Comparativa de los espectros de diseño de la NSR-10 con respecto a los estudios de microzonificación sísmica en la ciudad de Cali – Caso de estudio.

Santiago Correa Rincón
Juan Andrés Cassares Tapias

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor
Mauricio José Castro García, Ingeniero Civil, M.Sc.C.E.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Correa Rincón & Cassares Tapias, 2024)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Correa Rincón, S., & Cassares Tapia, J. A. (2024). *Comparativa de los espectros de diseño de la NSR-10 con respecto a los estudios de microzonificación sísmica en la ciudad de Cali – Caso de estudio* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

creative commons CC BY NC SA

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedicada a Nancy Tapias y Laurina Rincón.

Agradecimientos

A Dios. A nuestros profesores de la especialización, quienes han sido de inspiración para seguir amando la profesión. Y a nuestro distinguido grupo de estudio cuya alegría ha servido para hacer más llevadera la instancia en el posgrado.

Tabla de contenido

Resumen 10

Abstract 11

Introducción 12

1. Planteamiento del problema 14

2. Justificación 15

3. Objetivos 17

3.1 Objetivo general 17

3.2 Objetivos específicos 17

4. Marco teórico y revisión de literatura. 18

5. Caso de estudio 24

5.1 Metodología. 24

5.2 Espectros de diseño de la norma NSR-10. 25

5.2.1 Espectro de aceleraciones con suelo tipo A. 25

5.2.2 Espectro de aceleraciones con suelo tipo B. 26

5.2.3 Espectro de aceleraciones con suelo tipo C. 27

5.2.2 Espectro de aceleraciones con suelo tipo D. 28

5.2.3 Espectro de aceleraciones con suelo tipo E. 29

5.3 Espectros de diseño de los estudios de microzonificación sísmica 30

5.3.1 Espectro de diseño para suelo tipo A 31

5.3.1.1. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – Micro Zona 1 Suelo: Tipo A 31

5.3.2 Espectro de diseño para suelo tipo B 31

5.3.2.1. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 2 Suelo: TIPO B) 31

5.3.2.2. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 3 TIPO B 32

5.3.2.3. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4ª Suelo: TIPO B) 32

5.3.2.4. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4B Suelo: TIPO B) 33

5.3.2.5. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4E Suelo: TIPO B) 33

5.3.3 Espectro de aceleraciones con suelo tipo C 33

5.3.3.1 Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 5 Suelo: TIPO C) 33

5.3.3.2 Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 6 Suelo: TIPO C) 34

5.3.4 Espectro de aceleraciones con suelo tipo D 35

5.3.4.1. Espectro de diseño (ESTUDIO AGUIRRE – MicroZona 4C - VELODROMO TIPO D) 35

5.3.4.2. Espectro de diseño (ESTUDIO AGUIRRE – MicroZona 4C – EU NAVARRO Suelo: TIPO D) 35

5.3.4.3. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4C Suelo: TIPO D 36

5.3.5 Espectro de aceleraciones con suelo tipo E 37

5.3.5.1. Espectro de diseño MELENDEZ MicroZona 5 TIPO E 37

6. Análisis de los resultados. 38

6.1 Metodología de Análisis. 38

6.1.1 Tipo de suelo A Vs NSR – 10. 38

6.1.2 Tipo de suelo B Vs NSR – 10. 40

6.1.3 Tipo de suelo C vs. NSR – 10. 41

6.1.4 Tipo de suelo D Vs NSR – 10. 42

6.1.5 Tipo de suelo E Vs NSR – 10. 43

6.2 Consideraciones fundamentales. 45
6.2.1 Variabilidad Local de las Condiciones del Suelo. 45
6.2.2 Influencia del Tamaño de la Muestra. 45
6.2.3 Desviación de los Resultados con Respecto a la NSR-10. 46
6.2.4 Influencias Geológicas y Topográficas. 46
7. Recomendaciones. 48
7.1 Revisión y Ajuste del Espectro de Diseño por Microzonas. 48
7.2 Considerar el Aumento de las Aceleraciones de Diseño. 48
7.3 Monitoreo y Validación Continua de los Espectros de Diseño. 48
7.4 Revisión de la Normativa. 49
8. Conclusiones. 50
9. Referencias. 52

Lista de tablas

Tabla 1 Caracterización de los espectros de respuesta. 21

Tabla 2 Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo A para Cali. 25

Tabla 3 Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo B para Cali. 26

Tabla 4 Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo C para Cali. 27

Tabla 5 Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo D para Cali. 28

Tabla 6 Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo E para Cali. 29

Tabla 7 Comparativa de Parametreos Suelo A vs NSR-10. 39

Tabla 8 Comparativa de Parametreos Suelo B vs NSR-10. 41

Tabla 9 Comparativa de Parametreos Suelo C vs NSR-10. 42

Tabla 10 Comparativa de Parametreos Suelo D vs NSR-10. 43

Tabla 11 Comparativa de Parametreos Suelo E vs NSR-10. 44

Lista de figuras

Figura 1 Acelerograma de respuesta sísmica. 12

Figura 2 Espectro de respuesta de desplazamiento. 19

Figura 3 Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g. 20

Figura 4 Mapa de Zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Cali. 22

Figura 5 Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo A. ..... 25~~26~~

Figura 6 Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo B. 27

Figura 7 Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo C. 28

Figura 8 Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo D. 29

Figura 9 Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo E. 30

Figura 10 Espectro de diseño asociado a Microzona 1 Suelo: Tipo A 31

Figura 11 Espectro de diseño asociado a Microzona 2 Suelo: Tipo B. 31

Figura 12 Espectro de diseño asociado a Microzona 3 Suelo: Tipo B. 32

Figura 13 Espectro de diseño asociado a Microzona 4A Suelo: Tipo B. 32

Figura 14 Espectro de diseño asociado a Microzona 4B Suelo: Tipo B. 33

Figura 15 Espectro de diseño asociado a Microzona 4E Suelo: Tipo B. 33

Figura 16 Espectro de diseño asociado a Microzona 5 Suelo: Tipo C. 34

Figura 17 Espectro de diseño asociado a Microzona 6 Suelo: Tipo C. 34

Figura 18 Espectro de diseño asociado a Microzona 4C - VELODROMO Suelo: Tipo D. 35

Figura 19 Espectro de diseño asociado a Microzona 4C EUA NAVARRO Suelo: Tipo D. 35

Figura 20 Espectro de diseño asociado a Microzona 4C Suelo: Tipo D. 36

Figura 21 Espectro de diseño asociado a Microzona 4D Suelo: Tipo D. 36

Figura 22 Espectro de diseño asociado a Microzona 5 Melendez Suelo: Tipo E. 37

Figura 23 Espectro de diseño suelo tipo A vs NSR-10.....39

Figura 24 Espectro de diseño suelo tipo B vs NSR-10. 40

Figura 25 Espectro de diseño suelo tipo C vs NSR-10. 41

Figura 26 Espectros de diseño suelo tipo D vs NSR-10. 43

Figura 27 Espectros de diseño suelo tipo E vs NSR-10. 44

Resumen

En este estudio se comparan los espectros de respuesta sísmica del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 con los obtenidos a partir de un conjunto de estudios de microzonificación sísmica realizados en la ciudad de Cali, con el objetivo de identificar posibles discrepancias y proponer ajustes en la normativa. La microzonificación sísmica es clave para entender la respuesta sísmica local, especialmente en una ciudad como la que es objeto de este estudio, localizada en una zona de alta actividad sísmica. Los estudios previos han mostrado que los espectros específicos de la ciudad pueden diferir significativamente de los establecidos en la NSR-10, lo que podría indicar la necesidad de ajustes en la normativa para reflejar mejor las condiciones locales.

El proceso metodológico incluye una revisión de la literatura, el análisis de los espectros de la NSR-10, y la recopilación de espectros basados en estudios locales, para proceder a una comparación directa de estos espectros, evaluando las diferencias y su impacto en el diseño sismo-resistente de estructuras en la ciudad de Cali.

Este trabajo busca no solo identificar la adecuación de la NSR-10 para la ciudad, sino también proponer recomendaciones que permitan mejorar la seguridad y resiliencia de las edificaciones, ajustando la normativa a las particularidades sísmicas de Cali. Con estos ajustes, se espera contribuir a la construcción de estructuras más seguras y preparadas para resistir futuros eventos sísmicos.

Palabras clave: Microzonificación sísmica, Espectros de respuesta, Cali, Sismicidad, Normativa.

Abstract

This study compares the seismic response spectra from the Colombian standard NSR-10 with those obtained from a set of seismic microzonation studies conducted in Cali, aiming to identify discrepancies and propose adjustments to the regulations. Seismic microzonation is essential for understanding local seismic response, particularly in a city like Cali, located in a high seismic activity zone. Previous studies have shown that the specific spectra for the city may significantly differ from those established in the NSR-10, suggesting the need for adjustments to better reflect local conditions.

The methodology involves an extensive literature review, analysis of NSR-10 spectra, and gathering of a set of spectra based on local studies. A direct comparison of these spectra is made, evaluating differences and their impact on earthquake-resistant structural design in Cali.

This work seeks not only to assess the suitability of NSR-10 for the city but also to propose recommendations that enhance the safety and resilience of buildings by adjusting the regulations to seismic characteristics in Cali. These adjustments are expected to contribute to the construction of safer structures, better prepared to withstand future seismic events.

*Keywords***:** Seismic microzonation, Response spectra, Cali, Seismicity, Regulations.

Introducción

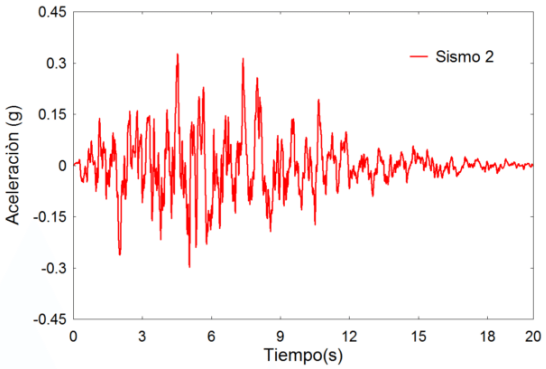
El propósito del presente estudio es comparar los espectros de respuesta de diseño especificados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 con los espectros generados a partir de diversos estudios de microzonificación sísmica realizados en la ciudad de Cali. Este análisis tiene como objetivo evaluar la adecuación de la normativa actual y proponer posibles ajustes que reflejen mejor las condiciones sísmicas locales.

Los espectros de respuesta son herramientas esenciales en la ingeniería civil para comprender el comportamiento dinámico de las estructuras durante un sismo y diseñar sistemas de construcción más seguros y resilientes (Chopra, 2012). Estos espectros permiten a los ingenieros prever las demandas sísmicas que una estructura puede enfrentar, ayudando a mitigar el riesgo de daños estructurales severos. Sin embargo, la precisión de estos espectros depende en gran medida de la calidad y especificidad de los datos en los que se basan.

En el contexto de Cali, una ciudad ubicada en una zona de alta actividad sísmica, la microzonificación sísmica juega un papel crucial. Los estudios de microzonificación, que incluyen el análisis detallado de acelerogramas locales, proporcionan una visión más precisa de las condiciones sísmicas específicas de diferentes áreas dentro de la ciudad (Seed et al, 1982). En la figura 1 se muestra una representación de un acelerograma y su comportamiento. Estos estudios permiten identificar variaciones en las características del suelo y otros factores geotécnicos que pueden influir significativamente en las respuestas sísmicas.

Figura 1

Acelerograma de respuesta sísmica.



Nota. Fuente https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Acelerograma-artificial_fig3_316919726 (Reyes et al.,2016).

El Reglamento NSR-10 establece espectros de respuesta de diseño para diversas zonas del país, sin embargo, es posible que estos espectros no capturen completamente las particularidades locales de Cali. Discrepancias entre los valores de aceleración previstos por la normativa y los observados en la realidad pueden llevar a subestimar o sobreestimar las demandas sísmicas (Clough et al., 1993).

Este estudio se propone comparar detalladamente los espectros de respuesta de la NSR-10 con los generados por estudios de microzonificación en Cali. La finalidad es identificar posibles diferencias y recomendar ajustes a la normativa que mejoren la precisión y relevancia de los espectros de diseño, contribuyendo así a la construcción de edificaciones más seguras y preparadas para resistir futuros eventos sísmicos.

1. Planteamiento del problema

La ciudad de Cali, ubicada en una región de alta actividad sísmica, presenta una variedad de características geotécnicas que influyen en la respuesta sísmica de las estructuras. La normativa colombiana vigente, NSR-10, establece espectros de respuesta de diseño que son aplicados de manera general en todo el país. Sin embargo, estos espectros pueden no reflejar adecuadamente las condiciones específicas de microzonificación sísmica de Cali, lo que podría llevar a diseños estructurales que no estén óptimamente preparados para resistir un sismo en esta área.

Los estudios de microzonificación sísmica en Cali han generado espectros de respuesta basados en datos locales más precisos, como acelerogramas específicos de la región. Estos estudios sugieren que los espectros de la NSR-10 podrían no capturar las particularidades del suelo y la sismicidad local, lo que plantea la posibilidad de que las estructuras diseñadas bajo esta normativa estén sobreestimadas o subestimadas en cuanto a su capacidad para soportar un sismo.

El problema central es determinar si los espectros de respuesta de la NSR-10 son adecuados para todas las zonas de Cali, o si es necesario ajustar la normativa para garantizar que los edificios en la ciudad estén correctamente diseñados y sean capaces de resistir eventos sísmicos futuros con mayor precisión y seguridad. Esto es crucial para reducir los riesgos de daños estructurales y mejorar la resiliencia sísmica de las construcciones en Cali.

2. Justificación

Los espectros de respuesta constituyen la herramienta fundamental para determinar la respuesta esperada de las estructuras a los movimientos sísmicos de diseño. Estos espectros proporcionan información sobre las fuerzas que deben soportar las construcciones, permitiendo a los ingenieros diseñar sistemas más seguros y resilientes.

La normativa sísmica colombiana, documentada en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, establece los espectros de respuesta de diseño que deben utilizarse para la construcción en diferentes zonas del país. Sin embargo, estos espectros son generales y pueden no reflejar las condiciones específicas de microzonificación sísmica presentes en un sitio en particular. Las diferencias en las características del suelo, la proximidad a fallas sísmicas y otros factores pueden hacer que las respuestas reales difieran significativamente de las previstas por la norma. Los acelerogramas registrados en estudios de microzonificación, en cambio, proporcionan datos más detallados y específicos sobre cómo diferentes partes de la ciudad reaccionan ante los eventos sísmicos.

En el contexto de la ciudad de Cali, la evaluación precisa de estos espectros es especialmente importante debido a la particular actividad sísmica de la región y sus diversas características geotécnicas. El presente estudio se propone comparar los espectros de respuesta de la NSR-10 con los generados a partir de estos estudios locales, buscando identificar discrepancias y áreas de mejora, como elemento de juicio para validar la adecuación de la NSR-10 en esta ciudad y, de ser necesario, proponer ajustes que mejoren la precisión y relevancia de los espectros de diseño. Se espera así contribuir a la construcción de edificaciones más seguras y resilientes, reduciendo el riesgo para las vidas humanas y los bienes materiales.

La microzonificación sísmica es esencial para adaptar las normativas de diseño estructural a las características locales del suelo, lo que se traduce en una mayor seguridad y resiliencia frente a eventos sísmicos. Como referencia, en el caso de Medellín el estudio de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (Universidad de Los Andes, 2020) reveló que la variabilidad geotécnica del terreno provoca una amplificación significativa de las ondas sísmicas en ciertas zonas. Este tipo de información detallada, que no es captada por normativas más generales como la NSR-10, permitió ajustar los espectros de diseño sísmico y definir áreas donde el riesgo de

fenómenos como la licuación del suelo es elevado, ayudando a mejorar la planificación y mitigación del riesgo sísmico.

De manera similar, en el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (Universidad Nacional de Colombia, 2010), se determinó que los suelos blandos de ciertas zonas amplifican las ondas sísmicas de baja frecuencia, lo que justifica la importancia de realizar estudios locales detallados para optimizar el diseño estructural. Estos estudios proporcionan espectros de diseño específicos y permiten identificar zonas con mayor vulnerabilidad, lo que resulta en estrategias de construcción más seguras y adaptadas a las características sísmicas locales. Como menciona el estudio de Bogotá, "la variación de la respuesta sísmica en suelos blandos en las localidades del sur y occidente de la ciudad genera la necesidad de adoptar factores de amplificación más conservadores" (Universidad Nacional de Colombia, 2010).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la conformidad de los espectros de respuesta de diseño de la NSR-10 para los distintos perfiles de suelo en la ciudad de Cali con los generados con diferentes estudios de microzonificación sísmica efectuados en esta ciudad e identificar eventuales oportunidades de mejora.

3.2 Objetivos específicos

- Compilar un conjunto de espectros de respuesta sísmica existentes de estudios de microzonificación realizados en la ciudad de Cali.
- Analizar los estudios de microzonificación sísmica recopilados, evaluando las diversas características que afectan las respuestas sísmicas y la generación de espectros de diseño específicos.
- Contrastar los espectros de respuesta de la NSR-10 con los espectros obtenidos de los estudios de microzonificación, identificando similitudes y diferencias.
- Determinar si los espectros de respuesta de la NSR-10 son adecuados para todas las zonas de Cali o si presentan limitaciones en ciertas áreas específicas.
- Desarrollar recomendaciones para la implementación de estas modificaciones en futuras revisiones de la NSR-10.

4. Marco teórico y revisión de literatura.

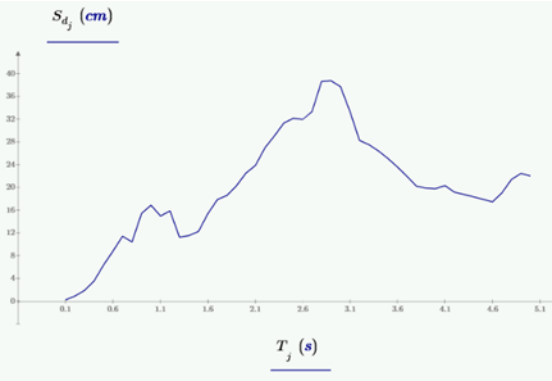
La microzonificación sísmica, fundamental para comprender la vulnerabilidad de una región ante los terremotos, se basa en la evaluación de la respuesta sísmica localizada. Esta respuesta se analiza mediante el uso de acelerogramas, registros de la aceleración del suelo durante un sismo. Los acelerogramas proporcionan información detallada sobre la energía liberada y la duración del evento sísmico, elementos fundamentales para la evaluación del riesgo (García, 1998).

Se define como acelerograma a una representación gráfica del movimiento del suelo durante un terremoto. Se registra utilizando dispositivos llamados acelerógrafos, que son instrumentos diseñados para medir y registrar la aceleración del suelo en respuesta a un sismo. En consecuencia, estos datos son fundamentales para comprender cómo un movimiento sísmico afecta las estructuras y el terreno, y son utilizados en la evaluación de la respuesta estructural y en el diseño de edificaciones resistentes a los terremotos (Villarruel et al., 2005).

Por otra parte, el espectro de respuesta es una representación gráfica de la envolvente de las aceleraciones, los desplazamientos (figura 2), y las velocidades máximas que experimenta una estructura en función de su periodo natural. También, proporciona información sobre cómo diferentes periodos de vibración afectan la respuesta estructural y, por lo tanto, influyen en el diseño y la construcción de edificaciones resistentes a los terremotos. A partir de varios espectros de respuesta sísmica, se pueden crear espectros de diseño que son las envolventes máximas de los distintos espectros de respuesta.

Figura 2

Espectro de respuesta de desplazamiento.



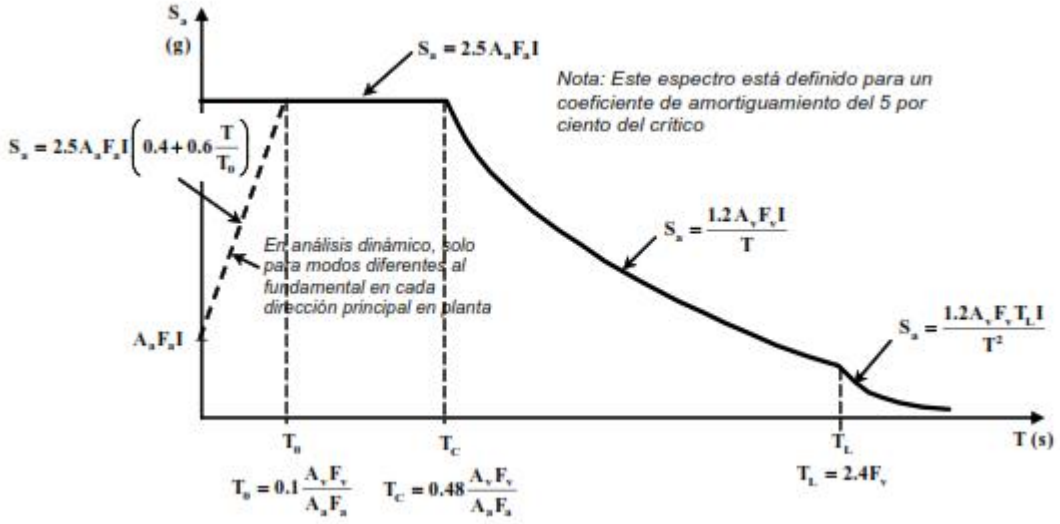
Nota. Fuente: https://es.linkedin.com/pulse/espectro-de-respuesta-cristhian-ram%C3%ADrez

Los modelos de análisis utilizados para evaluar la respuesta sísmica incluyen tanto modelos numéricos como modelos físicos, que pueden representan el comportamiento mecánico del suelo bajo la acción de los movimientos sísmicos. Estos métodos son esenciales para simular el comportamiento de las estructuras bajo diferentes condiciones de carga y para diseñar edificaciones seguras (Villarruel et al.,2005).

La microzonificación sísmica ha contribuido a los esfuerzos de la ingeniería estructural para mitigar los efectos de los terremotos en áreas urbanas. La ciudad de Cali, ubicada en una región de amenaza sísmica alta, ha sido objeto de varios estudios de microzonificación sísmica. Estos estudios han permitido desarrollar espectros de diseño específicos que reflejan las condiciones locales de manera más precisa comparados con los espectros definidos por el Reglamento NSR-10, como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g.



Nota. Fuente: NSR-10 (2010).

En el contexto de la microzonificación sísmica de Cali se han realizado varios estudios de trascendental importancia. Uno de estos es el "Análisis y modelación de la respuesta sísmica local del subsuelo en Santiago de Cali: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali" (Gómez et al., 2017). Este estudio se centró en el análisis de los suelos tipo D, predominantes en varias zonas de la ciudad, y utilizó datos de sismos registrados y estudios de suelo locales para dar a conocer los comportamientos propios y su respectiva interacción con las estructuras.

Otro estudio relevante es el realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2018), que se enfocó en la microzonificación sísmica de Cali. Este estudio integró una visión más amplia al considerar una mayor variedad de perfiles de suelo y su impacto en la respuesta sísmica. El SGC destacó la importancia de juzgar la variación de las propiedades del suelo para mejorar la precisión de los espectros de respuesta locales.

Igualmente, el "Proyecto de microzonificación sísmica de la Alcaldía de Santiago de Cali" (Alcaldía de Santiago de Cali, 2019) se dedicó a la caracterización detallada del subsuelo y su comportamiento sísmico. En este estudio se subrayó la necesidad de fomentar el uso de espectros de respuesta específicos que reflejen las condiciones locales de manera más fiel en comparación con la normativa general.

Para la presente monografía, se hará análisis de las discrepancias y similitudes que existen entre los espectros de diseño de la NSR -10 y los suministrados por diferentes estudios de

microzonificación sísmica. Por tanto, se utilizarán estudios previos realizados en la región, como se muestra en la tabla 1, caracterizando estos estudios bajo parámetros que permiten ubicarlos en un contexto.

Tabla 1

Caracterización de los espectros de respuesta.

Estudio de Microsonificación	Tipo de Suelo	TC(s)	Sa(g)	Año
Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali	C	1,15	0,68	(Villarruel et al,2005)
Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali	C	0,6	0,7	(Villarruel et al,2005)
Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali	B	0,95	0,57	(Villarruel et al,2005)
Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali	B	1,2	0,62	(Villarruel et al,2005)
Microzonificación sísmica de Santiago de Cali: Proyecto de resiliencia urbana.	D	0,7	0,65	(Alcaldía de Santiago de Cali, 2019)
Microzonificación sísmica de Santiago de Cali: Proyecto de resiliencia urbana.	D	1,2	0,62	(Alcaldía de Santiago de Cali, 2019)
Espectro de Diseño de la NSR-10	D	0,66	0,8125	(Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

Al analizar ciertos parámetros y conclusiones de los resultados de estos estudios, se observa que los espectros de respuestas obtenidos suelen mostrar diferencias significativas con relación a los espectros definidos en la NSR 10. La norma colombiana proporciona espectros de diseño basados en la caracterización más general del suelo y en criterios de zonificación sísmica amplia, lo que puede no refleja adecuadamente las variaciones locales específicas de suelos tipo D en Cali.

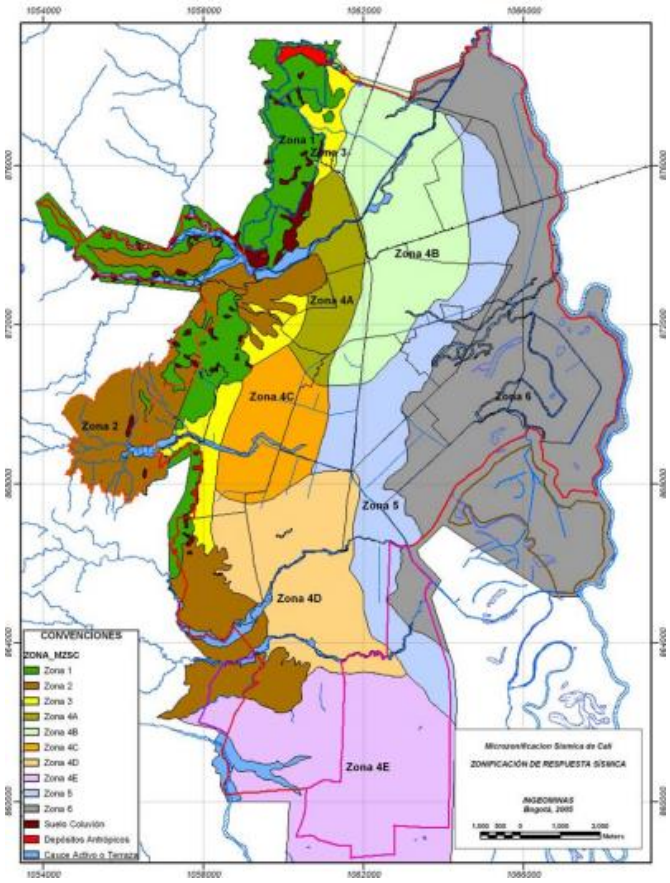
El estudio de Gómez et al. (2017) encontró que el espectro de diseño específicos para suelos figura D en Cali tienden a mostrar mayores valores de aceleración en periodos cortos, lo que implica una demanda sísmica más alta para estructuras rígidas. Por su parte, el SGC (2013) destacó la necesidad de ajustar los espectros de diseño en periodos intermedios y largos, donde las estructuras flexibles pueden estar subdiseñadas según la NSR-10.

Es evidente a partir de estos estudios la necesidad de amplificar espectros de respuesta para que sean más detallados y específicos para diferentes tipos de suelos en una misma ciudad, en lugar de necesitar de la normativa generalizada. Este enfoque refleja un movimiento hacia la especificidad en la ingeniería sísmica, apoyada por avances en la ciencia de monitoreo y separación de datos sísmicos.

Se presentan a continuación la nomenclatura y la ubicación de las diferentes micro zonas establecidas en el estudio de microzonificación sísmica realizado por Villarruel et al., (2005), donde se resumen las zonas de respuesta sísmica identificadas y su correlación con las zonas geotécnicas y con las unidades geológicas superficiales definidas para Cali.

Figura 4

Mapa de Zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Cali.



Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

Para concluir, este estudio tiene como objetivo comparar los espectros de diseño derivados de los estudios de microzonificación sísmica más recientes con los espectros de diseño de la NSR-10 para los suelos tipo A, B, C, D y E en Cali, utilizando un coeficiente de importancia de 1. Esta comparación permitirá evaluar si la normativa vigente sobredimensiona las estructuras o, por el contrario, se ajusta adecuadamente a las condiciones locales. Las conclusiones obtenidas serán fundamentales para recomendar posibles ajustes en la normativa, con el fin de mejorar la seguridad sísmica en la ciudad.

5. Caso de estudio.

5.1 Metodología.

Se describe a continuación la metodología utilizada para llegar a las conclusiones y recomendaciones objeto de este estudio.

En primer lugar, se llevará a cabo una revisión de la literatura relacionada con la sismología, la ingeniería sísmica y, en particular, con la normativa NSR-10. Para ello, se consultarán estudios previos sobre microzonificación sísmica, tanto en la ciudad de Cali como en otras ciudades con características sísmicas similares. Adicionalmente, se recopilarán los documentos del Reglamento NSR-10 que detallen los espectros de diseño sísmico específicos para Cali, asegurando así una comprensión completa de los parámetros normativos aplicables.

Posteriormente, se procederá a extraer los parámetros sísmicos pertinentes de la NSR-10, tales como la aceleración sísmica máxima (PGA) y los factores de amplificación para los distintos tipos de suelo. Con estos parámetros, se construirá el espectro de diseño correspondiente, considerando los distintos tipos de suelo estipulados en la norma. Este análisis permitirá obtener una representación clara y detallada de las exigencias sísmicas según la normativa vigente.

Luego, se analizará diferentes estudios de microzonificación sísmica de Cali, con el objetivo de identificar las variaciones en las características del suelo dentro de la ciudad. A su vez, identificar los espectros de diseño de aceleraciones que proporciona el estudio con el objetivo de tener un tamaño de muestra significativo para cada tipo de suelo.

Una vez obtenidos los espectros de diseño tanto de la NSR-10 como del estudio de microzonificación, se procederá a una comparación directa entre ellos. En esta etapa, se evaluarán las diferencias en términos de aceleraciones espectrales, periodos dominantes y la influencia de las características locales del suelo. El análisis se enfocará en identificar cómo estas diferencias podrían impactar en el diseño sismo-resistente de estructuras en Cali, discutiendo los posibles ajustes que podrían requerirse en la práctica de la ingeniería estructural local para mejorar la seguridad y eficiencia de las construcciones.

Finalmente, se sintetizarán las conclusiones derivadas de la comparación, destacando las implicaciones prácticas para el diseño estructural en Cali. Se evaluará la pertinencia de los espectros de diseño de la NSR-10 frente a los obtenidos a partir de la microzonificación sísmica, y se propondrán recomendaciones para la implementación de estos estudios en la normativa y en la

práctica de la ingeniería. El objetivo final será aportar a la mejora de la seguridad y la resiliencia de las edificaciones en la ciudad, adaptando las mejores prácticas a las condiciones sísmicas locales.

5.2 Espectros de diseño de la norma NSR-10.

En la normativa colombiana se tienen unos parámetros y una serie de ecuaciones, tablas y figuras que nos ayudan a obtener cada uno de los espectros de aceleraciones para cualquier sitio en el país. En particular, teniendo en cuenta todas las características normalizadas para la ciudad de Cali, se pueden obtener espectros para los distintos tipos de suelo.

Por otro lado, hay variables principales que no dependen del tipo de suelo, tales como el coeficiente de importancia I.

5.2.1 Espectro de aceleraciones con suelo tipo A.

Para este tipo de suelo se caracteriza por las condiciones del suelo sabiendo las componentes iniciales como se muestra en la tabla 2.

.

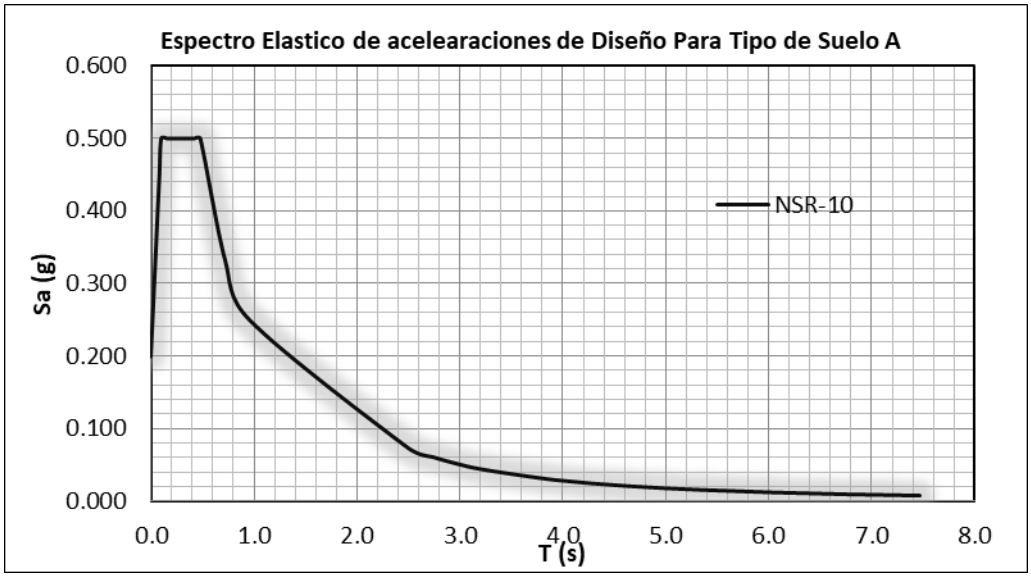
Tabla 2

Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo A para Cali

Zona de Amenaza Sísmica:	Alta		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Aceleracion (Aa):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Velocidad (Av):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fa):	0.80		Tabla A.2.4-3
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fv):	0.80		Tabla A.2.4-4
Coeficiente de Importancia (I):	1.00		A.2.5.1
Espectro de Diseño (Sa):	Gráfico		Título A
Período de Vibración Inicial (To):	0.10	[s]	Título A
Período de Vibración Corto (Tc):	0.48	[s]	Título A
Período de Vibración Largo (T_L):	1.92	[s]	Título A

Figura 5

Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g para Cali con tipo de suelo A.



5.2.2 Espectro de aceleraciones con suelo tipo B.

Para el tipo de suelo B se puede caracterizar las condiciones del suelo y sus diferentes periodos de diseño.

Tabla 3

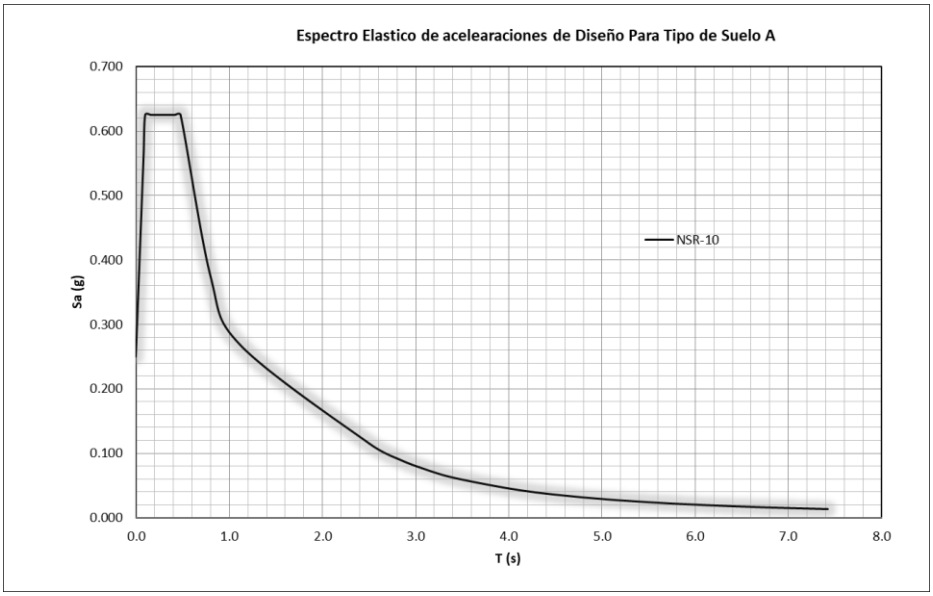
Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo B para Cali.

Zona de Amenaza Sísmica:	Alta		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Aceleracion (Aa):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Velocidad (Av):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fa):	1.00		Tabla A.2.4-3
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fv):	1.00		Tabla A.2.4-4
Coeficiente de Importancia (I):	1.00		A.2.5.1
Espectro de Diseño (Sa):	Gráfico		Título A
Período de Vibración Inicial (To):	0.10	[s]	Título A
Período de Vibración Corto (Tc):	0.48	[s]	Título A
Período de Vibración Largo (T_L):	2.40	[s]	Título A

.

Figura 6

Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo B.



5.2.3 Espectro de aceleraciones con suelo tipo C.

Para el tipo de suelo C se puede caracterizar las condiciones del suelo y sus diferentes periodos de diseño.

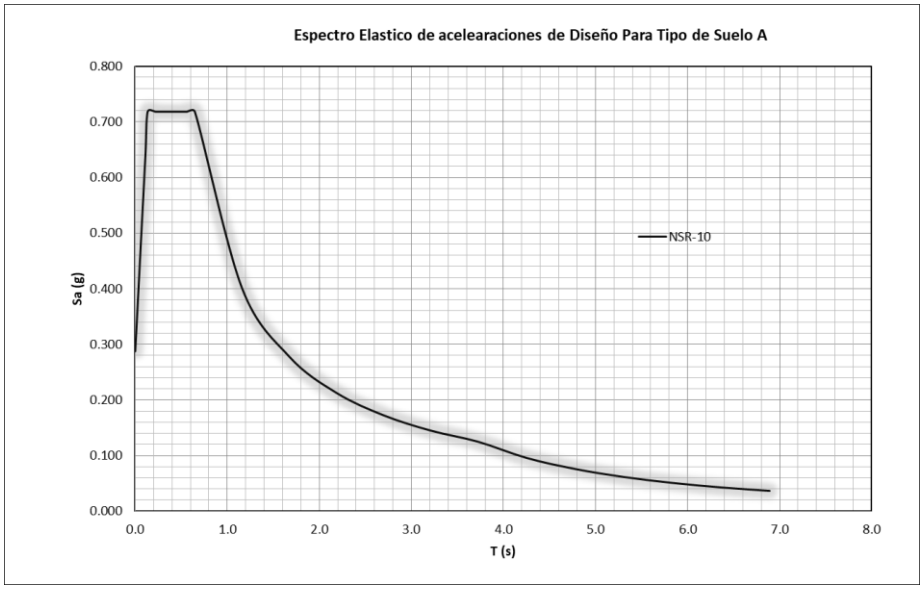
Tabla 4

Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo C para Cali.

Zona de Amenaza Sísmica:	Alta		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Aceleracion (Aa):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Velocidad (Av):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fa):	1.15		Tabla A.2.4-3
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fv):	1.55		Tabla A.2.4-4
Coeficiente de Importancia (I):	1.00		A.2.5.1
Espectro de Diseño (Sa):	Gráfico		Título A
Período de Vibración Inicial (To):	0.13	[s]	Título A
Período de Vibración Corto (Tc):	0.65	[s]	Título A
Período de Vibración Largo (T_L):	3.72	[s]	Título A

Figura 7

Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo C.



5.2.2 Espectro de aceleraciones con suelo tipo D.

Siguiendo el procedimiento anteriormente mostrado, se procede a armar los diferentes valores de las variables para finalmente armar el espectro de diseño tanto de los suelos tipo D y tipo E, con los siguientes resultados.

Para el tipo de suelo D se tiene una lista de condiciones iniciales que caracterizan el sistema estructural y sus condiciones.

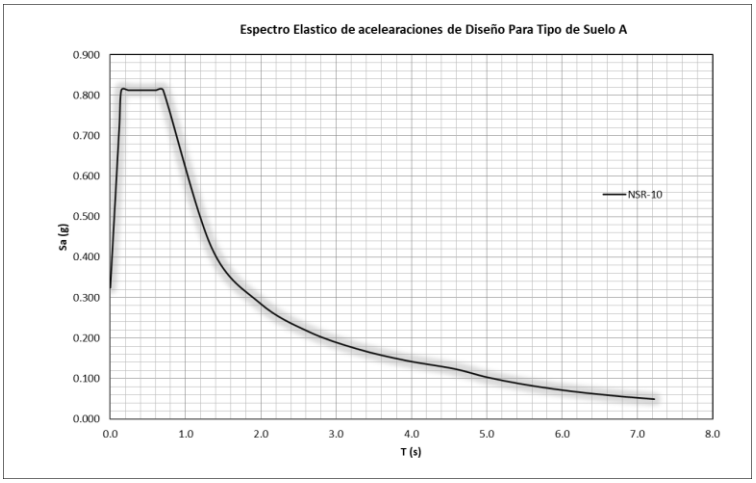
Tabla 5

Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo D para Cali.

Zona de Amenaza Sísmica:	Alta		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Aceleracion (Aa):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Velocidad (Av):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fa):	1.30		Tabla A.2.4-3
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fv):	1.90		Tabla A.2.4-4
Coeficiente de Importancia (I):	1.00		A.2.5.1
Espectro de Diseño (Sa):	Gráfico		Título A
Período de Vibración Inicial (To):	0.15	[s]	Título A
Período de Vibración Corto (Tc):	0.70	[s]	Título A
Período de Vibración Largo (T_L):	4.56	[s]	Título A

Figura 8

Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo D.



5.2.3 Espectro de aceleraciones con suelo tipo E.

Para finalizar, el tipo de suelo E se realiza en mismo procedimiento de los dos tipos de suelo anteriormente mostrados. En su caracterización, la categoría E de suelo es la de mayores aceleraciones en el valle de los periodos que podemos encontrar, por ello se muestran los siguientes valores de sus condiciones de periodos y aceleraciones.

Tabla 6

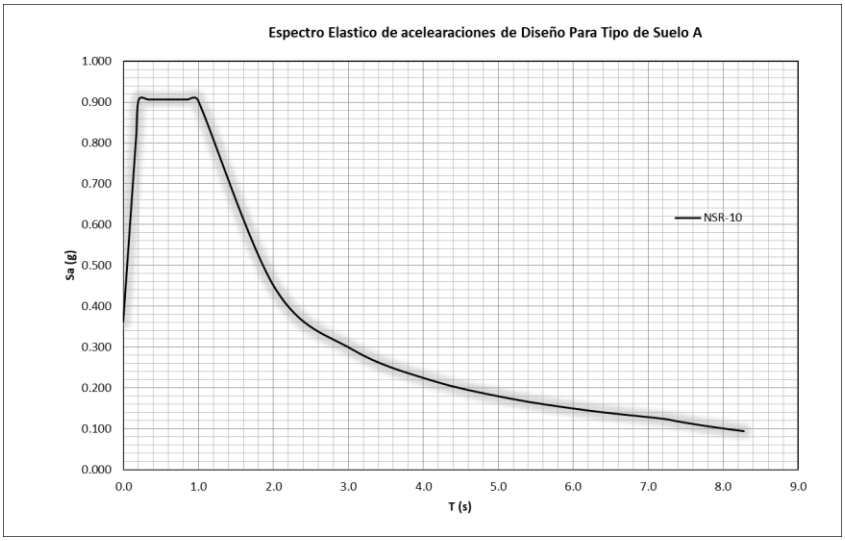
Caracterización de suelo y periodos en suelos tipo E para Cali.

Zona de Amenaza Sísmica:	Alta		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Aceleracion (Aa):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Velocidad (Av):	0.25		APÉNDICE A-4
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fa):	1.45		Tabla A.2.4-3
Coeficiente de Amplificación de Sitio (Fv):	3.00		Tabla A.2.4-4
Coeficiente de Importancia (I):	1.00		A.2.5.1
Espectro de Diseño (Sa):	Gráfico		Título A
Período de Vibración Inicial (To):	0.21	[s]	Título A
Período de Vibración Corto (Tc):	0.99	[s]	Título A
Período de Vibración Largo (T_L):	7.20	[s]	Título A

Para terminar, se muestra una figura con aceleraciones mayores al 80% del valor de la gravedad en los periodos más bajos.

Figura 9

Espectro elástico de aceleraciones de diseño en fracción de g para Cali con tipo de suelo E.



5.3 Espectros de diseño de los estudios de microzonificación sísmica

Primero, de manera organizada se seleccionarán los espectros de diseño obtenidos en los estudios de microzonificación sísmica, con el fin de compararlos con los obtenidos en de la norma NSR-10.

De acuerdo a los estudios existentes de la microzonificación sísmica de Cali, se encuentra el ya mencionado de Villarruel et al., (2005), donde se presentan espectros de diseño homologándolos a cada tipo de suelo descrito en la norma, lo cual facilita el presente análisis.

Por otro lado, Aguirre, K (2017) presenta resultados interesantes de otras zonas de la ciudad para los suelos tipo D y E, que a pesar de presentar el mismo tipo de suelo nos muestran distintos comportamientos en el espectro de aceleraciones y por lo tanto variaciones en espectro de diseño.

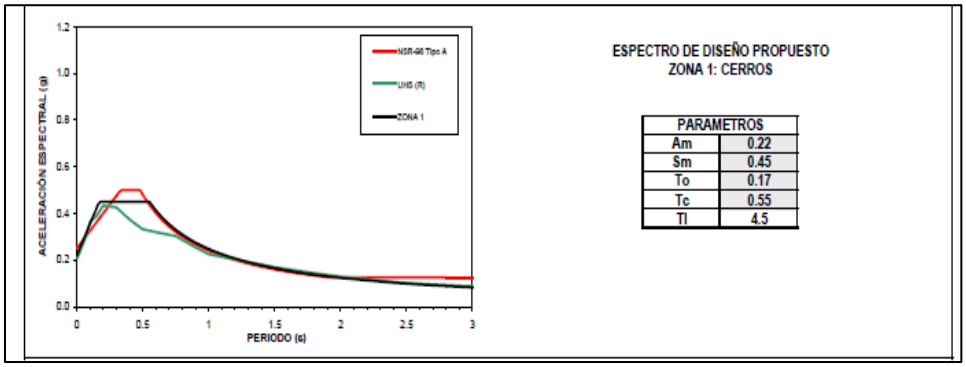
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada espectro de diseño, especificando el tipo de suelo y la micro zona a la cual está asociada. Como referencia para visualizar la evolución que han tenido los espectros a través se distintas versiones de las normas, se muestran los espectros según la norma NSR-98 que se incluían en los estudios de microzonificación estudiados.

5.3.1 Espectro de diseño para suelo tipo A

5.3.1.1. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – Micro Zona 1 Suelo: Tipo A

Figura 10

Espectro de diseño asociado a Microzona 1 Suelo: Tipo A



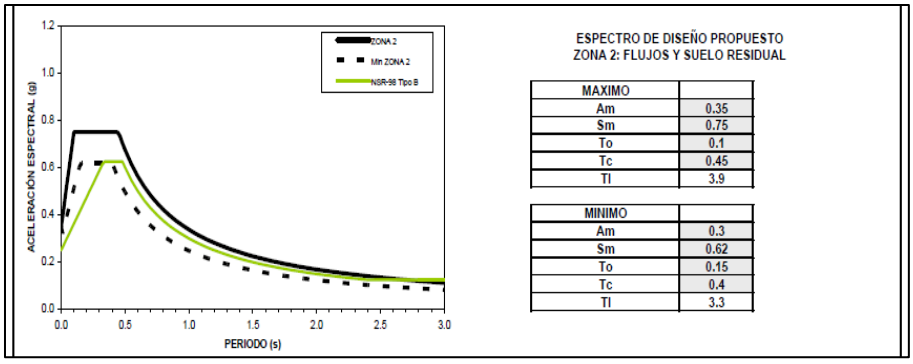
Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.2 Espectro de diseño para suelo tipo B

5.3.2.1. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 2 Suelo: TIPO B)

Figura 11

Espectro de diseño asociado a Microzona 2 Suelo: Tipo B.

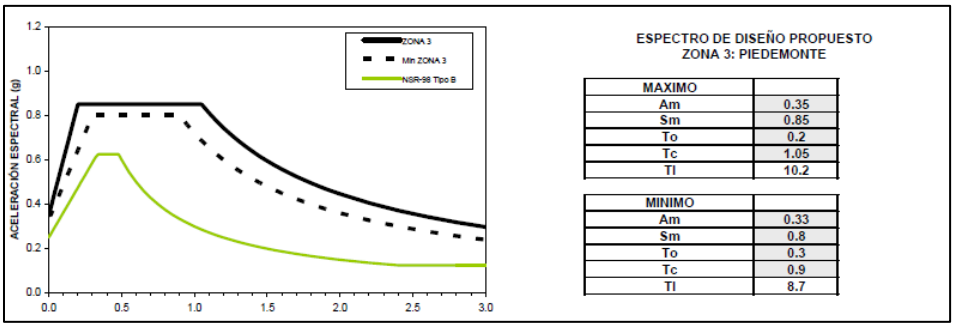


Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.2.2. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 3 TIPO B

Figura 12

Espectro de diseño asociado a Microzona 3 Suelo: Tipo B.

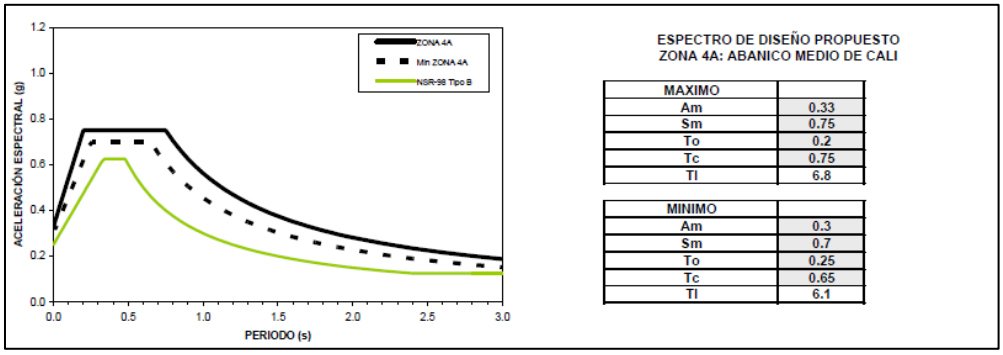


Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.2.3. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4ª Suelo: TIPO B)

Figura 13

Espectro de diseño asociado a Microzona 4A Suelo: Tipo B.

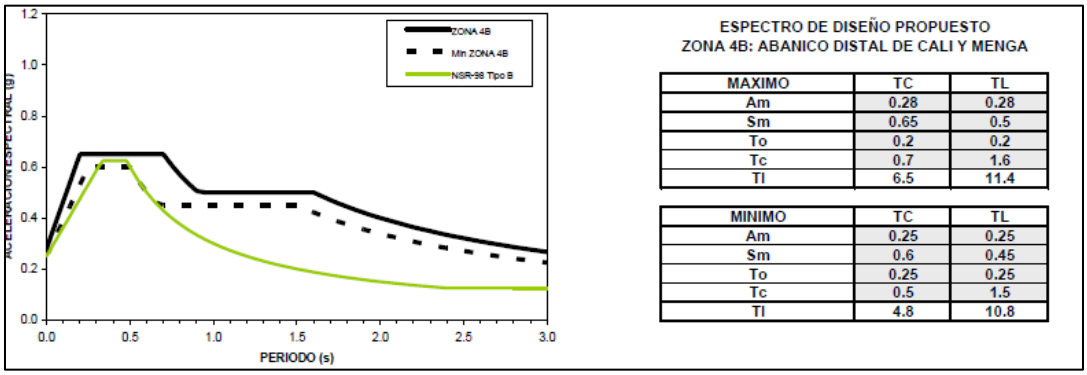


Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.2.4. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4B Suelo: TIPO B)

Figura 14

Espectro de diseño asociado a Microzona 4B Suelo: Tipo B.



ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTO
ZONA 4B: ABANICO DISTAL DE CALI Y MENGA

MAXIMO	TC	TL
Am	0.28	0.28
Sm	0.65	0.5
To	0.2	0.2
Tc	0.7	1.6
Tl	6.5	11.4

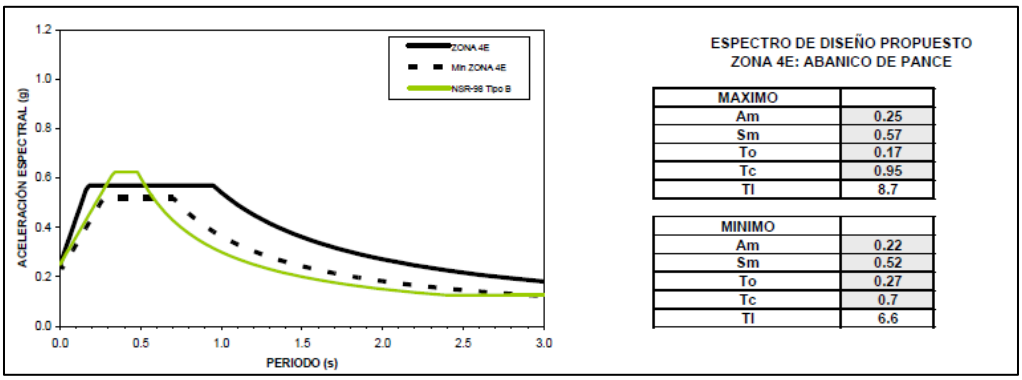
MINIMO	TC	TL
Am	0.25	0.25
Sm	0.6	0.45
To	0.25	0.25
Tc	0.5	1.5
Tl	4.8	10.8

Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.2.5. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4E Suelo: TIPO B)

Figura 15

Espectro de diseño asociado a Microzona 4E Suelo: Tipo B



ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTO
ZONA 4E: ABANICO DE PANCE

MAXIMO	
Am	0.25
Sm	0.57
To	0.17
Tc	0.95
Tl	8.7

MINIMO	
Am	0.22
Sm	0.52
To	0.27
Tc	0.7
Tl	6.6

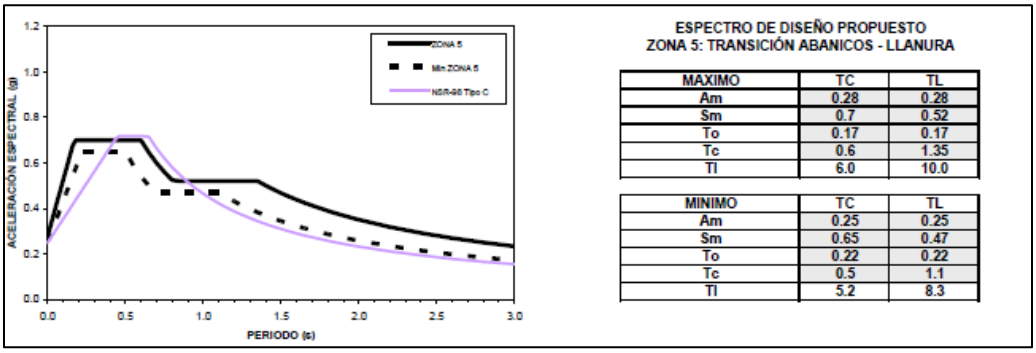
Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.3 Espectro de aceleraciones con suelo tipo C

5.3.3.1 Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 5 Suelo: TIPO C)

Figura 16

Espectro de diseño asociado a Microzona 5 Suelo: Tipo C

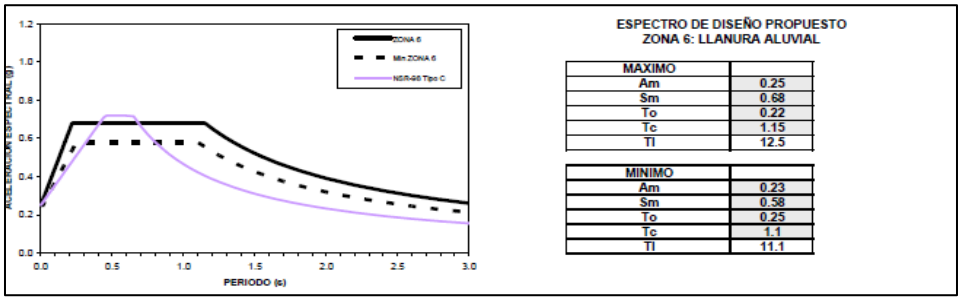


Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.3.2 Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 6 Suelo: TIPO C)

Figura 17

Espectro de diseño asociado a Microzona 6 Suelo: Tipo C



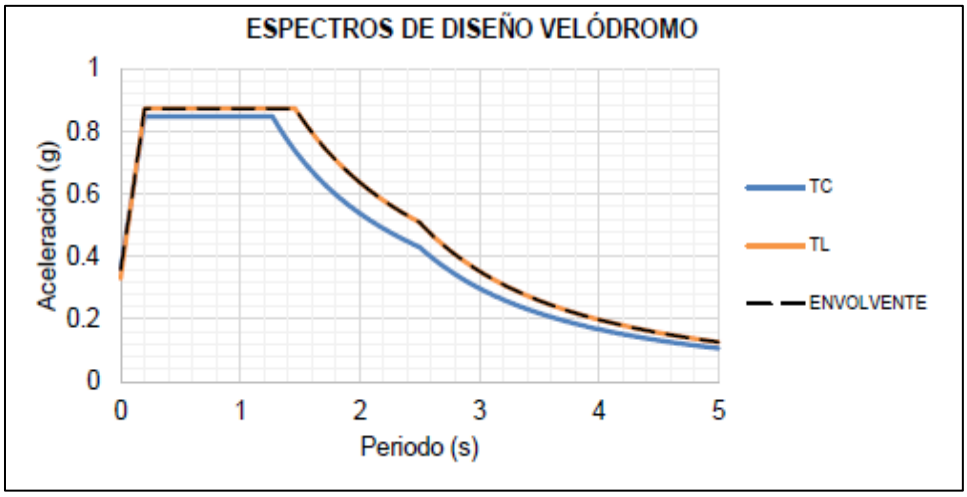
Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.4 Espectro de aceleraciones con suelo tipo D

5.3.4.1. Espectro de diseño (ESTUDIO AGUIRRE – MicroZona 4C - VELODROMO TIPO D)

Figura 18

Espectro de diseño asociado a Microzona 4C - VELODROMO Suelo: Tipo D.

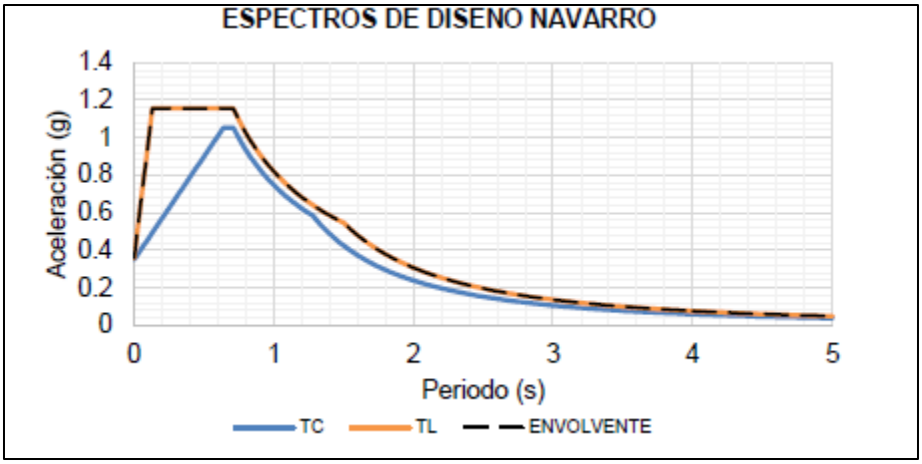


Nota. Fuente: Aguirre, (2016).

5.3.4.2. Espectro de diseño (ESTUDIO AGUIRRE – MicroZona 4C – EU NAVARRO Suelo: TIPO D)

Figura 19

Espectro de diseño asociado a Microzona 4C EUA NAVARRO Suelo: Tipo D.

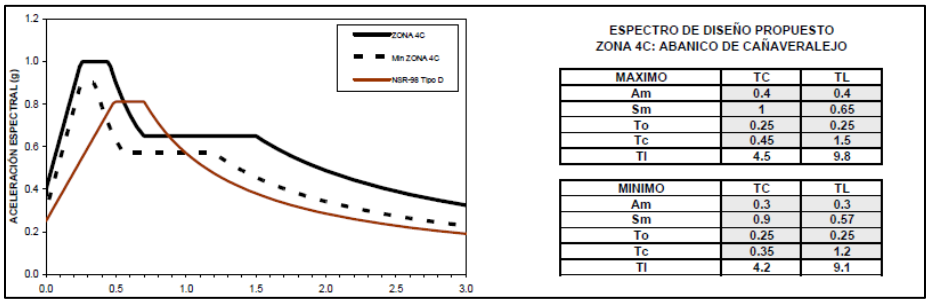


Nota. Fuente: Aguirre, (2016).

5.3.4.3. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4C Suelo: TIPO D

Figura 20

Espectro de diseño asociado a Microzona 4C Suelo: Tipo D.

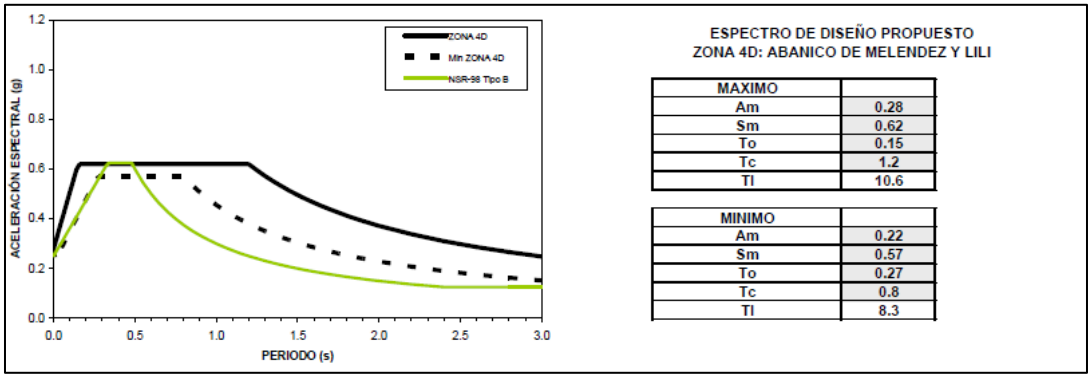


Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.4.4. Espectro de diseño (Estudio Microzonificación INGEOMINAS – MicroZona 4D Suelo: TIPO D

Figura 21

Espectro de diseño asociado a Microzona 4D Suelo: Tipo D.



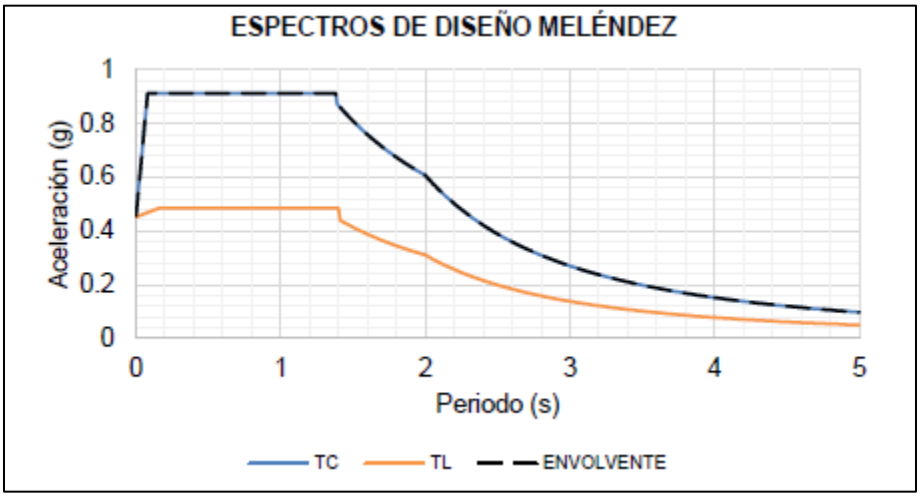
Nota. Fuente: Villarruel et al., (2005).

5.3.5 Espectro de aceleraciones con suelo tipo E

5.3.5.1. Espectro de diseño MELENDEZ MicroZona 5 TIPO E

Figura 22

Espectro de diseño asociado a Microzona 5 Melendez Suelo: Tipo E



Nota. Fuente: Aguirre, (2016).

6. Análisis de los resultados.

Teniendo en cuenta toda la información recolectada en el numeral 7, podemos resumirla de la siguiente manera por zonas:

Suelo A: Zona 1.

Suelo B: Zonas 2, 3, 4A, 4B, 4E.

Suelo C: Zonas 5, 6.

Suelo D: Zonas 4C - Velódromo, 4C - EUA Navarro, 4C - Ingeominas, 4D – Ingeominas.

Suelo E: Zona 5 – Meléndez.

Para que los valores encontrados sean de fácil comparativa con respecto al espectro de aceleraciones elaborado con las condiciones de la norma, se ilustrarán en un solo gráfico destacando el espectro de respuesta de la norma para cada tipo de suelo.

6.1 Metodología de Análisis.

El análisis cuantitativo comparando los valores de las zonas estudiadas para los tipos de suelo A, B, C, D y E con los valores establecidos por la norma NSR-10. Esta comparación nos permitirá observar las diferencias entre los datos recopilados de las zonas y los valores normativos. Esto tiene implicaciones directas sobre el diseño de edificios, en especial sobre las aceleraciones de diseño que deben ser consideradas para garantizar la seguridad estructural.

Para ello, compararemos los valores obtenidos en estudios locales contra los valores de la NSR-10 para identificar qué tan representativos son estos valores para cada tipo de suelo.

A su vez, analicemos los rangos de los periodos y aceleraciones para observar en qué medida los suelos se comportan de manera similar o diferente a los suelos representados por la NSR-10.

En las siguientes tablas se muestra la recopilación de los parámetros más importantes los cuales tenemos realizaremos la comparación y su respectiva relación con la de la normativa.

6.1.1 Tipo de suelo A Vs NSR – 10.

Para este tipo de suelo tenemos una variabilidad de magnitudes para cada uno de los parámetros como se muestra en la *tabla X*, entre ellas vemos que los valores de To, Tc y Ti son significativamente más altos en la Zona 1 comparados con la norma. Esto implica que el diseño

estructural para un edificio en esta zona deberá tener en cuenta un periodo de vibración mayor y una respuesta dinámica más prolongada.

Paralelamente, el valor de la aceleración máxima es un poco inferior al valor de la norma, lo que sugiere que la aceleración máxima esperada es menor, pero el diseño debe tomar en cuenta la longitud del periodo de vibración mayor.

Figura 23

Espectro de diseño suelo tipo A vs NSR-10

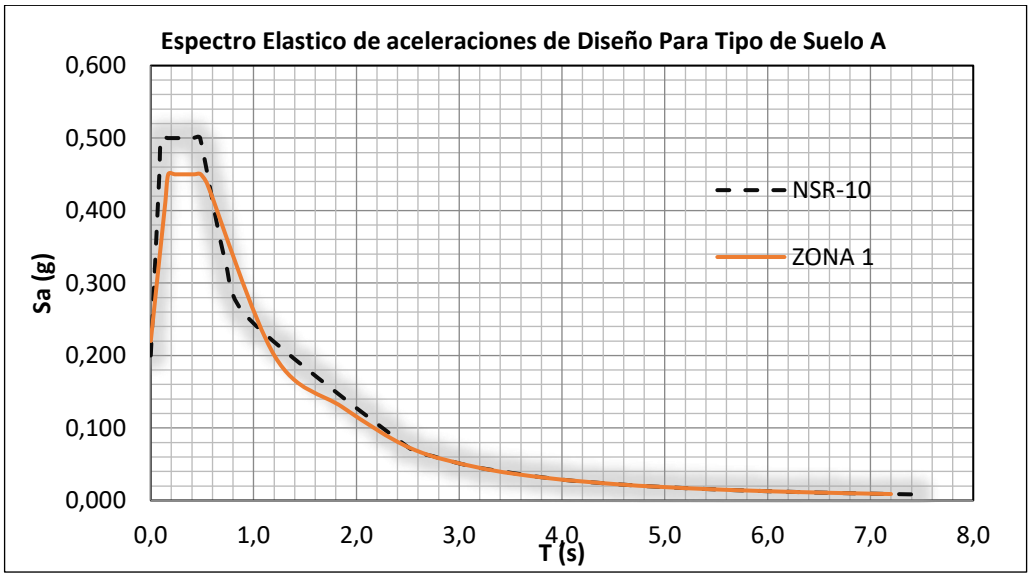


Tabla 7

Comparativa de parámetros Suelo A vs NSR-10.

Tipo de suelo A				
NSR-10		**ZONA 1**		**Comparativa**
To	0.10	To	0.17	**1.70**
Tc	0.48	Tc	0.55	**1.15**
Am	0.20	Am	0.22	**1.10**
Sm	0.50	Sm	0.45	**0.90**
Ti	1.92	Ti	4.5	**2.34**

6.1.2 Tipo de suelo B Vs NSR – 10.

Al igual que en el tipo de suelo A, existe un aumento en los parámetros de interés mostrados. Las zonas analizadas presentan valores de To y Tc significativamente mayores que los valores de la NSR-10. Las aceleraciones máximas también son más altas, lo que implica que en suelos tipo B los edificios deben ser diseñados para soportar mayores niveles de aceleración.

Para los periodos más altos se encuentra que Ti tiene una magnitud mucho más alta, lo que implica que el espectro de diseño debe considerar desplazamientos considerables en edificios altos o flexibles, lo que puede incrementar la demanda en cuanto a la ductilidad de los materiales y la resistencia a cargas sísmicas.

Figura 24

Espectro de diseño suelo tipo B vs NSR-10

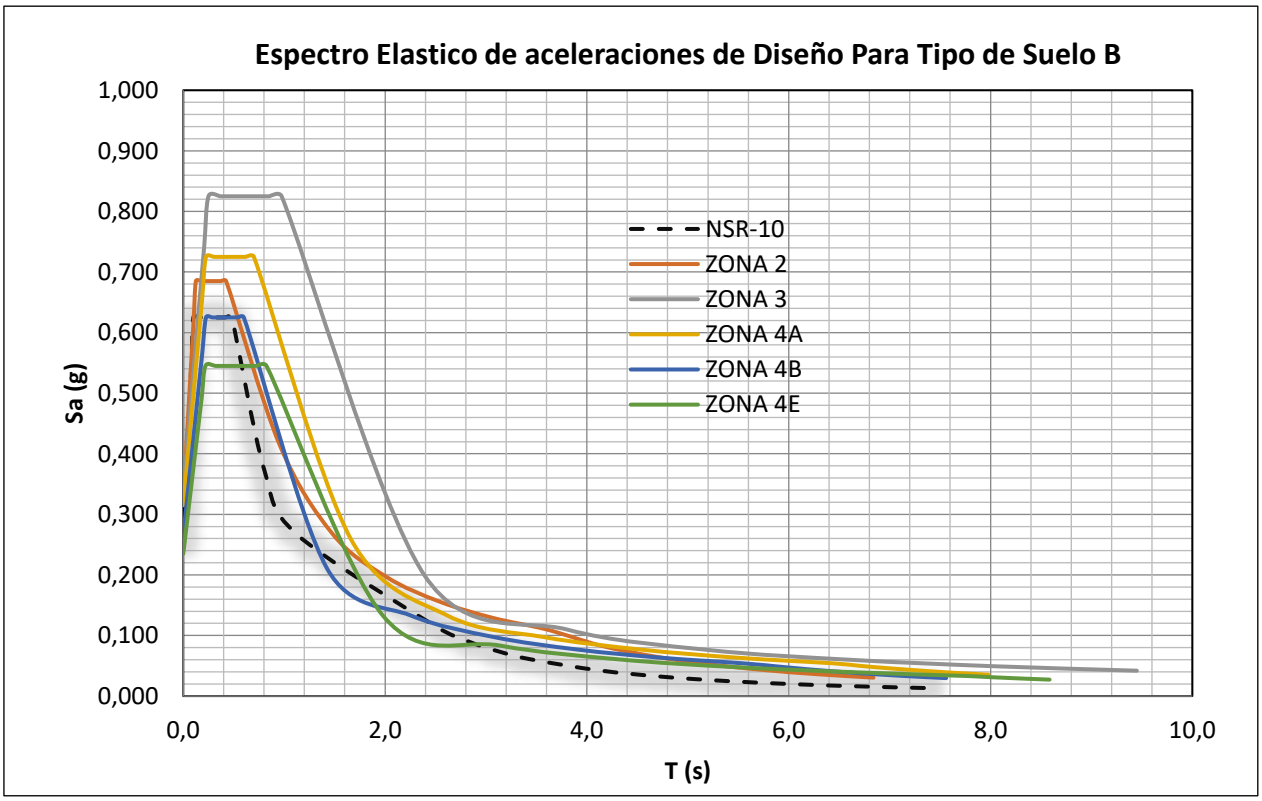


Tabla 8

Comparativa de parámetros Suelo B vs NSR-10.

Tipo de suelo B												
NSR-10		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4A		ZONA 4B		ZONA 4E		Comparativa
To	0.10	To	0.125	To	0.25	To	0.225	To	0.225	To	0.22	2.09
Tc	0.48	Tc	0.425	Tc	0.975	Tc	0.7	Tc	0.6	Tc	0.825	1.47
Am	0.25	Am	0.325	Am	0.34	Am	0.315	Am	0.265	Am	0.235	1.18
Sm	0.63	Sm	0.685	Sm	0.825	Sm	0.725	Sm	0.625	Sm	0.545	1.09
Ti	1.92	Ti	3.6	Ti	9.45	Ti	6.45	Ti	5.65	Ti	7.65	3.42

6.1.3 Tipo de suelo C vs. NSR – 10.

Para el suelo tipo C se establece que los valores de To y Ti son mucho más altos en comparación a los de la normativa. Sin embargo, estos valores no representan una mayor aceleración en las estructuras. Por su parte, el valor de Sm es más bajo que el establecido por la norma, lo que indica que las aceleraciones máximas son inferiores a lo esperado en la NSR-10. Esto podría reducir ligeramente los esfuerzos sísmicos previstos en el diseño.

Figura 25

Espectro de diseño suelo tipo C vs NSR-10

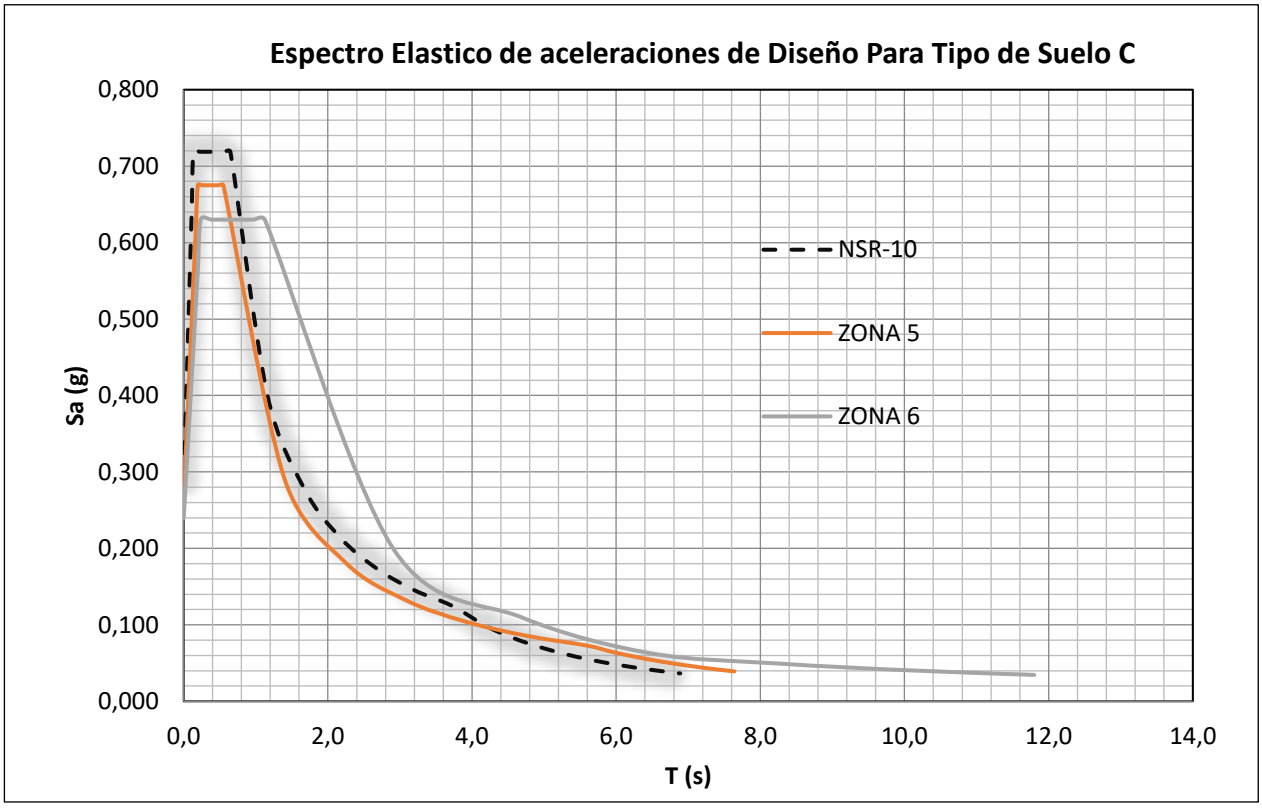


Tabla 9

Comparativa de parámetros Suelo C vs NSR-10.

Tipo de suelo C						
NSR-10		**ZONA 5**		**ZONA 6**		**Comparativa**
To	0.13	To	**0.195**	To	**0.235**	1.60
Tc	0.65	Tc	**0.55**	Tc	**1.125**	1.29
Am	0.29	Am	**0.265**	Am	**0.24**	0.88
Sm	0.72	Sm	**0.675**	Sm	**0.63**	0.91
Ti	3.72	Ti	**5.6**	Ti	**11.8**	2.34

6.1.4 Tipo de suelo D Vs NSR – 10.

En este caso particular las aceleraciones mínimas son prácticamente las mismas que en la NSR-10, lo que sugiere que los esfuerzos sísmicos que afectan a los modos de vibración secundarios se mantendrán dentro de los parámetros establecidos.

Los valores de Sm son ligeramente mayores, pero el valor de Tc si es el valor que más diferencia en el comportamiento en las diferentes estructuras con periodos entre 0.7 segundos y 1 segundos, ya que según la normativa las estructuras que están en este rango de periodo de vibración son sometidas a menores aceleraciones qué las estimadas en la microzonificación sísmica.

Figura 26

Espectros de diseño suelo tipo D vs NSR-10

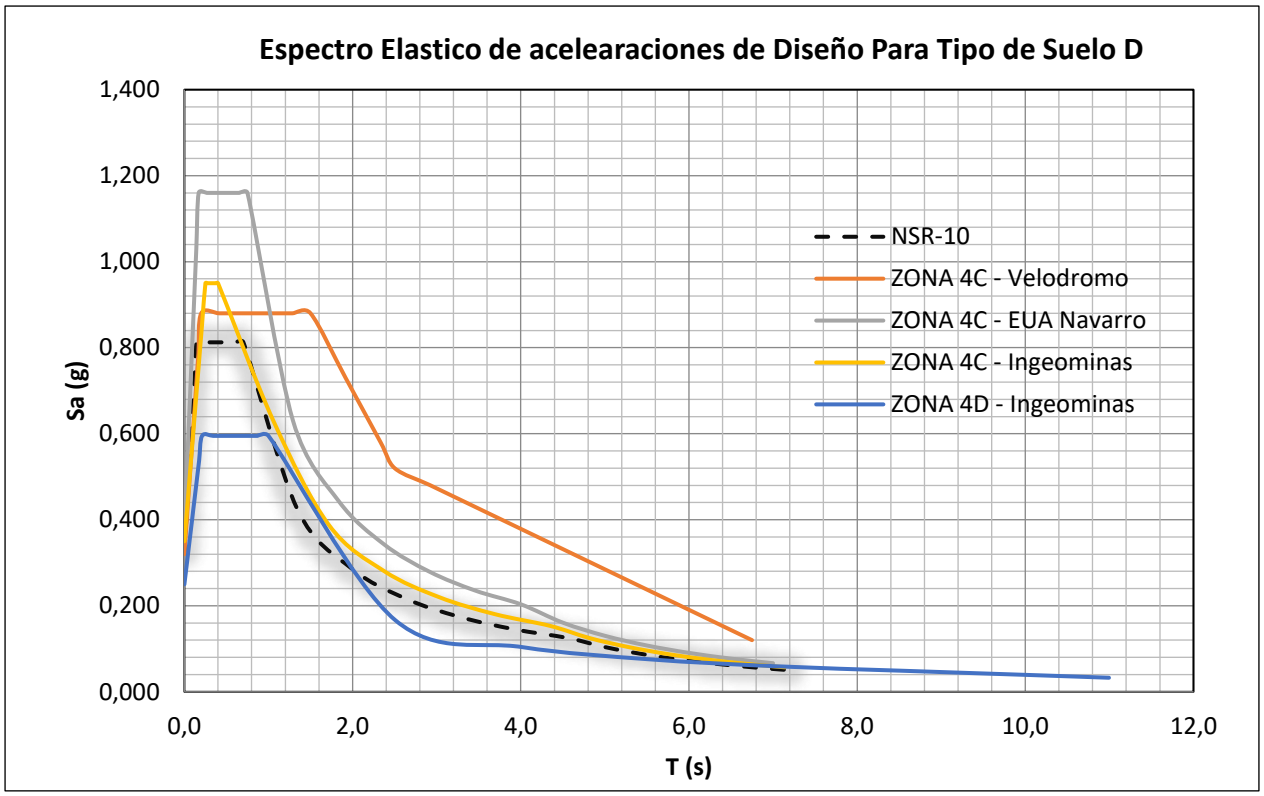


Tabla 10

Comparativa de parámetros Suelo D vs NSR-10.

Tipo de suelo D										
NSR-10		ZONA 4C - Velo		ZONA 4C - EUA		ZONA 4C - Inge		ZONA 4D - Inge		Comparativa
To	0.15	To	**0.2**	To	**0.17**	To	**0.25**	To	**0.21**	1.42
Tc	0.70	Tc	**1.5**	Tc	**0.75**	Tc	**0.4**	Tc	**1**	1.30
Am	0.33	Am	**0.32**	Am	**0.38**	Am	**0.35**	Am	**0.25**	1.00
Sm	0.81	Sm	**0.88**	Sm	**1.16**	Sm	**0.95**	Sm	**0.595**	1.10
Ti	4.56	Ti	**4**	Ti	**4**	Ti	**4.35**	Ti	**9.45**	1.20

6.1.5 Tipo de suelo E Vs NSR – 10.

Para terminar, en el tipo de suelo E que solo se encontró un espectro de diseño con esas características, se evidencia que las aceleraciones máximas son muy cercanas a las normativas, y Ti es mucho menor. Por lo tanto, no se esperan grandes desviaciones en el comportamiento estructural esperado.

El valor de Tc en la Zona 5 es considerablemente mayor que el valor normativo, lo que implica que el periodo de vibración donde la aceleración constante afecta al diseño es mayor. Esto podría aumentar la demanda sísmica sobre la estructura en la fase de aceleración constante en periodos mayores a los esperados por la NSR-10.

Figura 27

Espectros de diseño suelo tipo E vs NSR-10.

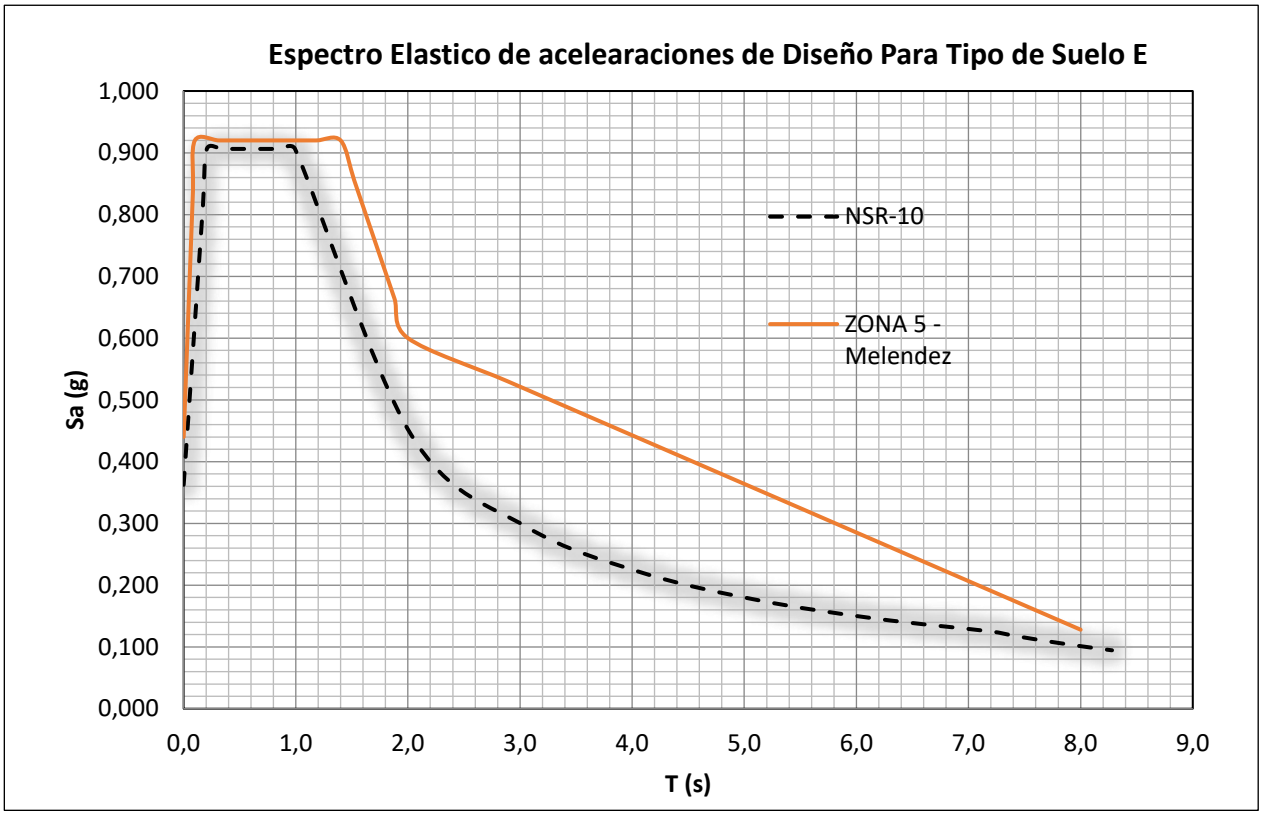


Tabla 11

Comparativa de parámetros Suelo E vs NSR-10.

Tipo de suelo E				
NSR-10		ZONA 5 - Mele		Comparativa
To	0.21	To	**0.1**	**0.48**
Tc	0.99	Tc	**1.4**	**1.41**
Am	0.36	Am	**0.44**	**1.21**
Sm	0.91	Sm	**0.92**	**1.02**
Ti	7.20	Ti	**4**	**0.56**

6.2 Consideraciones fundamentales.

Hay muchas variaciones que pueden afectar en la medición en cada uno de los estudios utilizados en este documento para compararlo con los de la normativa colombiana. El tipo de estudio de suelo implementado, las condiciones del ambiente con las que se realizaron los estudios, la calibración de los equipos y la transformación entre la caracterización del tipo de suelo hasta la determinación del espectro de aceleraciones. Por tal motivo, se dará algunas consideraciones que se tienen en cuenta para explicar la variabilidad de estos espectros en comparación a la de la NSR-10.

6.2.1 Variabilidad Local de las Condiciones del Suelo.

Los resultados evidencian que las condiciones del suelo varían significativamente dentro de la ciudad, lo cual genera diferentes espectros de diseño para cada zona. Este fenómeno se refleja tanto en los periodos de vibración (To, Tc, Ti) como en las aceleraciones máximas (Sm) y mínimas (Am) que experimentan las estructuras. Dado que cada tipo de suelo responde de manera distinta a las cargas sísmicas, es esencial considerar estas diferencias en el proceso de diseño estructural, ya que ignorarlas podría comprometer la seguridad y estabilidad de los edificios en diversas áreas urbanas.

6.2.2 Influencia del Tamaño de la Muestra.

La muestra de datos en cada zona influye directamente en los resultados estadísticos obtenidos, ya que el tamaño y la dispersión de la muestra pueden aumentar la variabilidad en los resultados. En este sentido, cuanto mayor sea la cantidad de datos recopilados en una zona específica, más representativos y precisos serán los parámetros obtenidos, lo que permitirá un análisis más robusto y ajustado a las condiciones reales. Por el contrario, cuando la muestra es pequeña o limitada (como en el suelo tipo A y tipo E), los resultados podrían no reflejar adecuadamente la complejidad de las condiciones sísmicas locales. Esto puede resultar en estimaciones que no representen fielmente las variaciones geotécnicas y sísmicas presentes en el suelo, lo que influye directamente en el diseño estructural y la toma de decisiones para las edificaciones en dichas zonas.

En aquellas zonas donde se cuenta con menos puntos de observación, como es el caso de algunas zonas tipo D y tipo E, es especialmente importante interpretar los resultados con cautela. La limitada cantidad de datos podría llevar a que las características del suelo sean erróneas, lo que implica que los parámetros de diseño sísmico basados en estos datos podrían ser incompletos. Por

lo tanto, es recomendable considerar la posibilidad de ampliar la recolección de datos en estas zonas para obtener una imagen más precisa de las condiciones locales si se va a usar la microzonificación sísmica de la ciudad, lo que resultaría en diseños estructurales más seguros y adaptados a la realidad geotécnica del área de interés.

6.2.3 Desviación de los Resultados con Respecto a la NSR-10.

Las diferencias significativas en los periodos de vibración y en las aceleraciones, al compararse con los valores normativos de la NSR-10, indican claramente que los parámetros establecidos por la norma pueden no ser adecuados para todas las áreas de la ciudad. Estas discrepancias sugieren que las normas sísmicas actuales, si se aplican de manera uniforme sin considerar las particularidades del suelo en cada zona, podrían no ofrecer la protección adecuada frente a eventos sísmicos. Es fundamental que los ingenieros y diseñadores estructurales tengan en cuenta estas variaciones locales en las condiciones del suelo para asegurar la seguridad y durabilidad de las construcciones.

Un ejemplo destacado de este fenómeno se observa en el suelo tipo B, donde los valores de Ti son, en promedio, 5 veces superiores a los indicados por la norma NSR-10. Esto implica que los diseños basados exclusivamente en dicha norma podrían subestimar el impacto de los movimientos de largo periodo, lo que podría traducirse en riesgos estructurales más elevados. Sin embargo, los valores de Tc y de Sm tiene una dispersión mucho menor en cada uno de los tipos de suelos, lo que representa que los parámetros fundamentales en los espectros de aceleraciones no sean mucho mayores o menores que los esperados.

6.2.4 Influencias Geológicas y Topográficas.

Las zonas analizadas pueden estar influenciadas por factores geológicos y topográficos específicos que impactan directamente en las características del movimiento sísmico. Por ejemplo, áreas ubicadas en suelos blandos o cercanas a cuerpos de agua tienden a amplificar ciertas frecuencias de vibración, lo que podría explicar la variabilidad observada en algunos de los espectros sísmicos. Estas condiciones particulares del terreno hacen que la respuesta de las estructuras en estas áreas sea distinta a la esperada según los parámetros estándar, lo que subraya la necesidad de realizar un análisis detallado del contexto geológico antes de aplicar los criterios normativos generales.

Adicionalmente, las estructuras construidas en zonas cercanas a pendientes o montañas pueden experimentar efectos sísmicos específicos que no siempre están completamente reflejados en la NSR-10, pero que sí se manifiestan en los espectros locales de vibración. Estos efectos adicionales, como el incremento de las aceleraciones o la concentración de tensiones, son aspectos cruciales que planificadores urbanos y diseñadores de edificaciones deben considerar. La comprensión y adaptación a estas particularidades del terreno es esencial para garantizar que los diseños estructurales respondan adecuadamente a las condiciones reales y minimicen el riesgo de daños durante un evento sísmico.

7. Recomendaciones.

En el contexto del diseño estructural sismorresistente, los estudios de microzonificación revelan que los valores de los parámetros sísmicos, como T_c (el periodo de transición entre la zona de aceleración constante y la parte descendente del espectro), varían significativamente entre las zonas analizadas y los valores normativos de la NSR-10. Esto tiene implicaciones muy grandes porque una diferencia de 0.5 segundos afecta directamente en la aceleración que se le debería aplicar en este caso a un grupo de edificaciones con 5 niveles de diferencia entre unas y otras. Por tal motivo, es de considerar ciertas recomendaciones para un correcto uso de los estudios propios de microzonificación sísmica de una microzona.

7.1 Revisión y Ajuste del Espectro de Diseño por Microzonas.

Revisar los espectros de diseño en función de los resultados obtenidos para cada microzona específica es fundamental. No se puede aplicar un espectro uniforme a toda la ciudad si hay áreas que presentan periodos de vibración y aceleraciones que varían tanto con respecto a los valores de la NSR-10. En zonas donde los valores de Tc son mayores que los de la NSR-10, se recomienda ampliar el espectro de diseño para incluir edificios de más pisos de los previstos inicialmente.

7.2 Considerar el Aumento de las Aceleraciones de Diseño.

En los casos donde las aceleraciones máximas y los periodos de vibración son mayores a los de la NSR-10, se recomienda aumentar las demandas sísmicas en el diseño de los edificios para que el cálculo de las fuerzas horizontales sean lo más fiel al comportamiento real de la estructura. Cabe recalcar que los valores de la normativa son máximos o mínimos que no se pueden sobrepasar.

7.3 Monitoreo y Validación Continua de los Espectros de Diseño.

Dado que el tamaño de la muestra influye en los resultados, se recomienda la ampliación de las campañas de recolección de datos para mejorar la precisión de los espectros de diseño en cada zona. Un monitoreo continuo permitirá ajustar las recomendaciones de diseño sísmico con mayor precisión, evitando sobreestimar o subestimar las demandas de diseño en futuras

construcciones. Además, este monitoreo ayudará a validar los Tc locales, permitiendo a los diseñadores ajustar los espectros según las condiciones reales de cada área.

7.4 Revisión de la Normativa.

Hay muchos países en los que la normativa de construcción es más una regulación o una guía para realizar un gran abanico de tipologías estructurales. Pero en Colombia es una ley, lo que obliga a regir sus parámetros casi en su totalidad salvo si se demuestra un estudio detallado de ciertas características de diseño de interés que no estén de la mano con la norma y su respectiva justificación. En este rubro es donde entra la microzonificación sísmica de las ciudades, para representar fielmente ciertas condiciones que la norma pasa por alto o que la generaliza.

Los efectos locales observados en los espectros de las distintas microzonas pueden garantizar que los parámetros normativos reflejen más adecuadamente las condiciones locales de suelos y mejoren la seguridad estructural de los edificios nuevos y existentes.

8. Conclusiones.

Los resultados del análisis evidencian la necesidad de ajustar los diseños estructurales para tener en cuenta los periodos de vibración más largos y los valores más altos de Tc en varios tipos de suelo. En particular, las diferentes diferencias significativas entre los valores estipulados por la NSR-10 y los obtenidos localmente sugiere que las aceleraciones máximas podrían afectar grupos de estructuras con periodos cercanos, lo que recomienda optar por estrategias de diseño más conservadoras, especialmente en zonas críticas. Esto implica que los edificios podrían necesitar incluir pisos adicionales en los análisis y diseñarse para soportar mayores desplazamientos como método de prevención.

En cuanto a la variabilidad observada en Ti, este parámetro es el más disperso en todos los tipos de suelo, lo que indica diferencias significativas en los periodos largos de vibración entre las zonas. Esto tiene implicaciones directas para estructuras altas y flexibles, pero como la convergencia de las aceleraciones en este rubro es muy cercano, las fuerzas horizontales son parecidas.

También, se observa las variaciones en los valores de aceleración máxima y mínima también son importantes, ya que las fuerzas sísmicas aplicadas a los edificios en suelos tipo B y D pueden ser superiores a las calculadas según la NSR-10. Esto resalta la importancia de ajustar los diseños estructurales para compensar estas diferencias, asegurando que los edificios puedan soportar los mayores niveles de energía sísmica observados en los estudios locales. Por su parte, los otros tipos de suelo que muestran aceleraciones menores, se debería trabajar con la normativa siempre y cuando no se tenga un estudio local lo debidamente detallado para justificar la reducción de las aceleraciones.

Para la ciudad de Cali se puede concluir que los valores de aceleraciones suministrados por la norma NSR-10 son adecuados dentro de márgenes razonables, para ningún tipo de suelo se sobrepasó en promedio el 10% en con comparación a la misma. Contrariamente, los valores de T_c en su mayoría son mayores a los de la norma como se mencionó anteriormente, lo que sugiere que se use por lo menos un ajuste a este parámetro de 0.5 segundos más con respecto a los usados por la NSR-10 para evitar cualquier tipo de incertidumbre en este parámetro.

Finalmente, la comparación entre los resultados locales y los valores normativos deja claro que el diseño sísmico en las zonas estudiadas debe adaptarse a la realidad geológica específica de

cada área. Esto implica incorporar refuerzos estructurales adicionales en las plantas superiores, sistemas de control de vibraciones y aislamiento, y ajustes en los espectros de diseño que reflejen los periodos más largos identificados en la microzonificación. La colaboración entre ingenieros y planificadores urbanos será clave para aplicar estos resultados y garantizar la seguridad de las estructuras frente a las demandas sísmicas reales.

9. Referencias.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

García Reyes, L. E. (1998). Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad de los Andes.

Universidad de los Andes (2020). Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá: Informe final.

Universidad Nacional de Colombia (2010). Microzonificación sísmica de Bogotá: Informe final.

Aguirre, K (2016). Evaluación de la profundidad del estrato de suelo en su respuesta sísmica. Cali, Colombia. Universidad del Valle.

Villarruel Toro, J., Caicedo Hernández, I. F., Núñez Tello, A., Calvache Velasco, M. L., & Alvarado Florez, C. E. (2005). Análisis y modelación de la respuesta sísmica local del subsuelo en Santiago de Cali: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali (Informe No. 5-2). Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA).

Pardo, L., Gómez, J., & Quintero, H. (2017). Microzonificación sísmica detallada de la ciudad de Cali. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica (ISIS).

Servicio Geológico Colombiano. (2013). Microzonificación sísmica de Cali: Evaluación geológica y geotécnica. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

Alcaldía de Santiago de Cali, & Instituto de Investigación y Prevención Sísmica (2019). Microzonificación sísmica de Santiago de Cali: Proyecto de resiliencia urbana. Cali, Colombia: Alcaldía de Santiago de Cali.

Chopra, A. K. (2012). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Pearson.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1982). Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute.

Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). Dynamics of Structures. McGraw-Hill.