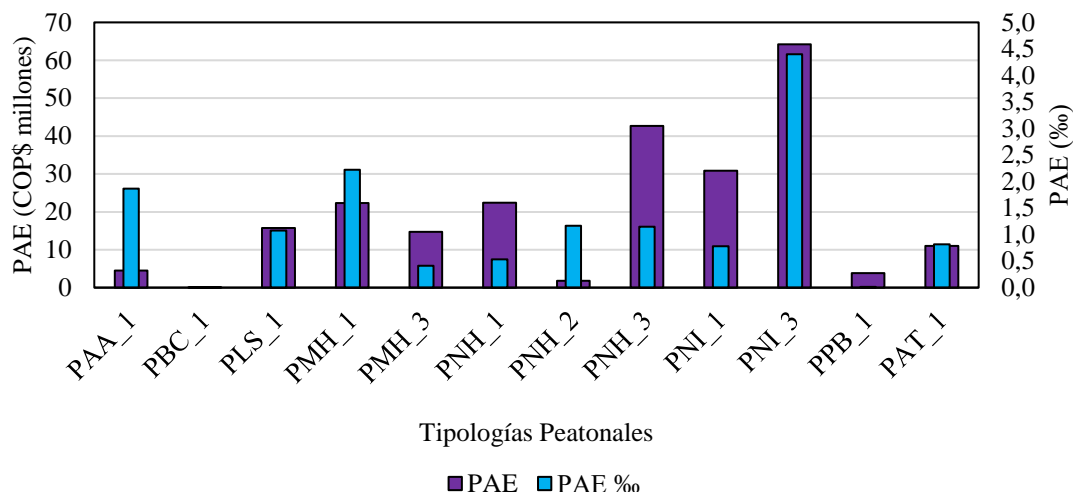


Figura 36. PAE absoluta y relativa de las tipologías peatonales en la malla vial arterial vital

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

En el caso de los puentes peatonales que se ubican en la malla vial arterial vital, se observa que las tipologías más vulnerables al riesgo sísmico son PNI\_3, PMH\_1 y PAA\_1 presentando valores de PAE relativa de 4.4%, 2.22% y 1.87%, respectivamente.

Por otra parte, la pérdida económica absoluta más alta tiene un valor de COP\$64,21 millones y está asociada a la tipología con la mayor área construida y el mayor valor físico expuesto, es decir la PNI\_3.

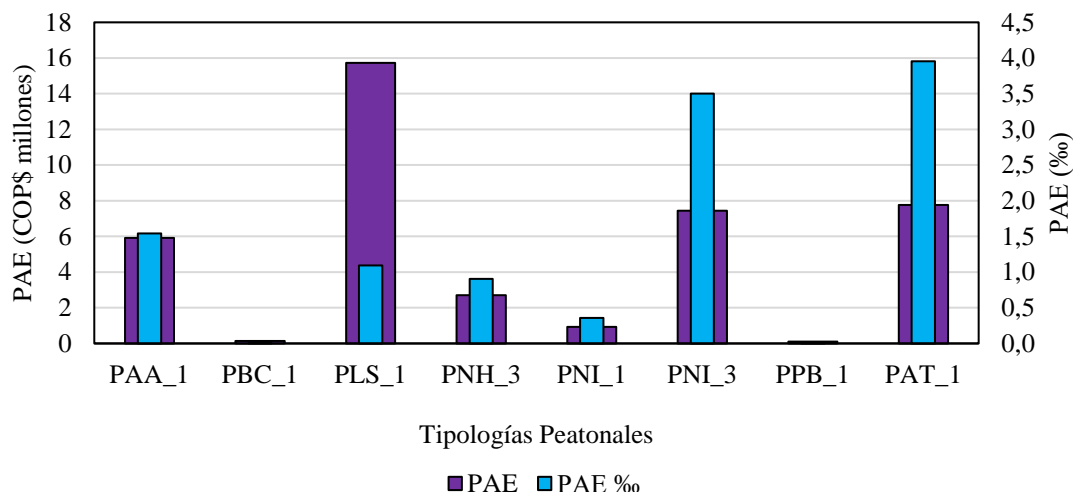


Figura 37. PAE absoluta y relativa de las tipologías peatonales en la malla vial arterial no vital

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

En cuanto a los puentes peatonales ubicados en la malla vial arterial no vital, se observa que la pérdida económica absoluta más alta tiene un valor de COP\$15,72 millones y está asociada a la tipología con la mayor área construida y el mayor valor físico expuesto, es decir la PLS\_1. Las tipologías más vulnerables al riesgo sísmico son PAT\_1, PNI\_1 y PAA\_1 presentando valores de PAE relativa de 3.95%, 3.50% y 1.54%, respectivamente.

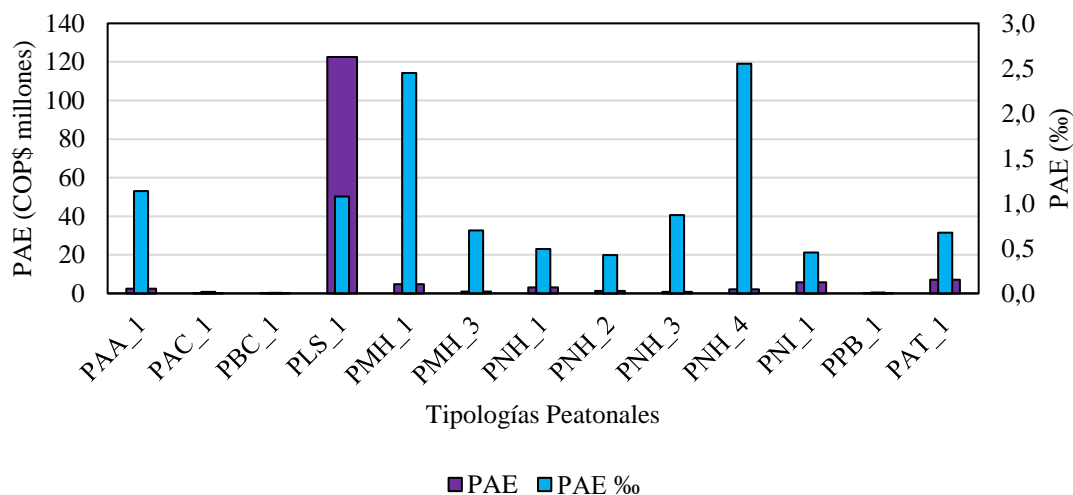


Figura 38. PAE absoluta y relativa de las tipologías peatonales en la malla vial intermedia y local

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

Para las estructuras peatonales ubicadas en la malla vial intermedia y local, las tipologías que presentan mayor PAE relativa son PNH\_4, PMH\_1 y PAA\_1 con 2.55‰, 2.45‰ y 1.14‰ respectivamente, lo que nos indica que estas tipologías son las más vulnerables al riesgo sísmico en este tipo de malla vial.

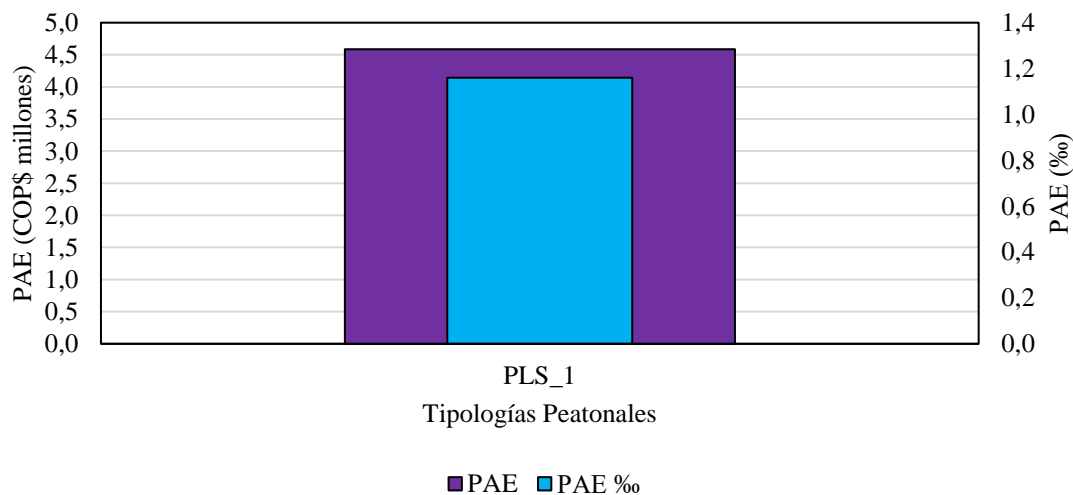


Figura 39. PAE absoluta y relativa de las tipologías peatonales en la malla vial rural

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

Los puentes peatonales que se encuentran ubicados en la malla vial rural, están representados por la tipología PLS\_1 con una PAE relativa de 1.16‰.

## 4.2. RIESGO SÍSMICO DEL PORTAFOLIO DE EXPOSICIÓN POR LOCALIDAD

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 40 y Figura 41, respectivamente.

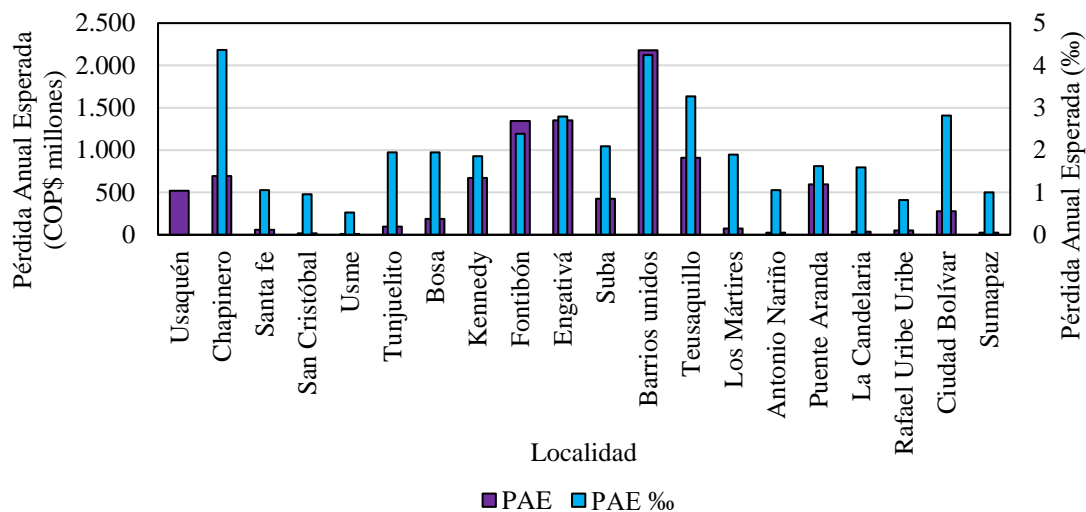


Figura 40. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes vehiculares

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

Para los puentes vehiculares, las localidades que mayor riesgo absoluto concentran en la ciudad son Barrios Unidos, Engativá y Fontibón, mientras que las localidades de mayor riesgo relativo corresponden a Chapinero, Barrios Unidos y Teusaquillo.

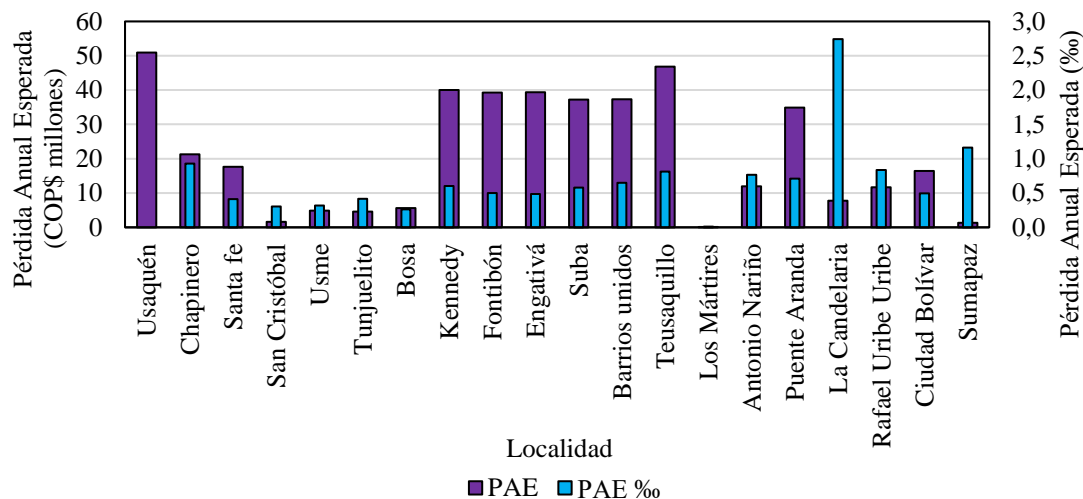


Figura 41. PAE absoluta y relativa por localidad para los puentes peatonales

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

En cuanto a los puentes peatonales, las localidades de mayor riesgo absoluto son Usaquén y Teusaquillo, mientras que la localidad de mayor riesgo relativo corresponde a La Candelaria.

Las diferencias obtenidas entre los casos relativos y absolutos se deben a 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 con menor valor expuesto, pero con un mayor nivel de amenaza, por lo que la pérdida relativa esperada es alta, aunque esta puede no ser significativa en términos absolutos.

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 42 y Figura 43, respectivamente.

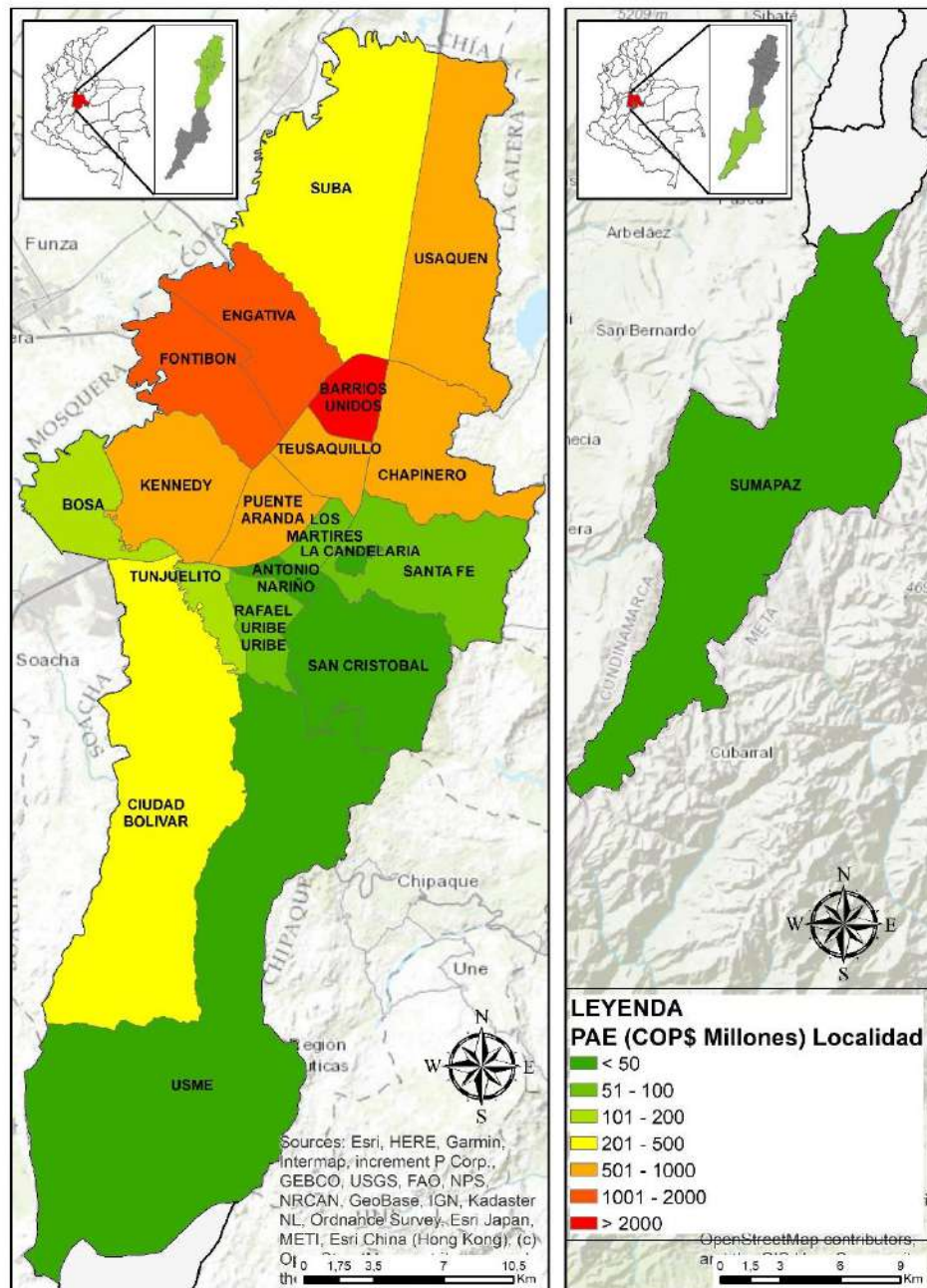


Figura 42. Distribución geográfica de PAE absoluta por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá  
Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU



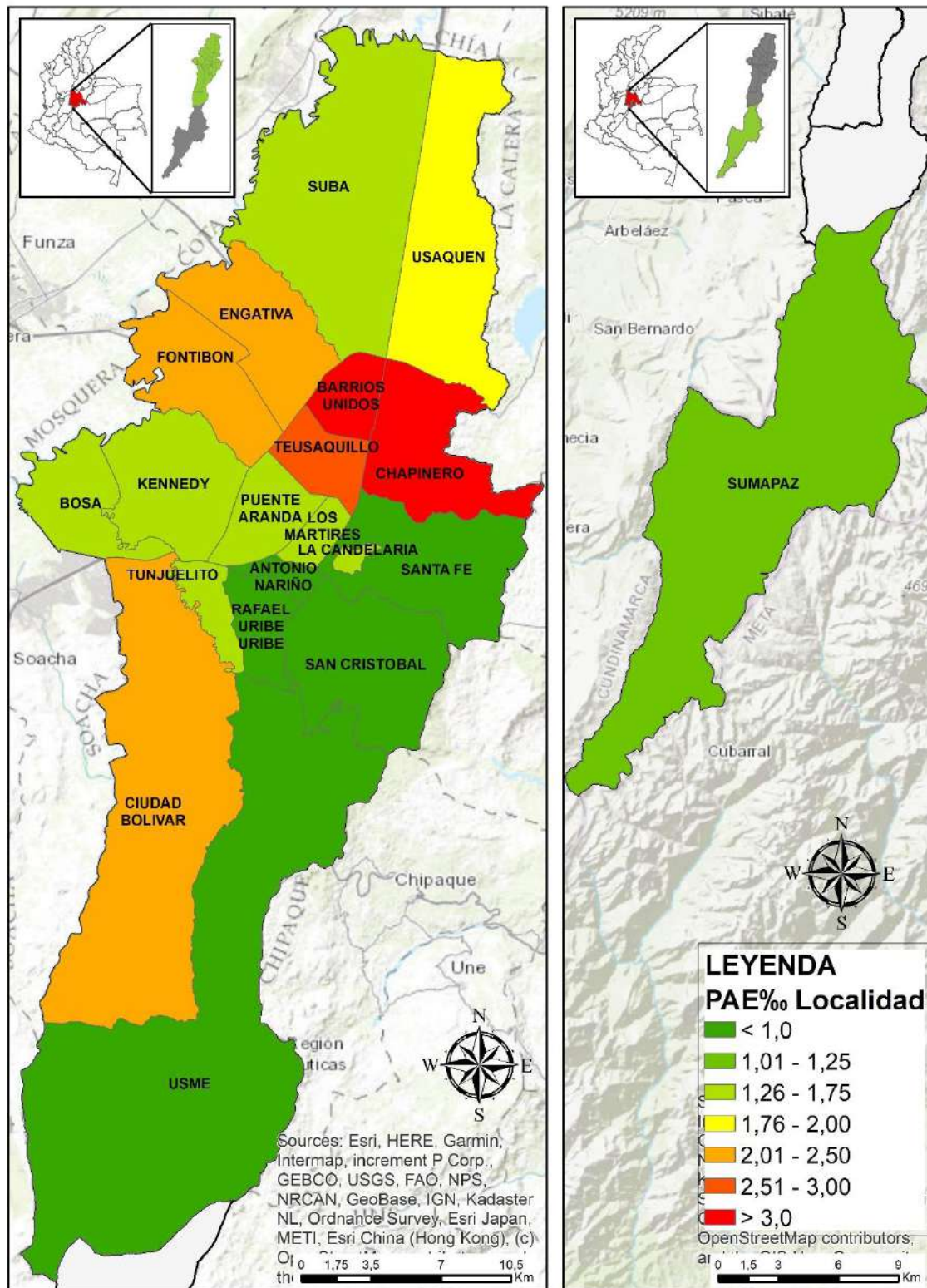


Figura 43. Distribución geográfica de PAE relativa por Localidad para el portafolio de puentes de Bogotá

Fuente: Dirección Técnica Estratégica – IDU

## **5. CONCLUSIONES**

- Se actualizó el portafolio de exposición de los puentes de la ciudad de Bogotá con las 33 nuevas estructuras identificadas, a las cuales se les realizó el correspondiente levantamiento geométrico y caracterización estructural.
- La evaluación del riesgo sísmico se desarrolló para la totalidad del portafolio de puentes a corte de junio de 2020, el cual corresponde a 992 estructuras.
- La amenaza sísmica probabilista utilizada en la presente evaluación del riesgo, está representada por más de 14.000 escenarios o eventos estocásticos que incorporan todas las posibles combinaciones de magnitud y distancia de sismos que puedan afectar la zona de estudio. Cada uno de estos eventos estocásticos tiene una distribución de aceleraciones propia y una frecuencia anual de ocurrencia asignada.
- Los 33 nuevos puentes que hacen parte del presente portafolio de exposición, fueron clasificados dentro de las 30 tipologías estructurales de acuerdo a su sistema estructural que lo representa. El portafolio total de exposición de puentes corresponde a 30 tipologías estructurales (16 para puentes vehiculares y 14 para puentes peatonales).
- Para los nuevos puentes que conforman el portafolio de exposición, se asignó la correspondiente función de vulnerabilidad que representa su posible comportamiento sísmico. Esta asignación se realizó teniendo en cuenta las características y los parámetros representativos de cada puente como lo son: nivel de diseño, tipo de suelo, curvatura horizontal o vertical, ángulo esviaje, número de luces y cantidad de elementos verticales.
- Se realizó la valoración económica de los 33 nuevos puentes que conforman el portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá D.C, teniendo en cuenta el tipo de puente, longitud, ancho, número de luces, gálibo, material predominante, tipo de subestructura y superestructura, ubicación geográfica y nivel. Con lo anterior, se pudo determinar que el valor de los 992 puentes que conforman el actual portafolio de exposición es de COP\$4.404.488,34 millones.
- Para efectos del análisis del riesgo sísmico, el portafolio de puentes, está compuesto por 565 puentes vehiculares y 427 puentes peatonales para un total de 992 puentes, con un área en planta total de 642.317,10 m<sup>2</sup>.
- La pérdida máxima probable para el portafolio de puentes para un periodo de retorno de 1,000 años es de aproximadamente COP\$801.402 millones, lo que corresponde a un 18,20% del valor expuesto total.

- La pérdida anual esperada absoluta para el portafolio de puentes es de aproximadamente COP\$9.980 millones correspondientes a un 2.27‰ del valor total expuesto de todo el portafolio.
- Las tipologías estructurales que presentan mayor riesgo sísmico absoluto son la VNI\_3 para puentes vehiculares, y PLS\_1 para puente peatonales.
- Las tipologías estructurales que mayor riesgo relativo presentan son en su orden VNI\_1, VNH\_1 y VMH\_1 para puentes vehiculares, y PNI\_3 PAA\_1 y PNI\_3, PNH\_4 y PMH\_1 para puentes peatonales.
- La pérdida anual esperada absoluta de los puentes tipo VNI\_3 es de COP\$4.858 millones, lo que representa aproximadamente el 51% de la pérdida anual esperada de todo el portafolio de puentes vehiculares.
- El valor total expuesto se distribuye entre las localidades de Bogotá D.C de mayor a menor de la siguiente manera: Fontibón 14.56 %, Barrios Unidos 12.96%, Engativá 12.83%, Kennedy 9.74%, Puente Aranda 9.44%, Teusaquillo 7.62%, Usaquén 6.97%, Suba 6.10%, Chapinero 4.12%, Ciudad Bolívar 2.98%, Bosa 2.68%, Santa Fe 2.26%, Rafael Uribe Uribe 1.77%, Tunjuelito 1.40%, Los Mártires 1.17%, Antonio Nariño 0.92%, Usme 0.81%, Sumapaz 0.62%, Candelaria 0.56% y San Cristóbal 0.51%.
- 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\$2.216 millones, correspondientes al 0.39‰ del valor total expuesto del portafolio de la localidad y al 22% de la pérdida anual esperada absoluta para todo el portafolio.

*Este boletín resume los principales parámetros técnicos desarrollados en la evaluación del riesgo sísmico para el portafolio de puentes de la ciudad de Bogotá D.C con fecha de corte de junio de 2020.*