

VALORACIÓN DE LA EXPLORACIÓN  
GEOTÉCNICA

**PRIMERA LÍNEA – METRO BOGOTÁ**

Linz, Abril 5 de 2018

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ALCANCE</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>RIESGOS GEOTÉCNICOS EN CIMENTACIONES PROFUNDAS</b> .....	<b>6</b>
3.1	Identificación de riesgos .....	6
3.1.1	Estratigrafía .....	6
3.1.2	Desempeño de la fundación.....	7
3.1.3	Productividad del sistema constructivo .....	7
3.1.4	Defectos de construcción .....	7
3.2	Estrategias de mitigación .....	8
3.2.1	Transferencia de riesgo.....	8
3.2.2	Mitigación de los riesgos de estratigrafía .....	8
3.2.3	Mitigación de riesgos por concepto de desempeño de fundación y productividad ....	8
3.2.4	Mitigación de riesgos por concepto de defectos de construcción .....	9
<b>4</b>	<b>INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA EJECUTADA POR METRO BOGOTÁ</b> .....	<b>10</b>
4.1	Perforaciones INGETEC 2017 .....	10
4.2	Perforaciones CL1 .....	10
<b>5</b>	<b>VALORACIÓN TÉCNICA</b> .....	<b>11</b>
5.1	Alcance de la campaña geotécnica.....	11
5.2	Caracterización del terreno .....	12
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>14</b>
6.1	Alcance de la campaña geotécnica actual .....	14
6.2	Mitigación de riesgos.....	14
6.3	Transferencia y asignación de riesgos .....	14
6.4	Tratamiento propuesto en el Patio Taller .....	15
6.5	Consideraciones adicionales de cimentaciones muy profundas .....	15

## 1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá se localiza en promedio a 2650 m de altitud sobre el eje de la Cordillera Oriental de Colombia. Geomorfológicamente se identifican dos zonas: (1) la plana – ubicada hacia la parte central del área y en donde se concentra la mayor parte de la población; y (2) de relieve montañoso con una parte habitada, otra dedicada a la minería a cielo abierto, y otra todavía no intervenida por el hombre localizada en los sectores oriental y suroriental de la ciudad.

Geológicamente la ciudad se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la Sabana de Bogotá, y está rodeada por cerros constituidos por rocas de tipo arenisca, arcillolitas y conglomerados. En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades entre el Cretáceo y Terciario, y depósitos sedimentarios poco consolidados de edad Pleistoceno a reciente.

La formación geológica predominante es la Formación Sabana (Qs) que constituye la mayor parte de la superficie plana del área de estudio. Este material consta de arcillas plásticas de color gris oscuro, en estratos de 0.4 a 1.0 m de espesor, con intercalaciones de lentes de arena y grava e intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blancuzco. Sus espesores arenosos y de gravas son importantes para el almacenamiento de agua.

En proyectos de infraestructura de transporte, gran parte de los riesgos están relacionados a las condiciones geológicas/geotécnicas del sitio específico. Es por eso que la gran mayoría de reclamos de construcción hacen referencia a condiciones geotécnicas no anticipadas.

Estas condiciones generalmente incluyen:

- Tipo y comportamiento del suelo o de la roca
- Condiciones de agua subterránea
- Presencia, tamaño y frecuencia de bloques dentro del terreno
- Contaminación del suelo o del agua subterránea
- Presencia de gas u otros materiales peligrosos

En consecuencia, es esencial contar con un programa de exploración geotécnica completo e integral. Sin embargo, es más importante interpretar de forma apropiada los parámetros geotécnicos y el comportamiento anticipado del terreno y de como se incorpora esa interpretación dentro de los documentos contractuales.

Dentro de un entorno contractual 'Design-Build' (DB), las propuestas técnicas se preparan antes de contar con los diseño de detalle. Por lo tanto, el nivel de la información geotécnica debe ser adecuado con el fin de de reducir las contingencias de los oferentes.

Contingencias que se verán reflejadas dentro de la propuesta económica y que, en consecuencia, serán asumidas directamente por el propietario del proyecto.

## **2 ALCANCE**

Durante las sesiones del 2 de febrero de 2018 con los consultores encargados de la estructuración de la Primera Línea del Metro de Bogotá (SYSTRA – INGETEC), se presentaron los criterios y resultados de la exploración geotécnica de las campañas ejecutadas a la fecha (CL1, Patio Taller, INGETEC 2017).

El alcance de este documento es hacer una valoración técnica con el fin de determinar si la información geotécnica existente es suficiente en comparación con el nivel actual de desarrollo del proyecto.

### **3 RIESGOS GEOTÉCNICOS EN CIMENTACIONES PROFUNDAS**

El propósito de esta sección es identificar los componentes de riesgo y las posibles estrategias de mitigación asociadas al diseño y construcción de cimentaciones profundas dentro de un contexto de 'Design-Build'.

#### **3.1 Identificación de riesgos**

Durante el proceso de preparación de propuestas, el Concesionario debe llevar a cabo un diseño preliminar de las cimentaciones profundas con el fin de: (1) desarrollar un plan de trabajo y definir un cronograma; y (2) estimación de costos.

Para cimentaciones profundas, los riesgos más significativos se incluyen en las siguientes categorías:

- Estratigrafía
- Influjo de agua durante la excavación de los pilotes
- Desempeño de la fundación
- Productividad del sistema constructivo
- Defectos de construcción

##### **3.1.1 Estratigrafía**

Variabilidad en la estratigrafía a lo largo del proyecto puede afectar los requerimientos de profundidad de las cimentaciones profundas. Esa variabilidad puede ser difícil de acomodar para algunos tipos de cimentaciones profundas. Y esa variabilidad aumenta la necesidad de perforaciones adicionales que pueden afectar el cronograma del proyecto.

Además de la profundidad de la roca competente, la presencia de bolos puede generar dificultades durante el pilotaje (desviar la trayectoria y/o oponer mayor resistencia de la inicialmente prevista).

Dentro de la estratigrafía, el riesgo de encontrar de encontrar cavidades también es relevante ya que puede tener influencia en la resistencia por fuste del pilote.

Asimismo, otro riesgo generado por la variabilidad estratigráfica es la inestabilidad de las paredes de la excavación. Según el tipo de terreno en los primeros estratos, la necesidad de usar 'casing' puede ser considerada.

### **3.1.2 Desempeño de la fundación**

Incertidumbres en el comportamiento del suelo o de la roca puede afectar el desempeño anticipado de la fundación y las técnicas de construcción.

La dureza del suelo y el diámetro de los pilotes influyen en el tipo de maquinaria a emplear; la escasa disponibilidad en la zona de la maquinaria con las características necesarias puede aumentar el costo para el contratista (y para el propietario, en la medida en que sea transferido ese riesgo). El emplear una máquina determinada se solventaría reajustando el diseño (menor diámetro de pilote aumentando su número o viceversa), lo que también conllevaría a un incremento en el costo.

Ejemplos incluyen incertidumbres relacionadas a ‘medidas de desempeño’ requeridas por el contrato. De hecho, pruebas de carga estática y dinámica son normalmente requeridas para la verificación de la instalación de los pilotes profundos, y resultados no anticipados (tales como, inusual baja resistencia y grandes asentamientos) pueden generar demoras en la producción y/o requerimientos adicionales.

### **3.1.3 Productividad del sistema constructivo**

Efectos del comportamiento del terreno sobre las técnicas de construcción (y su productividad) pueden tener gran impacto en tiempo y costo.

Como la productividad se estima generalmente con base en experiencias previas en proyectos de geología similar, cualquier imprevisto en manejabilidad de los pilotes, dificultades en la excavación de roca o de bloques, efectos de agua artesiana y asentamientos del terreno, puede tener gran impacto en la productividad.

### **3.1.4 Defectos de construcción**

Defectos de construcción (que deben ser corregidos) pueden generar sobre-costos y demoras significativas. Temas como rompimiento o fuera de posición de pilotes, o defectos de concreto en las perforaciones representan un riesgo potencial al Concesionario.

## **3.2 Estrategias de mitigación**

Una vez los riesgos más significativos son identificados y su magnitud valorada, se pueden desarrollar estrategias para reducir las consecuencias negativas. Las potenciales estrategias incluyen la transferencia del riesgo o la reducción del riesgo por medio de una acción específica.

### **3.2.1 Transferencia de riesgo**

El método más común es buscar la transferencia de un determinado nivel de riesgo al propietario por medio de la negociación de algunas cláusulas incluidas dentro de la licitación.

Las cláusulas por 'condiciones diferentes del terreno' proporcionan un medio a los constructores de recuperar algunos costos asociados a condiciones del terreno que no pudieron ser razonablemente anticipadas durante el proceso de licitación. De esta manera, se elimina la necesidad de incluir costos de contingencia en algunos ítems.

### **3.2.2 Mitigación de los riesgos de estratigrafía**

La forma más efectiva de reducir los riesgos por variabilidad de la estratigrafía es por medio de una exploración geotécnica extensiva.

### **3.2.3 Mitigación de riesgos por concepto de desempeño de fundación y productividad**

La forma más efectiva de reducir los costos asociados con la productividad y desempeño es por medio de la ejecución de 'pruebas en escala real' en las condiciones del terreno representativas. Cuando estas pruebas se hacen antes de la licitación, estos riesgos pueden ser minimizados y los proponentes pueden eliminar gran parte de sus contingencias asociadas con estos riesgos.

Las pruebas en sistemas de pilotes generalmente incluyen:

- Ensayos de carga dinámica
- Ensayos de carga estática axial
- Ensayos de carga lateral
- Ensayos de carga rápida



### **3.2.4 Mitigación de riesgos por concepto de defectos de construcción**

Desde la perspectiva de diseño geotécnico y constructivo, la forma más efectiva de reducir los riesgos por concepto de 'defectos de construcción' es desarrollando un diseño robusto y un plan de construcción con énfasis en "diseño para la constructabilidad".

En muchos casos, la implementación de una prueba (o un programa de pruebas de carga) puede ser considerado para mejorar tanto el diseño como la constructabilidad, y ajustar los métodos usados durante la instalación.

## **4 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA EJECUTADA POR METRO BOGOTÁ**

### **4.1 Perforaciones INGETEC 2017**

Los criterios de la exploración geotécnica ejecutada por INGETEC en el 2017 incluyen:

- Para la caracterización geotécnica de las estaciones, realizar como mínimo dos (2) sondeos en cada emplazamiento y un ensayo CPTU
- Para la caracterización geotécnica del viaducto de la línea, realizar sondeos que garanticen una distancia máxima de 500 m. Y por cada dos sondeos se realizará un ensayo CPTU equidistante entre los mismos

El plan de exploración incluye los siguientes ensayos:

- Perforaciones del subsuelo (55 a 75 m)
- Ensayos de Presiómetro (PMT)
- Ensayos de Dilatómetro (DMT)
- CPT (50 m o rechazo)
- Down-Hole (50 m)
- Líneas Sísmicas
- Piezómetros tipo Casagrande

Para poder caracterizar la estratigrafía, se han ejecutado hasta la fecha 34 sondeos de perforación (sin incluir los del Patio Taller). Estas perforaciones incluyen las realizadas a lo largo del viaducto, en las estaciones y en el Ramal Técnico.

Sin incluir las perforaciones en el Patio Taller, la nueva campaña de investigación geotécnica las perforaciones alcanzan una longitud total de 2270 m. De otra parte, las perforaciones ejecutadas en el Patio Taller alcanzan una longitud de 355 m.

### **4.2 Perforaciones CL1**

La exploración geotécnica ejecutada en el año 2015 (entre el Portal Américas y Av. Caracas Calle 6ª) incluye 100 perforaciones.

Con base en información suministrada, la longitud de las perforaciones utilizadas para el nuevo alineamiento elevado alcanza los 10,300 m.

## 5 VALORACIÓN TÉCNICA

### 5.1 Alcance de la campaña geotécnica

El propósito de una campaña de investigación geotécnica es determinar las condiciones reales de un terreno. El número de perforaciones depende de la variabilidad (en profundidad y a lo largo del alineamiento) y depende de los riesgos/incertidumbres que se identifiquen durante el desarrollo del perfil geológico en etapas preliminares. Para el caso de Bogotá (localizada sobre un extenso relleno sedimentario), se considera que esa variabilidad es mínima. En consecuencia, contar con perforaciones cada 500 m se considera que es un criterio apropiado para mitigar el riesgo de ‘condición diferente del terreno’.

Según la Norma Colombiana de Puentes (CCP-2014), se especifica el número mínimo de puntos de exploración y la profundidad de exploración:

- En caso de cimentaciones profundas y para subestructuras como estribos de puentes de ancho menor o igual a 30,000 mm, se requiere como mínimo un punto de exploración por subestructura
- En suelos, la profundidad de exploración debe extenderse por debajo de la cota de elevación proyectada de la punta del pilote un mínimo de 6,000 mm

A lo largo del viaducto elevado, las perforaciones están divididas en dos sectores: (1) Tramo CL1 (Portal Américas – Av. Caracas con Calle 6ª); y (2) Tramo Nuevo (Av. Caracas entre Calle 6ª y Calle 76).

El Tramo CL1 (con una longitud aproximada de 15 km) incluye 100 perforaciones que alcanzan una longitud de perforación de 10,300 m. De esta manera, se cuenta con un espaciamiento promedio de 150 m entre perforaciones; valor mucho menor al criterio definido por INGETEC de 500 m. Asimismo, la profundidad promedio en este tramo alcanza un valor de 103 m; valor que es mucho mayor a la profundidad de la cimentación de pilotes por el actual diseño que alcanza los 60 – 70 m. En consecuencia, se puede afirmar que la información geotécnica en este tramo es satisfactoria.

El Tramo Nuevo (ejecutado por INGETEC en el 2017 y con una longitud aproximada de 9 km) incluye 34 perforaciones que alcanzan una longitud de perforación de 2270 m. De esta

manera, se cuenta con un espacio promedio de 265 m entre perforaciones; valor menor al criterio definido por INGETEC de 500 m. Sin embargo, de los 34 sondeos ejecutados, al menos 22 no cumplirían con el requerimiento de profundidad especificado por la norma CCP-2014.

## **5.2 Caracterización del terreno**

Con base en las muestras obtenidas de las perforaciones, se ejecutaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Humedad natural (No. 265)
- Límites de Atterberg (No. 801)
- Granulometría (No. 627)
- Pasa Tamiz No. 200 (No. 255)
- Peso unitario (medidas y peso (No. 139)
- Contenido de Materia Orgánica (No. 85)
- Granulometría por Hidrómetro (No. 1)
- Compresión Simple (No. 39)
- Compresión Inconfinada en Suelos (No. 151)
- Corte Directo, Suelos Cohesivos (No. 43)
- Expansión Controlada (No. 10)
- Expansión Libre (No. 2)
- Consolidación (No. 55)
- Triaxial CU (No. 11)
- Triaxial CD (No. 2)
- Columna Resonante (No. 5)
- Bender Element (No. 6)
- Desleimiento – Durabilidad (No. 10)

Asimismo, los ensayos de campo incluyen:

- Líneas Sísmicas (No. 14)
- Ensayos Downhole (No. 13)

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas de campo y de laboratorio, la caracterización del terreno define 21 'Zonas Homogéneas' en términos de perfiles estratigráficos y propiedades geomecánicas para las diferentes formaciones.

Considerando que la ciudad de Bogotá está localizada sobre un extenso relleno sedimentario compuesto esencialmente de arcillas blandas, se anticipa que la variabilidad entre zonas homogéneas no es muy significativa. En consecuencia, se considera que la caracterización del terreno donde se identifican 21 'Zonas Homogéneas' es apropiada.

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 Alcance de la campaña geotécnica actual**

Como el número actual de perforaciones (100 en el Tramo CL1 y 34 en el Tramo Nuevo), se considera que el riesgo por concepto de “variabilidad en la estratigrafía” está mitigado satisfactoriamente. Por lo tanto, el alcance de la campaña geotécnica actual es suficiente.

Con la información geotécnica actual disponible, los proponentes dentro de una licitación ya estarían en capacidad de preparar sus propuestas con base en diseños preliminares de las cimentaciones profundas. Posteriormente (una vez el proyecto ha sido adjudicado), el concesionario favorecido debe estar obligado a desarrollar los diseños finales cumpliendo los requerimientos de la norma colombiana de puentes (CCP-2014) en términos de: (1) número mínimo de puntos de exploración; y (2) profundidad de la exploración.

### **6.2 Mitigación de riesgos**

Con el fin de mitigar los riesgos por concepto de desempeño, productividad y daños (rompimiento, fuera de posición, etc.) durante la construcción de cimentaciones profundas, se recomienda la implementación de un programa de ‘pruebas de carga a escala real’ antes de la licitación con el fin de reducir/eliminar las contingencias de los proponentes por estos riesgos.

Las pruebas de carga son ensayos para determinar: (1) la capacidad de carga del pilote; y (2) la respuesta del pilote en términos de asentamientos. Tradicionalmente, se usan pruebas estáticas, a pesar de ser costosas y toman mucho tiempo. En consecuencia, en la práctica se usan pruebas dinámicas que son rápidas de ejecutar y más económicas.

### **6.3 Transferencia y asignación de riesgos**

Dentro de un marco contractual “Design-Build”, el principal riesgo es por concepto de “Condición No Anticipada del Terreno” (CNAT). Una CNAT representa un cambio significativo y, generalmente, adverso a las condiciones del terreno inicialmente previstas.

Considerando que el alcance de la campaña geotécnica actual es considerada suficiente, se asume que la ‘caracterización del terreno’ de los 21 sectores homogéneos incluye las condiciones promedio y las condiciones extremas (a lo largo del alineamiento), se considera

que el riesgo transferido actualmente a los proponentes estaría enmarcado dentro de unas condiciones que están por fuera del rango de “condiciones anticipadas”. Por lo tanto, la transferencia de ese riesgo en las actuales circunstancias se considera admisible.

Adicionalmente, con los resultados de las ‘pruebas de carga en escala real’ disponibles, el riesgo por ‘comportamiento no anticipado del terreno’ también quedaría mitigado.

#### **6.4 Tratamiento propuesto en el Patio Taller**

Los suelos blandos (depósitos de arcillas blandas, limos y suelos orgánicos) pueden mejorarse por medio de pre-compresión. De esta manera, la sobrecarga (junto con o sin drenes verticales) se usa para consolidar el terreno, disminuir la compresibilidad y, adicionalmente, aumentar la resistencia al corte. Por lo tanto, los tratamientos propuestos para acelerar el proceso de consolidación se consideran apropiados.

Como los asentamientos secundarios en arcillas blandas (tipo de terreno anticipado en el Patio Taller) por acción de sobrecarga son plenamente consistentes con las leyes de compresibilidad del suelo (principios de Mecánica de Suelos), estos asentamientos en el tiempo pueden ser anticipados por medio de herramientas analíticas. Asimismo, con base en ensayos de laboratorio que miden la respuesta de la sobrecarga y la compresión secundaria en arcillas blandas, los tiempos registrados pueden variar entre [3 – 23 meses]. Por todo lo anterior, el tiempo estimado de 18 meses se considera razonable.

#### **6.5 Consideraciones adicionales de cimentaciones muy profundas**

La definición de pilotes muy profundos no es específicamente clara, pero generalmente hace referencia a pilotes de longitud o profundidad mayor a los 50 m. En consecuencia, los pilotes propuestos para el Metro de Bogotá estarían incluidos dentro del grupo de pilotes muy profundos (entre 65 – 70 m).

Las consideraciones de INGETEC para definir el tipo de cimentación son las siguientes:

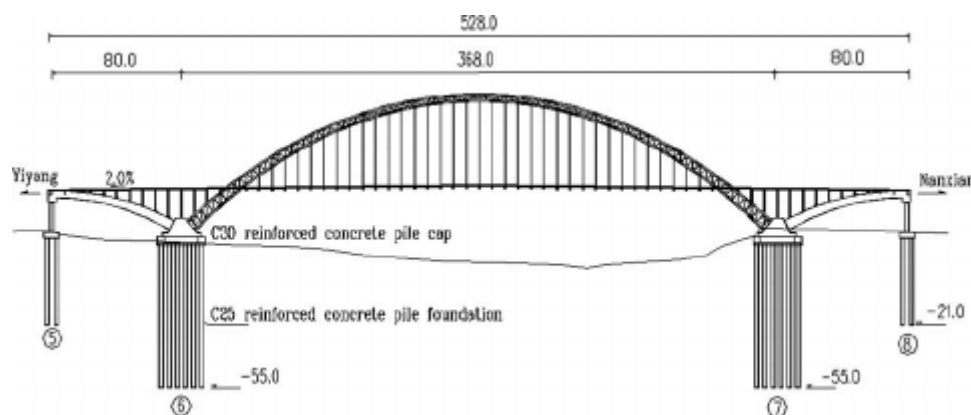
- Pilotes pre-excavados (no se consideraron pilotes hincados)
- El sistema de pilotes transmite las cargas exclusivamente por fricción
- Solo en cinco (5) sectores, la formación rocosa se encuentra a 40 m de profundidad. En consecuencia, los pilotes quedan empotrados en la formación rocosa
- Se limite la cantidad de elementos de cimentación (pilotes) para reducir la afectación a estructuras aledañas al viaducto

- El asentamiento diferencial entre apoyos contiguos debe ser inferior a  $L/1000$

Por su gran longitud, los pilotes muy profundos ( $l > 50$  m) se comportan de manera diferente en comparación con los pilotes normales debido a complejos mecanismos de transferencia de carga. Sin embargo, en la práctica se usan los métodos tradicionales de diseño ya que en la actualidad no se cuenta con métodos específicos para el diseño de pilotes muy profundos. En consecuencia, la necesidad de ejecutar 'pruebas de carga a escala real' más que una recomendación es un requerimiento de obligatorio cumplimiento con el fin de despejar cualquier duda sobre el comportamiento real de los pilotes muy profundos y sus mecanismos de transferencia de carga.

La necesidad de usar pilotes muy profundos se debe a la combinación de varios factores:

1. Presencia de arcillas blandas a lo largo de gran parte del perfil estratigráfico sin contar con un estrato firme donde los pilotes puedan ser empotrados
2. Por el hecho de no poder ser empotrados en un terreno firme, la capacidad del pilote depende exclusivamente de la fricción a lo largo de toda la longitud



Como ejemplo de referencia, se menciona el Puente de Maocaojie en la provincia de Hunan (China), en donde la cimentación incluye pilotes pre-excavados y fundidos en obra es de hasta 60 m de profundidad.

En este proyecto, las condiciones del terreno también incluyen arcillas blandas en gran parte de su longitud con estratos de arena fina y arenas gravosas.



VALORACIÓN DEL CRITERIO DE DISEÑO  
SÍSMICO

**PRIMERA LÍNEA – METRO BOGOTÁ**

Linz, Abril 4 de 2018

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ALCANCE</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>INFORMACIÓN SUMINISTRADA</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>CRITERIO DE DISEÑO SÍSMICO</b> .....	<b>6</b>
4.1	Principios fundamentales .....	6
4.2	Proceso de diseño sísmico .....	6
<b>5</b>	<b>NORMATIVIDAD</b> .....	<b>8</b>
5.1	CCP – 2014 .....	8
5.2	NSR – 10 .....	8
5.3	Decreto 523 de 2010 .....	10
5.4	AASHTO Guide Specifications for Seismic Bridge Design (2014) .....	11
5.4.1	Principios de capacidad de diseño .....	12
5.4.2	Espectros Uniformes de Riesgo .....	13
5.4.3	Niveles de riesgo y periodos de retorno .....	13
5.4.4	Eventos de diseño y categorías de importancia .....	14
5.5	Eurocódigo (EC8) .....	14
<b>6</b>	<b>HIPÓTESIS DE DISEÑO PROPUESTAS POR METRO BOGOTÁ</b> .....	<b>16</b>
6.1	Sismo operacional .....	16
6.2	Sismo máximo .....	16
6.3	Espectro de diseño en dirección horizontal .....	17
<b>7</b>	<b>VALORACIÓN DEL CRITERIO DE DISEÑO SÍSMICO PROPUESTO</b> .....	<b>19</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>21</b>
8.1	Niveles de desempeño .....	21
8.2	Instrumentación sísmica a lo largo del viaducto .....	22
8.3	Instrumentación sísmica de las estaciones .....	23

## 1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá se localiza en promedio a 2,650 m de altitud sobre el eje de la Cordillera Oriental de Colombia. Geológicamente la ciudad se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la sabana de Bogotá, y está rodeada por cerros constituídos por rocas de arenisca, arcillolitas y conglomerados.

Desde el punto de vista de amenaza sísmica regional, en el área de influencia sísmica de Bogotá (con 200 km de radio) se tiene noticia de 396 sismos incluyendo todas las magnitudes, según el Catálogo Colombiano de Sismos Históricos que cubre el periodo entre los años 1500 y 1994. Si se tiene en cuenta el registro a partir de 1957 el número total de sismos registrados en el área puede llegar a los 245 de los cuales alrededor de 120 tienen una magnitud  $M > 3$ .

Con base en el Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), Bogotá está localizada dentro de una zona de amenaza sísmica intermedia. Es decir, es un sitio donde la 'aceleración pico efectiva' ( $A_a$ ) y la 'velocidad pico efectiva' ( $A_v$ ) son mayores de 0.10 y ninguno de los dos excede 0.20.

## **2 ALCANCE**

Durante las sesiones sostenidas el día 2 de febrero de 2018 con los diseñadores del proyecto (SYTRA – INGETEC) se hicieron varias presentaciones que incluyen el criterio de diseño sísmico propuesto y las aceleraciones de respuesta espectral obtenidas.

Con base en la información suministrada, el alcance de este informe es hacer una valoración del criterio de diseño sísmico propuesto y, asimismo, de las aceleraciones de respuesta espectral para las diferentes condiciones del terreno a lo largo del alineamiento.

### **3 INFORMACIÓN SUMINISTRADA**

- [1] Presentación “Criterios de Diseño Sísmico” del día 2 de febrero de 2018
  
- [2] Presentación “Viaducto” de una reunión previa del 26/09/2017

## **4 CRITERIO DE DISEÑO SÍSMICO**

### **4.1 Principios fundamentales**

Los principios fundamentales del análisis de amenaza sísmica se indican a continuación, proceso para determinar los ‘movimientos del terreno’ generado por un sismo para que posteriormente pueden ser usados en el diseño sísmico de una obra de ingeniería.

Para el análisis de amenaza sísmica empleado en la práctica de diseño, en la actualidad se cuenta con dos técnicas o aproximaciones: (1) análisis probabilístico; y (2) análisis determinístico. Como la gran mayoría de las normas se basa en métodos probabilísticos, a continuación se enumeran las etapas requeridas para ejecutar el análisis probabilístico.

Las etapas fundamentales del análisis probabilístico son:

1. Etapa 1 (Identificación de la fuente sísmica) – se identifican las fuentes sísmicas que están en capacidad de generar fuertes movimientos del terreno en el sitio del proyecto. Asimismo, se define la geometría de esas fuentes (su localización y extensión espacial)
2. Etapa 2 (Magnitud-Recurrencia) – para cada una de las fuentes sísmica identificadas, se asigna una relación de recurrencia que describe la tasa en la cual se esperan eventos sísmicos de diferente magnitud
3. Etapa 3 (Atenuación del Movimiento del Terreno) – se asigna una relación de atenuación a cada una de las fuentes sísmicas con el fin de describir la relación entre la amplitud del movimiento del terreno y la distancia de la fuente
4. Etapa 4 (Probabilidad de Excedencia) – los resultados de las primeras tres etapas se combinan para producir una curva que relaciona el valor de ‘parámetros de movimiento del terreno’ en el sitio de interés y la probabilidad de excedencia en un intervalo de tiempo específico

### **4.2 Proceso de diseño sísmico**

El propósito de esta sección es mostrar los diferentes pasos en el proceso de diseño sísmico.

El proceso de diseño sísmico es esencialmente un proceso de tres partes:

- Parte 1: Definir el nivel de desempeño requerido durante el evento sísmico de diseño (para la gran mayoría de los puentes el requerimiento es el de ‘no colapso’)

- Parte 2: Calcular la demanda que el sismo de diseño ejerce sobre el puente
- Parte 3: Asegurarse que el puente tiene la capacidad suficiente para atender esa demanda y satisfacer el nivel de desempeño requerido (por ejemplo, no colapso)

Para definir el “nivel de desempeño” (con referencia al Paso previamente mencionado), Metro Bogotá ha considerado los siguientes niveles de desempeño:

- Condición de ‘No Colapso’ para el evento de “Sismo Máximo”. Este es un requerimiento obligatorio en las normas de diseño sísmico tanto de puentes como de estructuras de habitación indispensables y convencionales
- Condición de ‘Mantenerse Operativo’ para el evento de “Sismo Operativo”. Este requerimiento es generalmente opcional en el caso de diseño, pero que se considera apropiado definirlo durante la etapa de diseño

## 5 NORMATIVIDAD

El propósito de esta sección es mostrar los diferentes criterios indicados por las normas colombianas (CCP-2014, NSR-10 y Decreto 523 de 2010) y por las normas internacionales más relevantes (AASHTO-2014 y EC8).

### 5.1 CCP – 2014

La CCP – 2014 corresponde a la norma colombiana de diseño de puentes.

En la Sección 3.10 se definen los criterios para los 'Efectos Sísmicos' (EQ):

- Los puentes deben diseñarse para que tengan una baja probabilidad de colapso pero se admite que puedan sufrir daño significativo e interrupción del servicio cuando se sometan a movimientos sísmicos del terreno que tengan el 7% de probabilidad de ser excedidos en 75 años. Es decir, equivalente aproximadamente a mil años de período de retorno promedio y puede requerirse un reemplazo parcial o total del puente
- Pueden usarse mayores niveles de amenaza sísmica si así lo requiere la entidad contratante del diseño y construcción del puente

Los principios considerados para el desarrollo de estas especificaciones son:

- Debe resistirse los sismos pequeños a moderados dentro del rango elástico de respuesta de los componentes estructurales sin daños significativos
- Deben usarse intensidades de los movimientos del terreno y fuerzas sísmicas que sean realistas en los procedimientos de diseño
- La exposición a vibraciones causadas por sismos fuertes no deben causar colapso parcial ni total del puente

Las entidades que contraten el diseño y construcción de puentes pueden exigir niveles más altos de desempeño para puentes especiales.

### 5.2 NSR – 10

El NSR – 10 corresponde al 'Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente'. Se incluyen los requisitos mínimos para el diseño y construcción de edificaciones nuevas, con el fin de que sean capaces de resistir las fuerzas que les impone la naturaleza o su uso y para incrementar su resistencia a los efectos producidos por los movimientos sísmicos.



#### Excepciones:

- El presente reglamento de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10) es aplicable a edificaciones (construcciones cuyo uso primordial es la habitación u ocupación por seres humanos) y no aplica para otras estructuras
- No es aplicable para el diseño y construcción de estructuras especiales tales como puentes, torres de transmisión, torres y equipos industriales, muelles, estructuras hidráulicas y todas aquellas construcciones diferentes de edificaciones

#### Movimientos sísmicos de diseño:

- Para una probabilidad del 10% de excedencia en un lapso de 50 años, los movimientos sísmicos de diseño se definen en función de la aceleración pico efectiva, representado por el parámetro ( $A_a$ ), y de la velocidad pico efectiva ( $A_v$ )
- Los valores de ( $A_a$ ) y ( $A_v$ ) se obtienen de una tabla en función de la localización de la edificación

#### Efectos locales:

- Se prescriben dos factores de amplificación del espectro por efectos de sitio ( $F_a$ ,  $F_v$ ), los cuales afectan la zona del espectro de periodos cortos y periodos intermedios, respectivamente
- El perfil de suelo debe ser determinado por el ingeniero geotecnista a partir de unos datos geotécnicos debidamente sustentables

#### Coefficiente de importancia:

- Se definen los grupos de tipo de uso y los valores de coeficiente de importancia
- Edificaciones indispensables son aquellas edificaciones de atención a la comunidad que deben funcionar durante y después de un sismo, y cuya operación no puede ser trasladada rápidamente a un lugar alterno

#### Espectro de diseño:

- Se define el espectro de aceleraciones ( $S_a$ ), expresado como fracción de la gravedad, para un coeficiente del 5% del amortiguamiento crítico

Para las edificaciones indispensables y de atención a la comunidad (Capítulo A.2), se espera que el daño producido por movimientos sísmicos de características similares a los movimientos sísmicos de diseño prescritos en él sea reparable y no tan severo que inhiba la operación y ocupación inmediata y continuada de la edificación.

### 5.3 Decreto 523 de 2010

La actualización del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 incluye nuevos mapas de amenaza sísmica adoptados con base en los estudios realizados por el Instituto de Investigaciones en geociencia, Minería y Química – Ingeominas en convenio con la Universidad Nacional y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS.

El NSR-10 establece las condiciones y requisitos para la elaboración de estudios de microzonificación sísmica.

El Decreto 523 fija las zonas geotécnicas y las zonas de respuesta sísmica de Bogotá D.C., de conformidad con las siguientes tablas:

- Tabla 1: Descripción de las zonas geotécnicas
- Tabla 2: Descripción de las zonas de respuesta sísmica
- Tabla 3: Coeficientes y curva de diseño –  $A_0$  (475)
- Tabla 4: Coeficientes y curva de seguridad limitada –  $A_0$  (225)
- Tabla 5: Coeficientes y curva de umbral de daño –  $A_{0d}$  (31)

Cada una de las zonas en que se ha dividido Bogotá Distrito Capital involucra un valor característico de Aceleración Pico del Terreno ( $A_0$  y  $A_{0d}$ ), el cual corresponde a la aceleración máxima esperada en la superficie del terreno para dicha zona.

Se deberá clasificar el perfil geotécnico del sitio en el cual se ubique una edificación en algunas de las zonas descritas en la Tabla 2 de acuerdo a su localización en la zonificación de respuesta sísmica y al estudio geotécnico realizado de conformidad con el Título H del Reglamento NSR-10.

En las zonas geotécnicas del piedemonte, aluvial, llanura y causes se debe evaluar el potencial de licuación en los suelos susceptibles a ese fenómeno y el diseño debe considerar el resultado de esa evaluación.

Se debe definir para el sitio de interés los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$ , consistentes con las curvas de diseño definidas en la Tabla 3, de manera tal que cubran las aceleraciones espectrales en superficie obtenidas.

#### 5.4 AASHTO Guide Specifications for Seismic Bridge Design (2014)

Para el análisis de amenaza sísmica, desde el año 2007, la AASHTO ha adoptado el método probabilístico, adoptando un periodo de retorno de 1,000 años, como la base para el diseño de puentes convencionales. Sin embargo, ocasionalmente un periodo de retorno diferente y un análisis determinístico también pueden ser considerados para establecer los 'movimientos del terreno' de diseño.

La siguiente filosofía de diseño ha sido desarrollada y ampliamente aceptada para el diseño sísmico de puentes en corredores viales:

- Sismos entre pequeños a moderados deben resistidos por la estructura dentro del rango elástico de los componentes de la estructura sin ningún daño significativo
- Intensidades realistas de movimiento del terreno deben ser consideradas para determinar las demandas sísmicas de los componentes estructurales. Estos movimientos del terreno generalmente se escogen con base un periodo de retorno de 1,000 años. Este evento se denomina como 'sismo de diseño'
- La exposición a movimientos generados por sismos entre moderados y grandes no debe causar el colapso de toda o parte de la estructura. Sin embargo, solo se aceptan daños que sean dúctiles por naturaleza, fáciles de detectar y accesibles para inspección y reparación si es necesario

Se entiende por 'no colapso' el asegurar 'protección de la vida', el cual es el objetivo fundamental de todas las normas en USA y alrededor del mundo. Sin embargo, si la estructura no va a colapsar, el puente puede quedar averiado y no operativo, y los costos de reparación pueden ser tan excesivos que superen la construcción de una nueva estructura.

En consecuencia, las metodologías de diseño con base en 'Criterios de Desempeño' han sido desarrolladas con el fin de asegurar niveles más altos de desempeño, a discreción del propietario del proyecto.

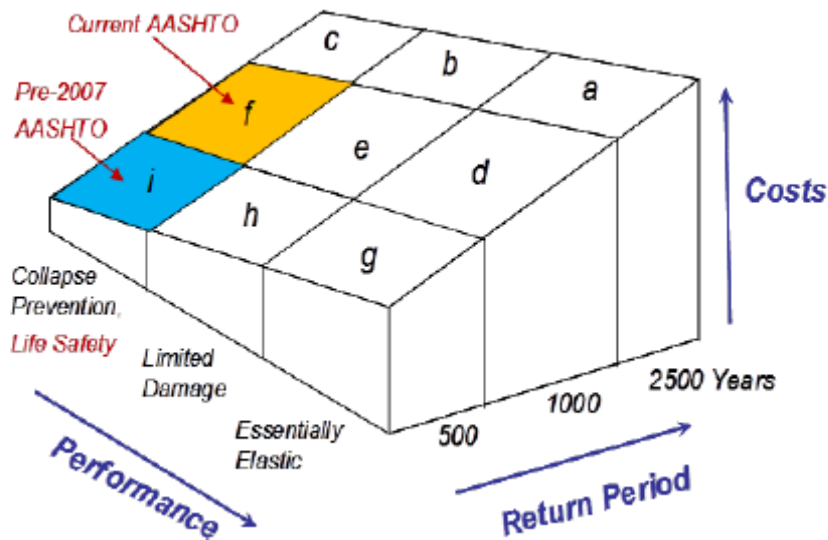


Figura 1: Implicaciones de costo para el diseño con base en 'desempeño'

Como se muestra en la Figura 1, el costo inicial de un puente diseñado para tener un nivel de desempeño más alto que el de 'prevención de colapso' (casilla 'f') puede ser significativo, particularmente con un periodo de retorno más largo (casilla 'a'). Sin embargo, el incremento en costo puede ser bajo comparado con los costos de reparación/reemplazo y las pérdidas para la sociedad en caso de cierre si el 'sismo de diseño' ocurre durante la vida útil de la estructura (comparar las casillas 'f' y 'd').

#### 5.4.1 Principios de capacidad de diseño

La filosofía de diseño actual de la AASHTO acepta el hecho que el puente tendrá daños y se comportará de forma inelástica durante el 'evento sísmico de diseño (un evento con un periodo de retorno de 1,000 años).

Este tipo de comportamiento no es aceptado para otro tipo de combinaciones de carga (por ejemplo, viento, nieve, etc.) ya que las cargas sísmicas son de tal magnitud que un diseño elástico sería demasiado costoso. Por lo tanto, los daños están explícitamente permitidos y se espera que ocurran durante el evento sísmico de diseño.

Sin embargo, no todos los daños son aceptables:

- Solo el comportamiento dúctil es permitido y solo en los miembros estructurales específicamente diseñados y detallados para ese comportamiento
- Falla frágil no se permite en ningún momento

- Asegurar que el puente pueda soportar la magnitud de la carga sísmica sin colapso requiere de principios de diseño y detalles que son diferentes de aquellos requeridos por otros tipos de carga

El uso de una respuesta inelástica tiene un sustento económico y otro técnico. Desde el punto de vista económico, es prudente permitir algunos daños y evitar invertir recursos en una respuesta elástica en un evento extremo de muy baja probabilidad de ocurrencia. Y desde el punto de vista técnico, es prudente diseñar estructuras considerando mecanismos que limiten las fuerzas internas. De esta manera, la estructura es menos vulnerable a eventos de mayor magnitud que el evento sísmico de diseño.

#### **5.4.2 Espectros Uniformes de Riesgo**

El periodo de retorno es un parámetro fundamental para cuantificar el riesgo asumido en el diseño. El inverso del periodo de retorno en años es esencialmente el riesgo anual.

En el caso de la AASHTO (a partir del 2007), se adoptó un periodo de retorno de 1,000 años para el estado límite de 'no colapso' en puentes ordinarios. De esta manera, se esperan los daños durante los movimientos del terreno generados por el evento de 1,000 años, pero se debe evitar el colapso de la estructura.

Sin embargo, en algunas circunstancias un nivel de riesgo más bajo puede ser apropiado para los puentes más importantes:

- Por ejemplo, un periodo de retorno de 1,500 años fue adoptado para el diseño de las nuevas luces (new East Bay Spans) para el puente entre San Francisco y Oakland
- Asimismo, se adoptó un periodo de retorno de 2,500 años para el diseño de los principales cruces de agua y en la readaptación de varios puentes largos en Estados Unidos (Nueva Cork, Seattle, Charleston, etc.)

#### **5.4.3 Niveles de riesgo y periodos de retorno**

Los criterios de desempeño se especifican para cada nivel de movimiento del terreno y para cada nivel de desempeño. Durante el desarrollo de de la normativa actual de AASHTO (2007), el criterio de dos niveles fue considerado injustificable para la mayoría de puentes viales ordinarios en USA.

La norma AASHTO no tiene requerimientos explícitos para chequear el desempeño de un puente para eventos que ocurran de manera más frecuente que aquellos que ocurren cada 1,000 años. Sin embargo, algunos propietarios pueden desear/requerir que los puentes más importantes permanezcan funcionales después de los eventos sísmicos más frecuentes.

Cuando un propietario ha decidido chequear funcionalidad, el periodo de retorno seleccionado puede variar de proyecto a proyecto:

- Un periodo de retorno de 72 años fue escogido para unos proyectos viales en California Orange County, CA)
- Un periodo de retorno de 92 años fue escogido como el sismo funcional en las nuevas luces (East Bay Spans) para el puente entre San Francisco y Oakland

#### **5.4.4 Eventos de diseño y categorías de importancia**

Para la norma AASHTO, se ha adoptado un periodo de retorno para puentes convencionales. Sin embargo, los propietarios se podrían desviar de este periodo de retorno para estructuras que no sean puentes o en algunos casos para puentes si la situación lo amerita.

A continuación se enumeran las posibles razones para desviarse del criterio AASHTO:

- Un periodo de retorno más largo puede justificarse para estructuras críticas, cuando una extendida interrupción del servicio causaría un gran costo a la comunidad. Para estructuras críticas, movimientos del terreno para el proyecto específico (y un criterio de desempeño) deben ser desarrollados con la asistencia de un panel de expertos
- Un periodo de retorno más corto puede justificarse si: (a) el costo de capital para diseñar la estructura para un periodo de retorno de 1,000 años es excesivamente costoso; o (b) en situaciones de readaptación, la estructura existente tiene una vida útil limitada, y se espera que el puente sea remplazado

#### **5.5 Eurocódigo (EC8)**

Para la consideración de las cargas sísmica según el EC8, se tiene que caracterizar las condiciones del sitio y de manera apropiada estimar la amplificación del suelo y su correspondiente movimiento pico del terreno.

De esta manera (como está especificado), se tiene que definir el espectro de diseño a través de 'tipo de terreno / categoría de suelo' (S), y la aceleración pico (PGA) del periodo de retorno referenciado para la zona sísmica correspondiente. El tipo de terreno se define por medio de parámetros geofísicos/geotécnicos, tales como: (1) velocidad promedio de la velocidad de onda a 30 m de profundidad; (2) prueba de penetración estándar; y (3) resistencia al corte no drenada del suelo.

El EC8 prevé dos niveles de diseño. El de no colapso y el de desempeño de daño limitado, considerando periodo de retorno de 475 y 95 años, respectivamente.

## 6 HIPÓTESIS DE DISEÑO PROPUESTAS POR METRO BOGOTÁ

Con base en la presentación “Viaducto” de una reunión previa del 26/09/2017, se definen las principales hipótesis para el diseño para las cargas sísmicas (EQ).

Se consideran dos niveles de sismo: (1) sismo operacional o esperado; y (2) sismo máximo.

### 6.1 Sismo operacional

El sismo operacional tiene el objetivo de ser operacional. Los niveles de desempeño considerados para el Metro Bogotá se indican a continuación:

- Servicio – Inmediato
- Daño – Mínimo o ninguno ( los componentes estructurales deben resistir dentro del rango elástico)

Para los niveles de desempeño definidos para el sismo operativo, a continuación se indican el periodo de retorno y las normas consideradas para cada una de las estructuras.

SISMO OPERATIVO	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno	Normativa Aplicada
Viaducto entre estaciones	50% en 75 años	T = 109 años	* CCP-2014 (Norma Colombiana de Puentes) * AASHTO (2014) - (Norma Americana de Puentes)
Viaducto en estación	80% en 50 años	T = 32 años	NSR-10 (Norma Colombiana de Edificaciones) Decreto 23 de 2010 (Microzonificación sísmica de Bogotá) * Factor de Importancia FI = 1.50
Estaciones	80% en 50 años	T = 32 años	NSR-10 (Norma Colombiana de Edificaciones) Decreto 23 de 2010 (Microzonificación sísmica de Bogotá) * Factor de Importancia FI = 1.50

### 6.2 Sismo máximo

El sismo máximo tiene el objetivo de prevenir el colapso y sus niveles de desempeño se indican a continuación:

- Servicio – Alteración significativa, incluso interrupción
- Daño – Significativo, pero el puente no debe colapsar ni parcial ni totalmente

Para los niveles de desempeño definidos para el sismo máximo, a continuación se indican el periodo de retorno y las normas consideradas para cada una de las estructuras.



SISMO MÁXIMO	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno	Normativa Aplicada
Viaducto entre estaciones	7% en 75 años	T = 1000 años	* CCP-2014 (Norma Colombiana de Puentes) * AASHTO (2014) - (Norma Americana de Puentes)
Viaducto en estación	10% en 50 años	T = 475 años	NSR-10 (Norma Colombiana de Edificaciones) Decreto 23 de 2010 (Microzonificación sísmica de Bogotá) * Factor de Importancia FI = 1.50
Estaciones	10% en 50 años	T = 475 años	NSR-10 (Norma Colombiana de Edificaciones) Decreto 23 de 2010 (Microzonificación sísmica de Bogotá) * Factor de Importancia FI = 1.50

### 6.3 Espectro de diseño en dirección horizontal

Para el viaducto entre estaciones:

- Extrapolación de parámetros del Decreto 523 para periodos de retorno exigidos para el diseño de puentes
- Definición como puente esencial (Factor de importancia = 1.0)
- Reducción por factor de amortiguamiento por el uso de aparatos de apoyo tipo LRB (=1,5)

Para el viaducto en estaciones:

- Parámetros tomados directamente del Decreto 523
- Estructura Grupo IV (Factor de importancia = 1.50)
- Reducción por factor de amortiguamiento por el uso de aparatos de apoyo tipo LRB (=1,5)

Para las estaciones:

- Parámetros tomados directamente del Decreto 523
- Estructura Grupo IV (Factor de Importancia = 1.5)
- Reducción por factor de amortiguamiento por el uso de aparatos de apoyo tipo LRB (=1,5)

Una vez considerado los niveles de desempeño propuestos, el evento que determinó el dimensionamiento de la estructura se indica en la siguiente tabla.

	<b>Sismo Operativo</b>	<b>Sismo Máximo</b>	<b>Dimensionamiento de la estructura</b>
<b>Viaducto entre estaciones</b>	T = 109 años	T = 1000 años	Determinado por el sismo operacional
<b>Viaducto en estación</b>	T = 32 años	T = 475 años	Determinado por el sismo máximo
<b>Estaciones</b>	T = 32 años	T = 475 años	Determinado por el sismo máximo

## 7 VALORACIÓN DEL CRITERIO DE DISEÑO SÍSMICO PROPUESTO

Consideraciones del sismo operativo:

- La decisión de considerar la funcionalidad en el diseño involucra un balance de riesgo y costo entre un trastorno/interrupción del servicio versus medidas adicionales de diseño. Mientras esta decisión es exclusiva del propietario, la responsabilidad del diseñador es suministrar al propietario toda la información que le permita tomar esta decisión económica
- Para el viaducto entre estaciones, el periodo de retorno propuesto (109 años) es consistente con el requerimiento del EC8 (95 años) y con algunos proyectos en USA (72 y 92 años, respectivamente)
- De otra parte, el periodo de retorno sugerido para el viaducto de estación (32 años) se podría considera bajo. Sin embargo, se asume que las aceleraciones espectrales fueron amplificadas con un Factor de Importancia ( $FI = 1.5$ ) con el fin de hacerlas consistentes con el periodo de retorno considerado en el viaducto entre estaciones (109 años)
- Como lo señala la norma colombiana CCP – 2014:
  - Debe resistirse los sismos pequeños a moderados dentro del rango elástico de respuesta de los componentes estructurales sin daños significativos
  - Las entidades que contraten el diseño y construcción de puentes pueden exigir niveles más altos de desempeño para puentes especiales

Consideraciones del sismo máximo:

- Para el viaducto entre estaciones, el periodo de retorno sugerido (1,000 años) es consistente con las normas CCP-2014 y AASHTO de 2007 (1,000 años) y superior al requerimiento del EC8 (475 años)
- En consecuencia, el periodo de retorno sugerido para el viaducto de estación no cumpliría con las normas CCP-2014 y AASHTO (2007). Sin embargo, se asume que las aceleraciones espectrales fueron amplificadas con un Factor de Importancia ( $FI = 1.5$ ) con el fin de hacerlas consistentes con el periodo de retorno considerado en el viaducto entre estaciones

Consideraciones sobre el espectro de diseño (horizontal) – viaducto entre estaciones:

- El Decreto 523 de 2010 se basa en el NSR-10. Y como el NSR-10 no es aplicable para estructuras principales (incluyendo los puentes), se hace necesario extrapolar

los parámetro del Decreto 523 para hacerlos cumplir con el periodo de retorno requerido en el diseño de puentes (109 y 1,000 años, respectivamente)

Consideraciones sobre el espectro de diseño (horizontal) – viaducto en estaciones y estaciones:

- El Decreto 523 es el resultado de la micro-zonificación sísmica que fue establecido por la norma NSR-10 que especifica los requerimientos mínimos para el diseño y construcción de edificaciones nuevas
- Como los coeficientes (y curva de diseño) del Decreto 523 es establecieron para un periodo de retorno de 475 años, estos tuvieron que ser ajustados para el periodo de retorno exigido por la norma colombiana de puentes (CCP-2014)
- Como la relación de aceleración pico ( $A_a$ ) de un periodo de retorno de 1,000 años con respecto al de un periodo de retorno de 475 años es de aproximadamente 1.5, una amplificación de los coeficientes del Decreto 523 por un factor mayor o igual a (1.5) se considera apropiado

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Niveles de desempeño

El criterio de diseño sísmico ha establecido dos (2) niveles de desempeño: sismo máximo y sismo operativo. Considerar dos niveles de desempeño se considera apropiado ya que permite incluir dentro del proceso de diseño tomar decisiones con respecto a: (1) nivel de los eventos sísmicos; (2) respuesta de la estructura; y (3) determinar e nivel de daño aceptable.

En consecuencia, el proceso de diseño debe comprobar es lo siguiente:

- Para el sismo máximo, la estructura **NO PUEDE COLAPSAR**. Sin embargo, el daño puede ser significativo y el servicio puede sufrir de interrupción
- Para el sismo esperado (operativo), el **DAÑO ES MÍNIMO** y la estructura debe continuar operativa después del evento

Con respecto al sismo operativo, el diseño debe considerar en su análisis el espectro del 'Sismo de Operación' y comprobar que la estructura se comporta dentro del 'Rango Elástico'. Como lo señalan las normas colombianas: la estructura debe resistir los sismos pequeños a moderados dentro del rango elástico de respuesta de los componentes estructurales sin daños significativos.

Funcionalidad viaducto entre estaciones:

- Para el diseño de puentes (AASHTO y CCP-2014), se adopta un periodo de retorno de 1,000 años (evento máximo esperado) para el estado límite (no colapso). Sin embargo, no hay ningún requerimiento específico o criterio para definir el nivel operativo. En consecuencia, en la mayoría de los países (por ejemplo, USA y Colombia) es decisión exclusiva del propietario definir ese nivel de desempeño
- En este informe, se hizo mención a varios ejemplos donde el propietario definió el nivel de operación:
  - Proyectos viales en California Orange County (periodo de retorno de 72 años)
  - East Bay Spans para el puentes entre San Francisco y Oakland (periodo de retorno de 92 años)
- Sin embargo, según el Eurocódigo (Sección 5.5), el sismo de daño limitado considera un periodo de retorno de 95 años
- Para el caso específico del Metro Bogotá, el periodo de retorno propuesto es de 109 años. Entonces, se considera que el criterio propuesto es apropiado

Funcionalidad viaducto en estación y en las estaciones:

- Las normas de edificaciones (NSR-10 y Decreto 523) solo hacen mención al estado límite de la estructura (no colapso) para una probabilidad del 10% de excedencia en un lapso de 50 años. Por el hecho de ser considerada una “estructura indispensable”, se le aplica un factor de amplificación a la aceleración pico (Aa)
- Sin embargo, el criterio de funcionalidad es el mismo de (no colapso). En consecuencia, se confirma que el criterio de funcionalidad (para el sismo de operación) no está regulado por las normas colombianas
- Como se mencionó anteriormente, la única norma que sugiere el periodo de retorno para el sismo operativo es el Eurocódigo: 95 años de periodo de retorno
- Para el caso específico del Metro Bogotá, el periodo de retorno propuesto es de solo 32 años. Se puede considerar un periodo de retorno bajo con respecto al sugerido por el Eurocódigo. Sin embargo, considerando que la aceleración pico (Aa) para un periodo de 32 años \* 1.5 (considerando el factor de importancia de la estructura) se puede considerar muy similar a la (Aa) para un periodo de retorno de 100 años, se puede afirmar que el criterio propuesto es apropiado

Con respecto al sismo máximo, este tiene el potencial de causar una alteración significativa (con interrupción incluida), se recomienda hacer un análisis de costos comparativos (por ejemplo, costos de interrupción vs. costos de un diseño a un periodo de retorno de un periodo de retorno mayor a 1,000 años) para niveles de riesgo más bajos. En algunos proyectos considerados de gran importancia en USA, se han considerado periodos de retorno de 1,500 y 2,500 años, respectivamente.

## **8.2 Instrumentación sísmica a lo largo del viaducto**

Con el fin de asegurar la seguridad en trenes de alta velocidad – en países de gran intensidad sísmica (China, Japón, Corea del Sur) y otros de menor intensidad (Alemania, Francia)-, algunos países han establecido un ‘Sistema de Monitoreo Sísmico para Aviso Temprano’

- En China (país donde el 40% de su territorio está localizado en zonas de alto riesgo sísmico), se usa la ‘aceleración pico del terreno’ para determinar si un sismo activa el sistema de aviso cuando el tren está en operación
- Para los trenes de alta velocidad en China, se consideraron los siguientes puntos:

- El principio es instalar puntos de instrumentación sísmica solo en zonas de alto riesgo sísmico en intervalos de 20 km
- El límite de alarma fue definido en 0.04 g (cerca de 40 cm/s<sup>2</sup>)

Considerando que Bogotá está localizada en una zona de intensidad media y que el viaducto es de solo 24 km, la necesidad de instalar instrumentación sísmica con base en el criterio chino no sería necesaria. Sin embargo, si el sistema instalado es lo suficientemente efectivo (en términos de tiempo que permita controlar la operación de los trenes), se podría considerar para la primera Línea del Metro Bogotá.

### **8.3 Instrumentación sísmica de las estaciones**

Según el criterio de diseño sísmico considerado, las estaciones son “edificaciones indispensables”. Por lo tanto, deben funcionar durante y después de un sismo.

En algunos países de gran actividad sísmica, las edificaciones indispensables (como los hospitales) están incluyendo ‘monitoreo sísmico’ con el fin de registrar y procesar la respuesta sísmica de la estructura. El análisis de esta respuesta operacional sirve principalmente para la detección de daños en la estructura

Si existe el propósito continuo de valorar el estado funcional de la estructura (así, como de los elementos no estructurales dentro de la estación), un sistema de instrumentación sísmica podría ser implementado en las estaciones por las siguientes razones:

- Soporte efectivo del manejo de la emergencia después del evento sísmico
- Proporciona información relevante en tiempo real sobre los daños de la estructura