



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**CAMBIOS EN LA RESPUESTA SÍSMICA PARA UN SITIO
EN LA ZONA ORIENTE DE LA CDMX**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

P R E S E N T A :

FERNANDO LÓPEZ ORTIZ

DIRECTOR DE TESINA: DR. HÉCTOR RAÚL AGUILAR BECERRIL

MÉXICO, D.F.

ENERO 2021

A Irma, mi madre, refugio incondicional.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por formarme como persona y como profesional.

Al Programa Único de Especializaciones en Ingeniería, por permitirme profundizar en el sorprendente campo de la geotecnia.

Al CONACYT por el apoyo otorgado al programa.

Contenido

Introducción	6
Objetivo	7
Alcances	7
1. Propiedades del suelo en la CDMX	8
1.1 Geología	8
1.2 Zonificación	13
1.3 Mapas de periodos (NTC-2004)	15
2. Efectos del hundimiento regional en la CDMX	16
2.1 Consolidación	16
2.2 Reducción del espesor compresible	18
3. Cambio en las propiedades dinámicas del suelo por consolidación	19
3.1 Cambio en el espesor compresible	19
3.2 Cambio en V_s	26
3.3 Cambios en el amortiguamiento	28
3.4 Cambios en el periodo de sitio	29
3.5 Cambios en la respuesta sísmica	32
4. Sitios de estudio	35
4.1 Hundimiento regional	36
4.2 Efectos en el periodo	40
4.3 Efectos en la respuesta sísmica y comparación con la normatividad vigente	44
5. Conclusiones	51
Referencias	

Lista de figuras

Figura 1.1.1. Geología y geomorfología de la cuenca del Valle de México.

Figura 1.1.2. Morfología de la cuenca del Valle de México.

Figura 1.1.3. Modelo de elevación digital.

Figura 1.1.4. Columnas estratigráficas de los de los pozos profundos perforados en la Cuenca de México.

Figura 1.1.5. Secciones geológicas de la cuenca.

Figura 1.2.1. Zonificación Geotécnica NTC 2017.

Figura 1.2.2. Zonificación Geotécnica.

Figura 1.3.1. Mapa de isoperiodos.

Figura 2.1.1. Zonas de mayor abatimiento del nivel estático (msnm) (2016) y en dirección de flujo subterráneo.

Figura 3.1.1. Ubicación de bancos superficiales.

Figura 3.1.2. Curvas de igual profundidad al basamento local del Valle de México.

Figura 3.1.3. Evolución nivel estático período 1996-2002.

Figura 3.1.4. Evolución del hundimiento en varios monumentos del centro histórico.

Figura 3.1.5. Evolución del hundimiento en diferentes puntos de la Ciudad de México y su zona conurbada. 1984-2002.

Figura 3.1.6. Hundimientos promedio anual en período. 1992 - 2002.

Figura 3.1.7. Correlación entre el espesor compresible y la velocidad de hundimiento.

Figura 3.1.8. Cambio del espesor compresible de los suelos del Valle de México

Figura 3.1.9. Comparación de espectros para el mismo sitio

Figura 3.2.1. Esquema de la trayectoria de ondas P (A) y ondas S (B)

Figura 3.2.2. Esquema de la trayectoria de ondas Love (C) y ondas Rayleigh (D)

Figura 3.2.3. Sismógrafo

Figura 3.2.4. Sismograma

Figura 3.3.1. Sistema masa-resorte

Figura 3.4.1. Espectros de Fourier en el sitio CAO para sismos en 1985 (___) y en 2003 (----)

Figura 3.4.2. Periodo fundamental de vibración de un cuerpo.

Figura 3.4.3. Variación del periodo con respecto del tiempo.

Figura 3.5.1. Espectros de respuesta.

Figura 3.5.2. Espectro de diseño.

Figura 3.5.3. Parámetros de un espectro de diseño.

Figura 4.1. Sitio de estudio

Figura 4.2. Bancos de nivel instalados alrededor del sitio de estudio

Figura 4.1.1. Evolución del hundimiento en el Valle de México.

Figura 4.1.2 Evolución del hundimiento en zona aledaña al Palacio de los deportes. Banco 138 - B(S02E03)04

Figura 4.1.3. Función racional.

Tabla 4.1.1. Comparación del promedio de velocidades de hundimiento (1983-2016).

Figura 4.1.4. Hundimiento medido promedio en la zona (1983-2016).

Tabla 4.2.1. Comparación de periodos de vibración.

Figura 4.2.1. Comparación de periodos de vibración.

Figura 4.2.2. Ubicación de puntos explorados.

Tabla 4.2.2. Coordenadas de puntos explorados.

Figura 4.2.3. Cocientes espectrales obtenidos de los registros de vibración ambiental.

Tabla 4.2.3. Comparación de los distintos periodos de sitio.

Tabla 4.2.4. Comparación de los periodos con respecto al obtenido mediante vibración ambiental

Figura 4.3.1. Placas tectónicas que interactúan en la Republica Mexicana.

Tabla 4.3.1. Comparación de los coeficientes sísmicos.

Figura 4.3.2. Comparación de los coeficientes sísmicos.

Tabla 4.3.2. Comparación de los coeficientes sísmicos.

Figura 4.3.3. Acelerogramas por sismo interplaca en la superficie del terreno (2020).

Figura 4.3.4. Acelerogramas por sismo interplaca en la superficie del terreno (2090).

Figura 4.3.5. Espectros de respuesta y de diseño (2020).

Figura 4.3.6. Espectros de respuesta y de diseño (2070).

Figura 4.3.7. Espectros de respuesta y de diseño (2090).

Figura 4.3.8. Comparativa entre los espectros de respuesta y de diseño para los años 2020, 2070 y 2090.

Figura 4.3.9. Comparativa entre los espectros de diseño transparentes para los años 2020, 2070 y 2090

Tabla 4.3.3. Parámetros de diseño transparentes para los años 2020, 2070 y 2090

Introducción

La continua actividad sísmica presente en nuestra ciudad ha sido motivo de múltiples estudios provenientes de los más diversos campos, todos encaminados a comprender de mejor forma cómo interactúan las energías sísmicas con el suelo y este con las estructuras. La historia reciente nos trae a la mente múltiples catástrofes que nos han enseñado de la peor forma posible lo devastador que puede ser la fuerza de la naturaleza, a partir de aquellos eventos tan desafortunados, el gobierno de la Ciudad de México se ha apoyado en universidades, investigadores, profesionales y otros tantos actores para crear y modificar la normativa vigente en materia de construcción la cual tiene como principal objetivo la constante mejora continua y nunca tratar de ser un documento definitivo de cómo se debe construir sino mas bien un valioso apoyo para aquellos interesados.

La basta complejidad que representa el entendimiento del subsuelo de la ciudad de México nos sigue poniendo continuamente a prueba con temas que anteriormente habían pasado un tanto desapercibidos y que hoy en día resultan esenciales de comprender y resolver de manera adecuada para evitar catástrofes como aquellas que tanto afectaron a nuestra sociedad.

Uno de estos problemas es sin lugar a duda el hundimiento que nuestra ciudad sufre constantemente en gran parte de la urbe. La zona que actualmente comprende la CDMX ha presentado problemas para los locales desde sus inicios, y es que tratar de construir algo sobre un lago resulta apenas concebible, esto al parecer no importó mucho a los antiguos habitantes del lago al decidir construir su ciudad en la cuenca lacustre del Valle de México, decisión que tuvo un gran impacto con el pasar de los años y que ha suscitado una enorme problemática para la ingeniería mexicana la cual ha tenido que aprender a adaptarse a las situaciones que conlleva vivir en una zona tan complicada como esta.

Dentro de los principales problemas actuales para la ingeniería geotécnica se encuentran dos considerados de alto impacto y que requieren especial atención y cuidado al tratar con ellos, el primero concierne a la ubicación geográfica de la Ciudad de México, la cual se ubica en una zona de alta actividad sísmica y que continuamente se ve afectada por los mismos, de los cuales tres han sido de considerable impacto en la historia reciente de nuestra ciudad, el primero de ellos registrado en 1957, seguido del trágico ocurrido en 1985 y el más reciente en el 2017, cada uno de los cuales ha influido en las reformas y adecuaciones hechas a los reglamentos de construcción, todos encaminados hacia un mejor comportamiento de las construcciones edificadas sobre este complicado suelo, que es el otro tema de interés del presente trabajo, y es que a la par del crecimiento exponencial de la población en el Valle de México se han ido acrecentando los problemas relacionados al subsuelo, pues estos han registrado cambios en algunas propiedades que antiguamente parecían inalterables o difíciles de cambiar. Los cambios mencionados se discuten de manera más detallada a lo largo de este texto, así como las causas, orígenes y consecuencias producto de dichos cambios, se plantean propuestas para solucionar y/o mitigar estos problemas.

Objetivo

El presente trabajo pretende evaluar los cambios en la respuesta sísmica del estrato compresible de un depósito a través de los años en un sitio cercano al palacio de los deportes.

Alcances

Se tomará en cuenta un sitio específico de la CDMX, del cual se tienen registros de consolidación en el espesor compresible, así como el comportamiento de este frente a dichos cambios. La investigación abarca la relación entre el periodo del sitio y como influirá en las estructuras edificadas sobre dicho lugar.

1. Propiedades dinámicas del suelo en la CDMX

1.1 Geología

La cuenca de México está ubicada en la parte centro-oriental de la faja volcánica trans-mexicana esta considerado como un arco volcánico producido por la subducción de la Placa de Cocos y Rivera por debajo de la placa Norteamericana formado durante el Plioceno-Holoceno. Está considerada como una entidad geomorfológica endorreica.

La cuenca de México es el resultado de la alta actividad volcánica y tectónica propia de la zona, por lo cual gran parte de los materiales depositados en la misma son de origen volcánico. Entre los principales materiales depositados en la cuenca se encuentran los depósitos lacustres en la parte superior acompañados de derrames de lava y materiales epiclásticos, en tanto que la parte inferior esta dominada por depositos piroclásticos.

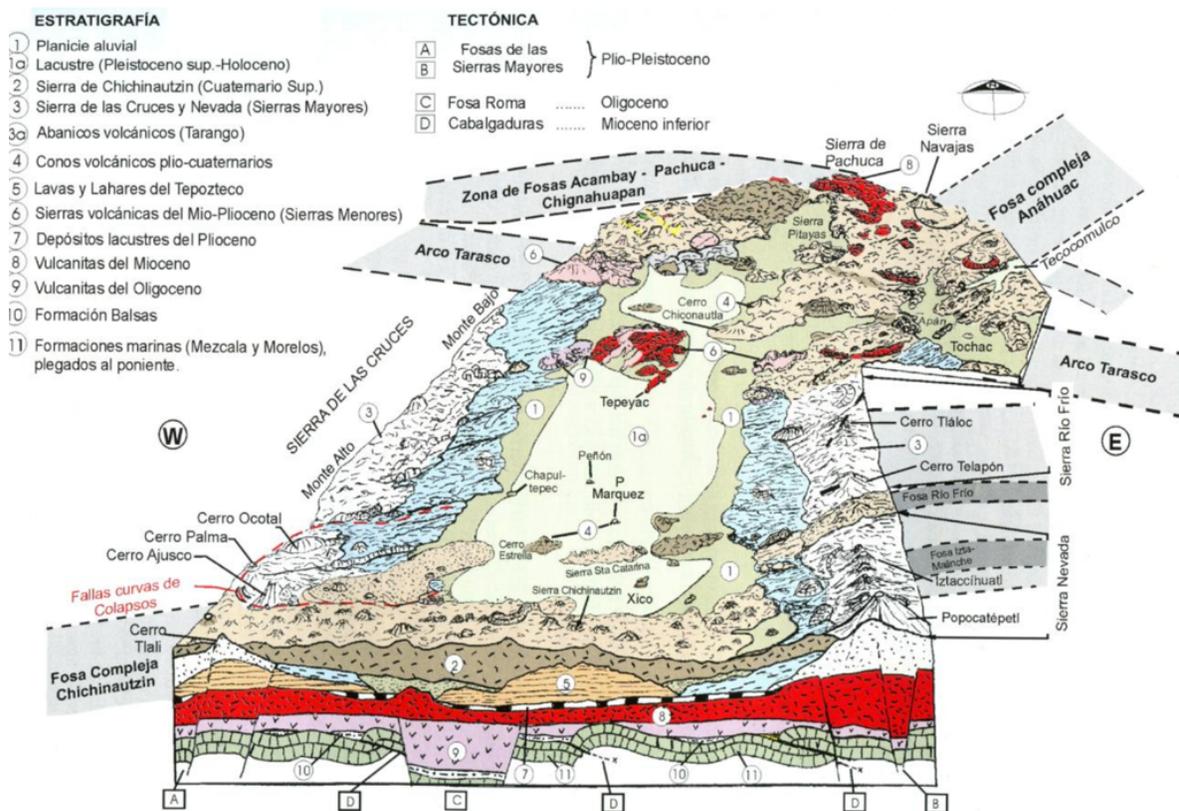


Figura 1.1.1. Geología y geomorfología de la cuenca del Valle de México.

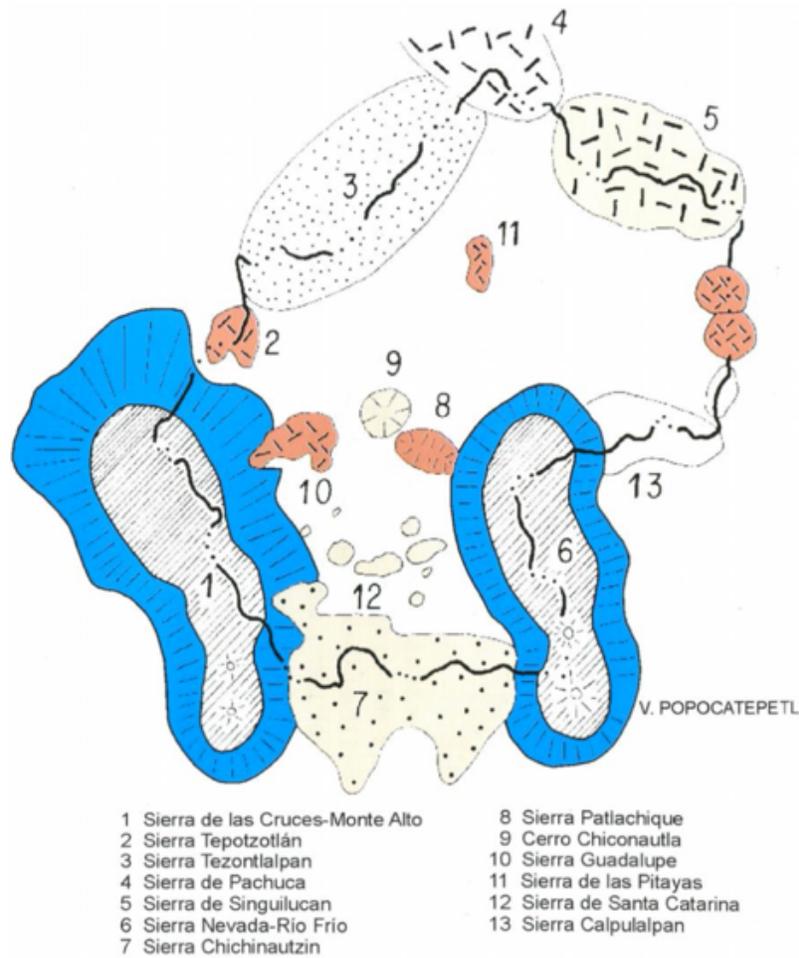


Figura 1.1.2. Morfología de la cuenca del Valle de México.

EL Valle de México está localizado entre los paralelos 19° 00' y 20° 12'N y los meridianos 98°10' y 99°33 W, esta limitada al norte por las montañas de Tezontlalpan, Tepozotlan y Pachuca, en el este por las llanuras de Apan y la Sierra Nevada, por las montañas de Chichinautzin y Ajusco y al oeste por las sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, su superficie aproximada es de unos 9,600 km² de los cuales un tercio es prácticamente plano y presenta una altura promedio de 2240 msnm (Auvinet & Juárez, 2011).

La zona urbana de la cuenca de México representa apenas el 16% del área total y posee aproximadamente 1,500 km², se encuentra limitada por diversas sierras, la Sierra de Guadalupe en el norte, en el este por la Sierra Nevada y finalmente la Sierra de Chichinautzin al sur.

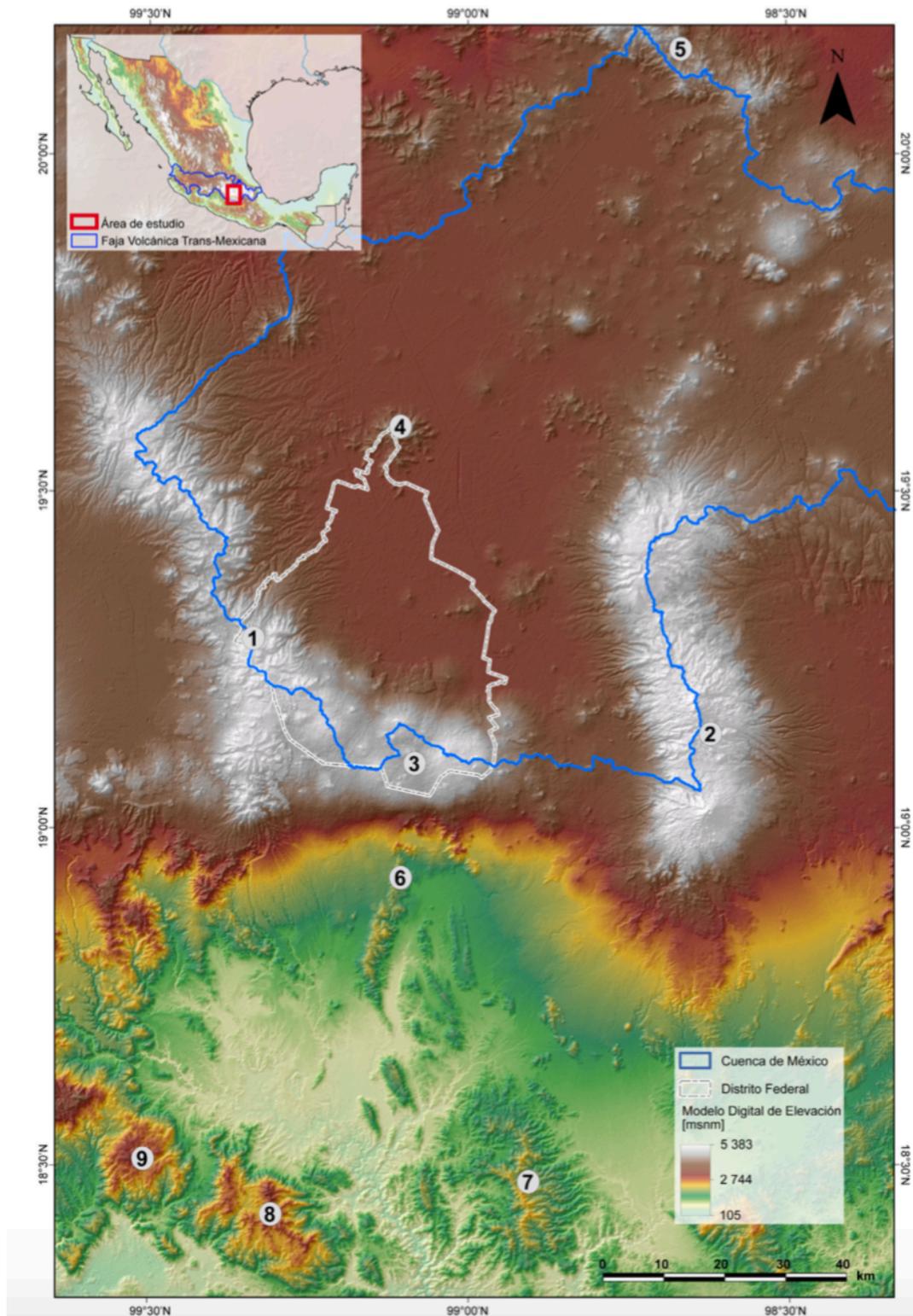


Figura 1.1.3. Modelo de elevación digital: (1) Sierra de las Cruces, (2) Sierra Nevada, (3) Sierra de Chichinautzin; (4) Sierra de Guadalupe; (5) Sierra de Pachuca. En la porción sur del mapa se muestran la región de (6) Tepoztlán, Morelos, en donde se encuentran expuestos los primeros episodios volcánicos de la Faja Volcánica Trans-Mexicana en su sector centro-oriental y los campos volcánicos de la Sierra Madre del Sur: (7) Huautla, Morelos, (8) la caldera de Tilzapotla y (9) Taxco, Guerrero.

La primera vez que se pudo constatar de manera continua la estratigrafía de la Ciudad de México fue gracias a la perforación del Pozo Texcoco (1966-1969) al noroeste de la ciudad. Dicha perforación alcanzó una profundidad de alrededor de 2065m en donde se encontraron depósitos de un conglomerao calcáreo y capas de anhidrita.

En los años posteriores al sismo de 1985 se decidieron realizar algunos otros pozos profundos y diversas zonas de la Ciudad de México, la información recabada por estos pozos ayudó a replantear la cronología de la formación del suelo ciudadano pues aportó valiosa información. El último de estos pozos profundos fue realizado en 2012 por el SACMEX en la alcaldía Iztapalapa llegando a una profundidad de 2008m.

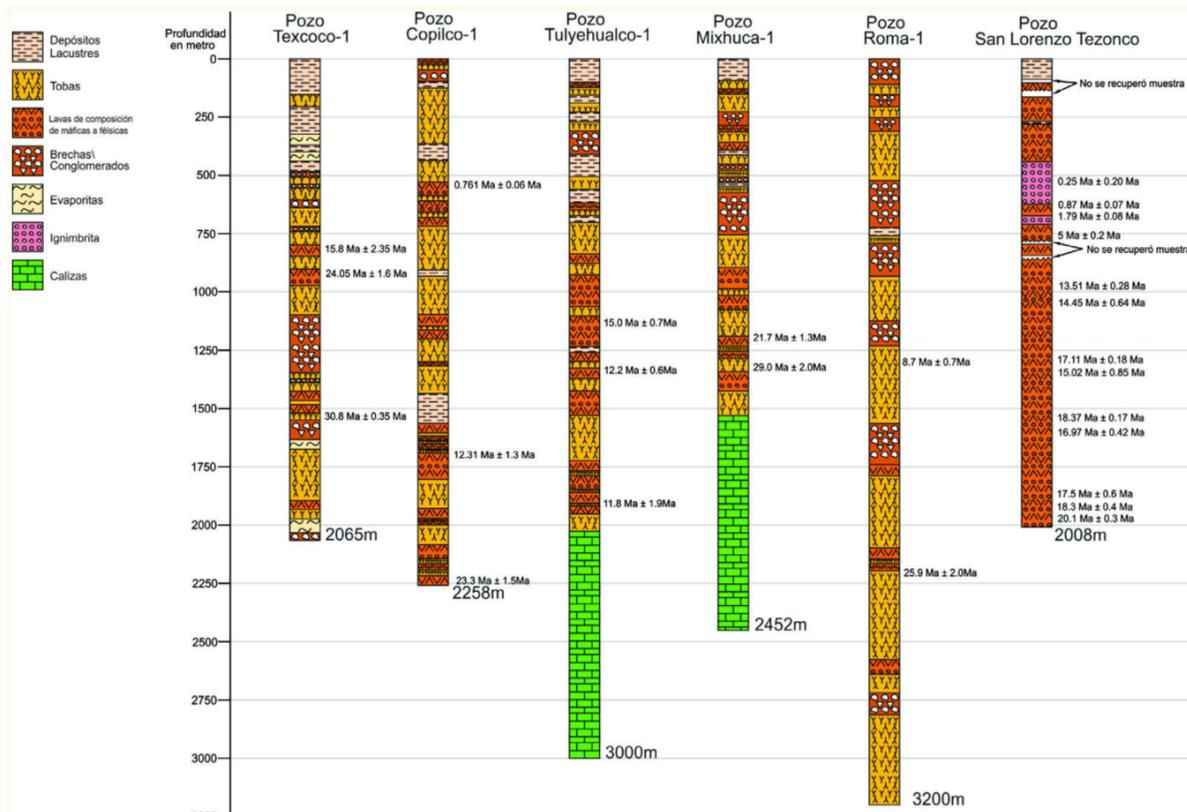


Figura 1.1.4. Columnas estratigráficas de los de los pozos profundos perforados en la Cuenca de México, en donde se muestran las edades obtenidas para cada uno de ellos. La litología del pozo de San Lorenzo Tezonco se simplificó para homologar la litología reportada en los otros pozos (Oviedo de León, 1970; Pérez-Cruz, 1988 y Arce et al., 2013a, 2105).

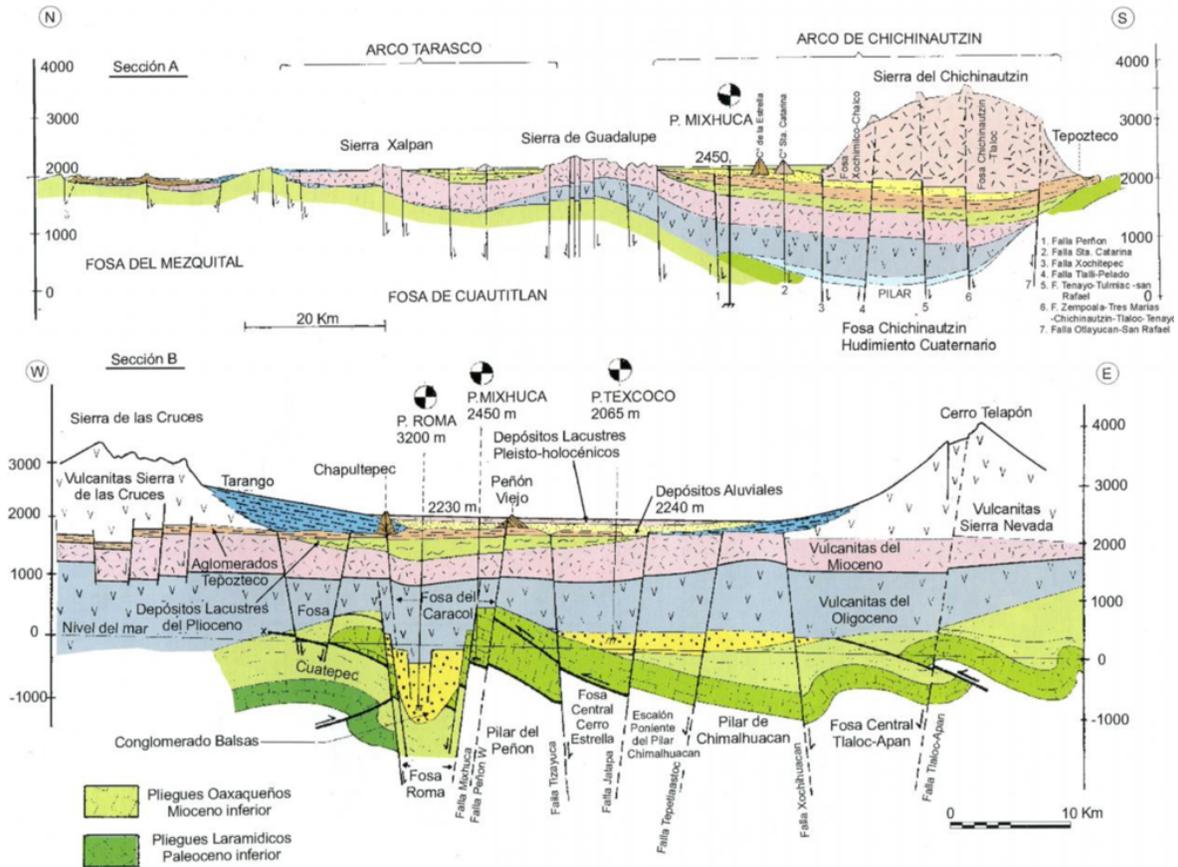


Figura 1.1.5. Secciones geológicas de la cuenca.

La actual Ciudad de México presenta uno de los mayores índices de densidad poblacional con un valor estimado de 5,767 por kilómetro cuadrado (INEGI 2015), sin considerar a la población flotante que a diario transita por la urbe.

La considerable densidad poblacional del área conurbada del Valle de México conllevan grandes problemas relacionados al suelo, es por esto que resulta sumamente importante conocer en la mayor medida posible el suelo sobre el se asienta la ciudad.

1.2 Zonificación

Acorde al NTC-2017, la Ciudad de México (antes Distrito Federal) se agrupa en tres grandes zonas con suelos similares, los cuales son descritos a continuación.

Zona I.

Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta Zona, es frecuente la presencia de rellenos artificiales no compactados, o de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelo para explotar minas de arena; *(Reformado el 17 de junio de 2016)*

Zona II.

Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros, y

Zona III.

Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

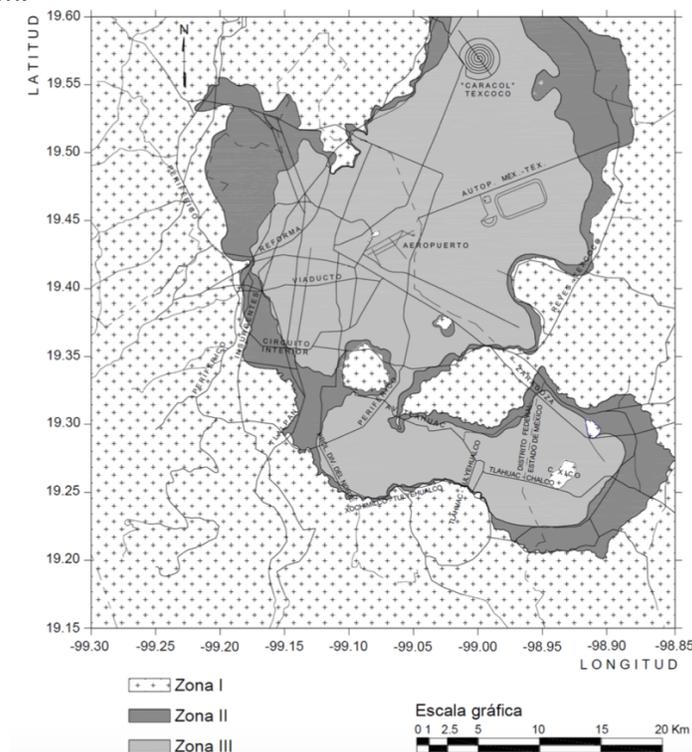


Figura 1.2.1. Zonificación Geotécnica NTC 2017.

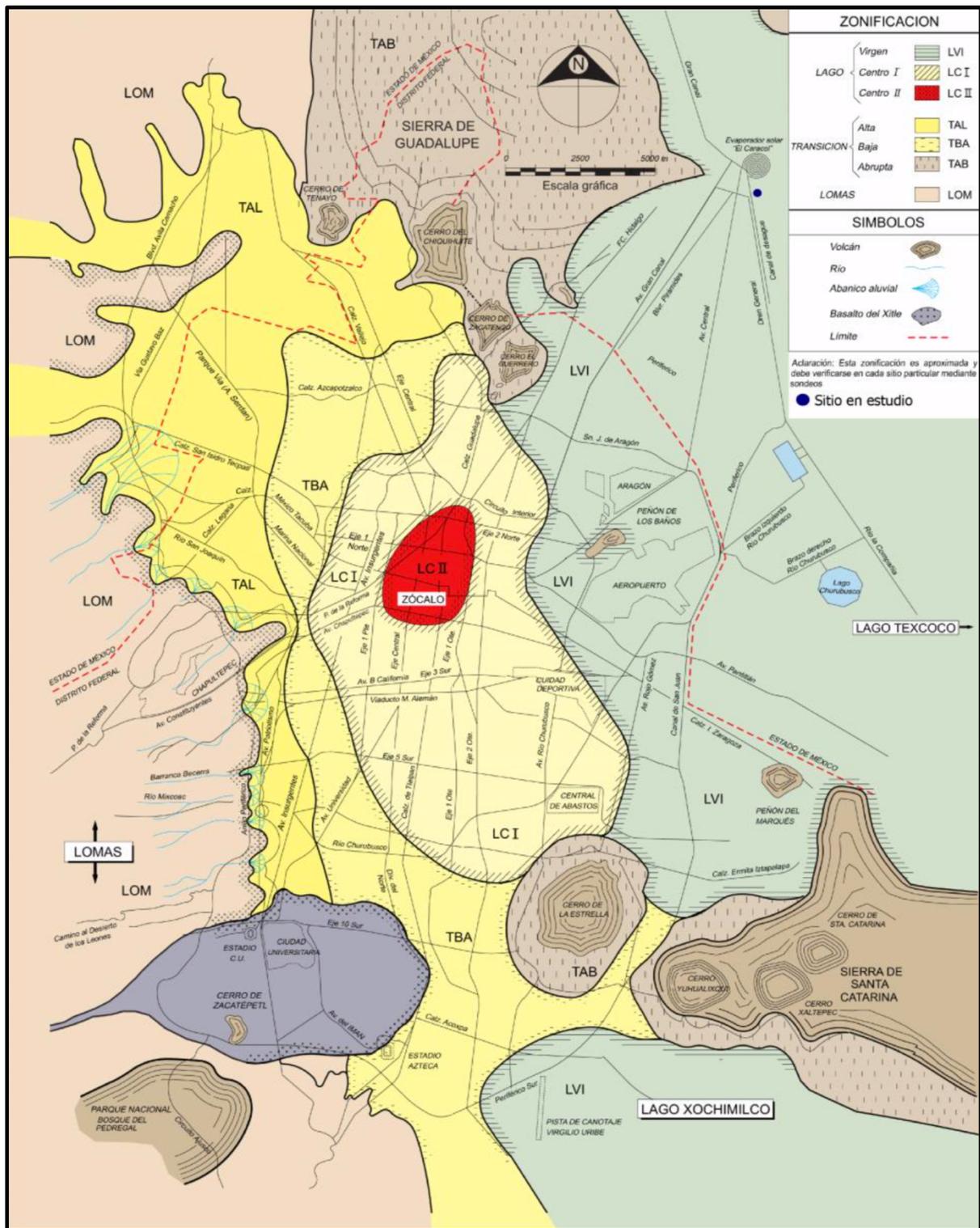


Figura 1.2.2. Zonificación Geotécnica.

1.3 Mapas de periodos (RCDF-2004)

En el año 1987 fue publicado el primer mapa de isoperiodos para el Distrito Federal, elaborado a partir de mediciones acelerométricas y de vibración ambiental.

El RCDF establece el siguiente mapa de periodos, para agrupar la Ciudad de México en suelo con un comportamiento particular

Dicha zonificación solo podrá utilizarse para definir a que zona pertenece un predio en el cual se construirá alguna edificación ligera o mediana de poca extensión y con cimentaciones someras, es decir, que cumplan con las siguientes condiciones;

Construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras

Son de esta categoría las edificaciones que cumplen con los siguientes tres requisitos:

- Peso unitario medio de la estructura $w \leq 40$ kPa (4 t/m²)
- Perímetro de la construcción:
 - P \leq 80 m en las zonas I y II; o
 - P \leq 120 m en la zona III Profundidad de desplante Df \leq 2.5 m

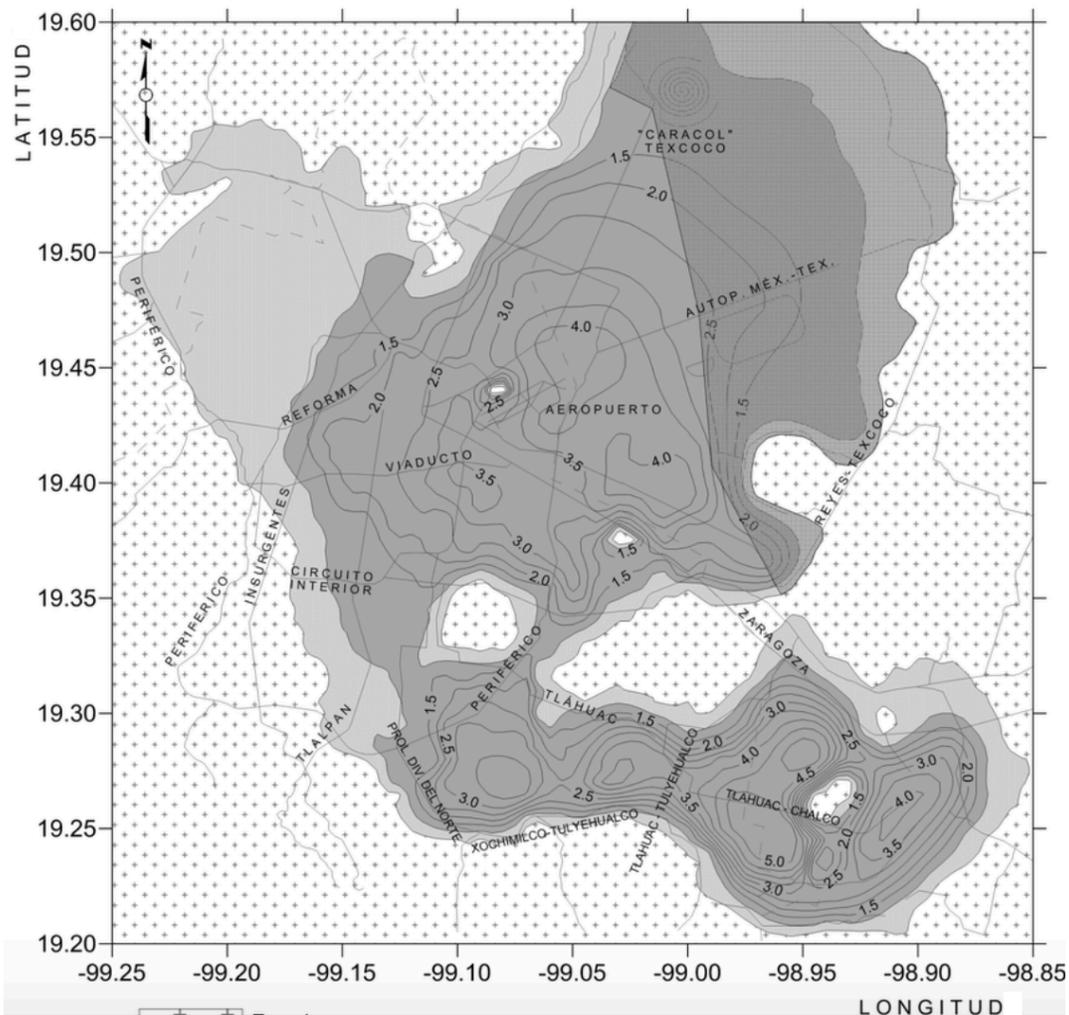


Figura 1.3.1. Mapa de isoperiodos.

2. Efectos del hundimiento regional en la CDMX

2.1 Consolidación

La Ciudad de México se encuentra situado en gran parte en un valle que antiguamente fue una zona lacustre, razón principal por la cual la metrópoli posee características particulares que hacen de la CDMX un lugar con un comportamiento de suelo singular ya no solo en México, sino también en el resto del mundo. Los primeros estudios completos de caracterización de nuestro suelo se deben a Marsal y Mazari en 1959 (Rodríguez, 2016) y fue a partir de ese entonces que el estudio de nuestro subsuelo ha adquirido mayor importancia y relevancia.

La consolidación de suelos es un fenómeno propio de los suelos cohesivos, y se define como el cambio de volumen de un suelo saturado, debido a la expulsión del agua intersticial a través del tiempo. La consolidación en la Ciudad de México ha sido un fenómeno estudiado desde hace ya varias décadas que ha aumentado su velocidad en los últimos años debido a la extracción desmedida e insostenible hasta el momento de mantos acuíferos subterráneos.

Las primeras observaciones del hundimiento de la Ciudad de México se dieron en el año 1925 (Gayol R.). Los primeros estudios acerca del tema se realizaron en la obra *“Hundimiento de la Ciudad de México; observaciones y estudios analíticos”* (Marsal, Hiriart, & Sandoval, 1953), sin embargo, se estima que los primeros asentamientos comenzaron a presentarse a mediados del siglo XIX (Ovando Shelley, 2018). Para la primera década del siglo XX, la Comisión Hidrográfica realizó nivelaciones de la Catedral Metropolitana entre los años 1905-1911, y se estimó que para esa zona en especial el hundimiento se presentaba a una velocidad de 3cm/año, velocidad que ha aumentado de manera gradual a lo largo de más de una década. Hoy en día existen registros de velocidades de hundimiento de algunas subcuencas que van de los 35 cm/año a los 40 cm/año.

Desde el año 1983 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) se hace cargo de los registros de nivelaciones de forma periódica con 1726 bancos en la CDMX. El último registro de nivelación que se tiene data del 2016-2017.

Actualmente no es necesario hacer uso de una sofisticada instrumentación en las edificaciones para apreciar el fenómeno de hundimiento regional, pues este ya es apreciable en gran parte de la ciudad, presentándose en zonas donde antes no era visible y ocasionando problemas de distinta índole. Acorde con la CONAGUA, se estima que la recarga media anual del acuífero es de $8.9 m^3/s$ mientras que la extracción concesionada ronda los $39 m^3/s$ lo que claramente resulta en una sobreexplotación del acuífero. Como medidas de mitigación se han trasladado pozos aquellos de lugares que presentan mayor hundimiento, tal es el caso de la zona centro de la ciudad, también se han implantado vedas para nuevas extracciones, sin embargo, estas medidas claramente no han logrado resolver el problema.

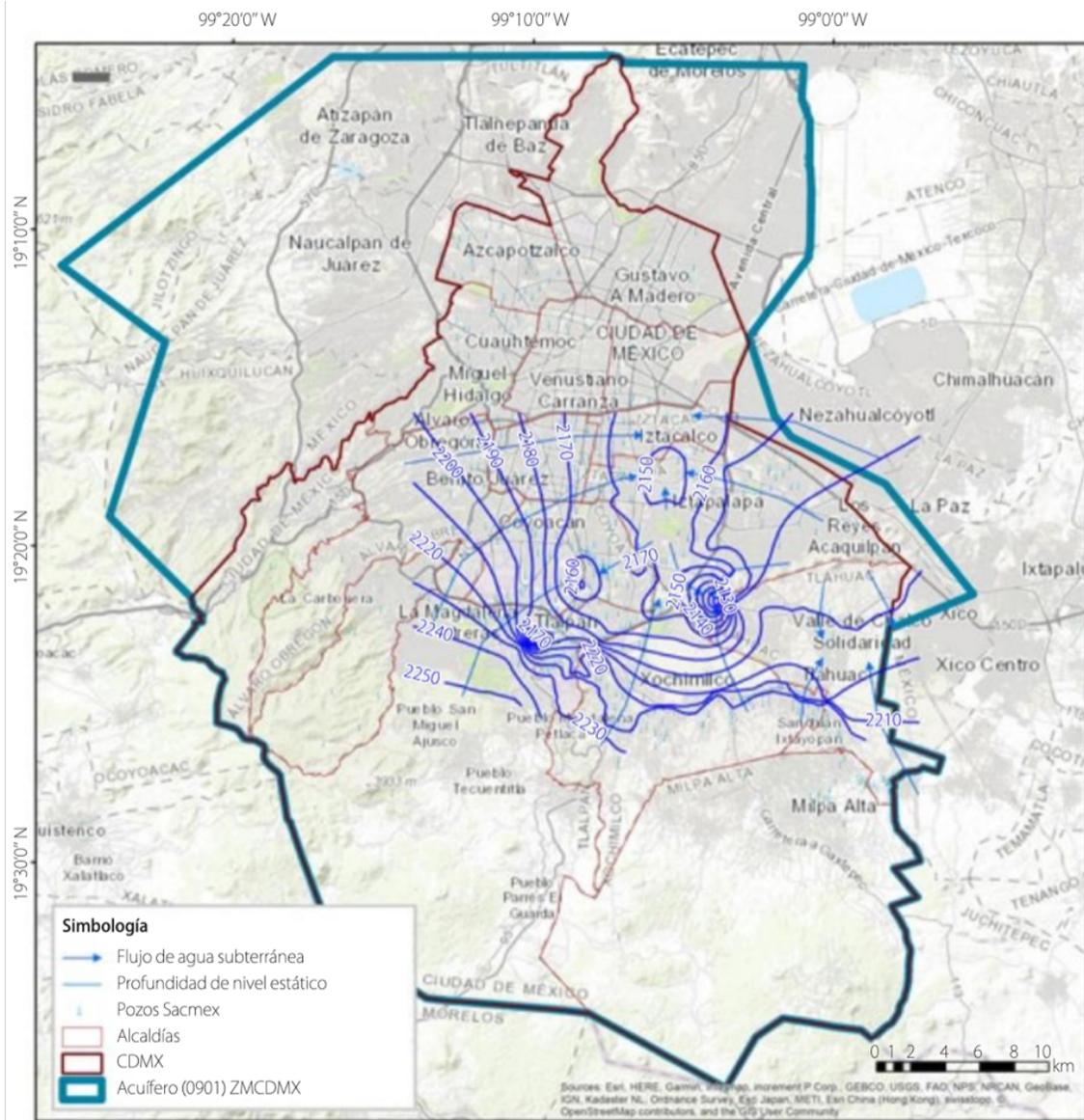


Figura 2.1.1. Zonas de mayor abatimiento del nivel estático (msnm) (2016) y en dirección de flujo subterráneo

2.2 Reducción del espesor compresible

En la Ciudad de México existen tres zonas de gran importancia geotécnica, de las cuales en las que resulta más relevante el estudio y análisis es la Zona III, debido a que está compuesta en gran medida por arcillas altamente compresibles y poco competentes para la edificación de altura.

El suelo arcilloso de gran parte del valle de la Ciudad de México ha sufrido cambios drásticos en su espesor, cambios que se han acrecentado con el pasar de los años. Como se ha mencionado anteriormente estos cambios se deben en gran medida a la extracción desmedida de agua en el subsuelo, la cual se encuentra a distintas profundidades y en diferentes cantidades. Todas estas variaciones y la combinación de ellas hacen que la reducción del estrato arcilloso sea irregular, dificultando su medición y afectando a las estructuras de diversas maneras.

Cuando un material se somete a condiciones de carga puede sufrir deformaciones, sin embargo, predecir el comportamiento de estas deformaciones resulta aún complejo e inexacto hasta el día de hoy dado que los suelos están compuestos en su mayoría por una combinación heterogénea de materiales con diferentes características y propiedades que dificultan el análisis.

Dichos cambios no han pasado desapercibidos para los profesionales mexicanos y a raíz del sismo de 1985 se ha reformado y hecho modificaciones al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (ahora Ciudad de México) el cual incorpora el riesgo sísmico de las distintas zonas y su relación con las edificaciones.

3. Cambio en las propiedades dinámicas del suelo por consolidación

3.1 Cambio en el espesor compresible

La pérdida de la presión de agua en el suelo de la Ciudad de México ha inducido un fenómeno de consolidación, produciendo una reducción progresiva en los depósitos lacustres, que se traduce en hundimientos en la superficie del terreno. La consolidación altera de manera significativa algunas propiedades en los suelos blandos característicos de nuestra ciudad, como lo son la velocidad en la propagación de ondas, el amortiguamiento del material, el periodo dominante de vibración y el espesor del depósito, la suma de todos estos cambios se refleja en la respuesta dinámica del suelo.

Con el fin de conocer en forma sistemática los cambios de en los niveles en los depósitos lacustres de la ciudad, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) ha llevado un registro continuo desde el año 1983, el cual además de aportar valiosa información para la creación de políticas de extracción y preservación del agua, también nos da una idea de los cambios en los espesores de algunos estratos. De los registros se pueden apreciar algunos bancos que presentan velocidades de hundimiento superiores a los 40 cm/año, algunos otros muestran hundimientos acumulados mayores a los 4m durante los 15 años de observación.

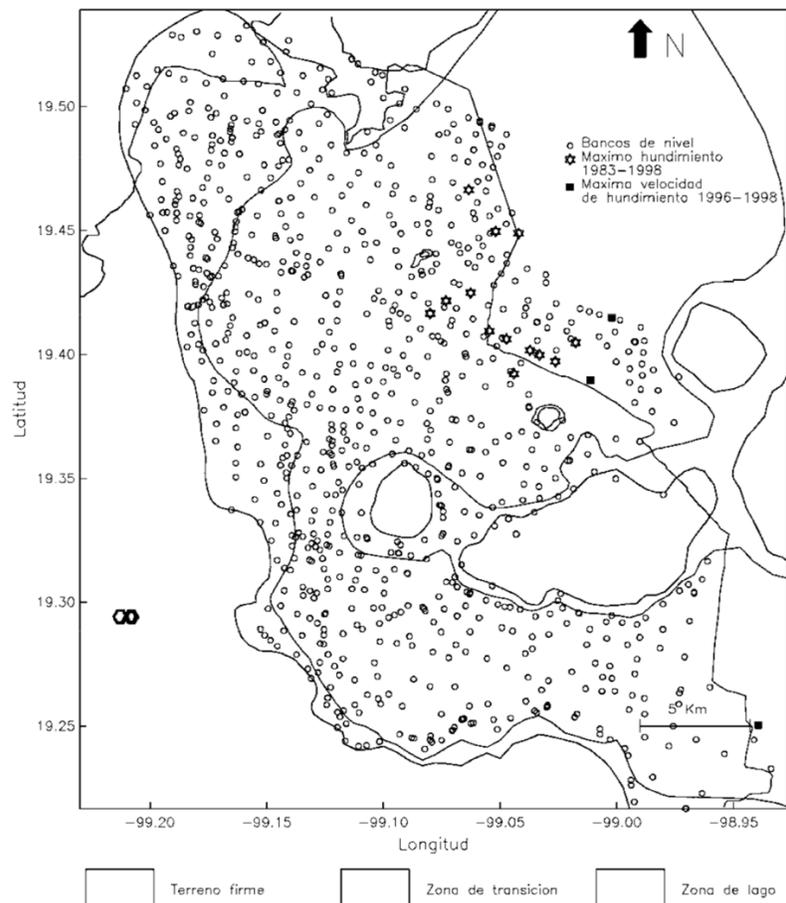


Figura 3.1.1. Ubicación de bancos superficiales.

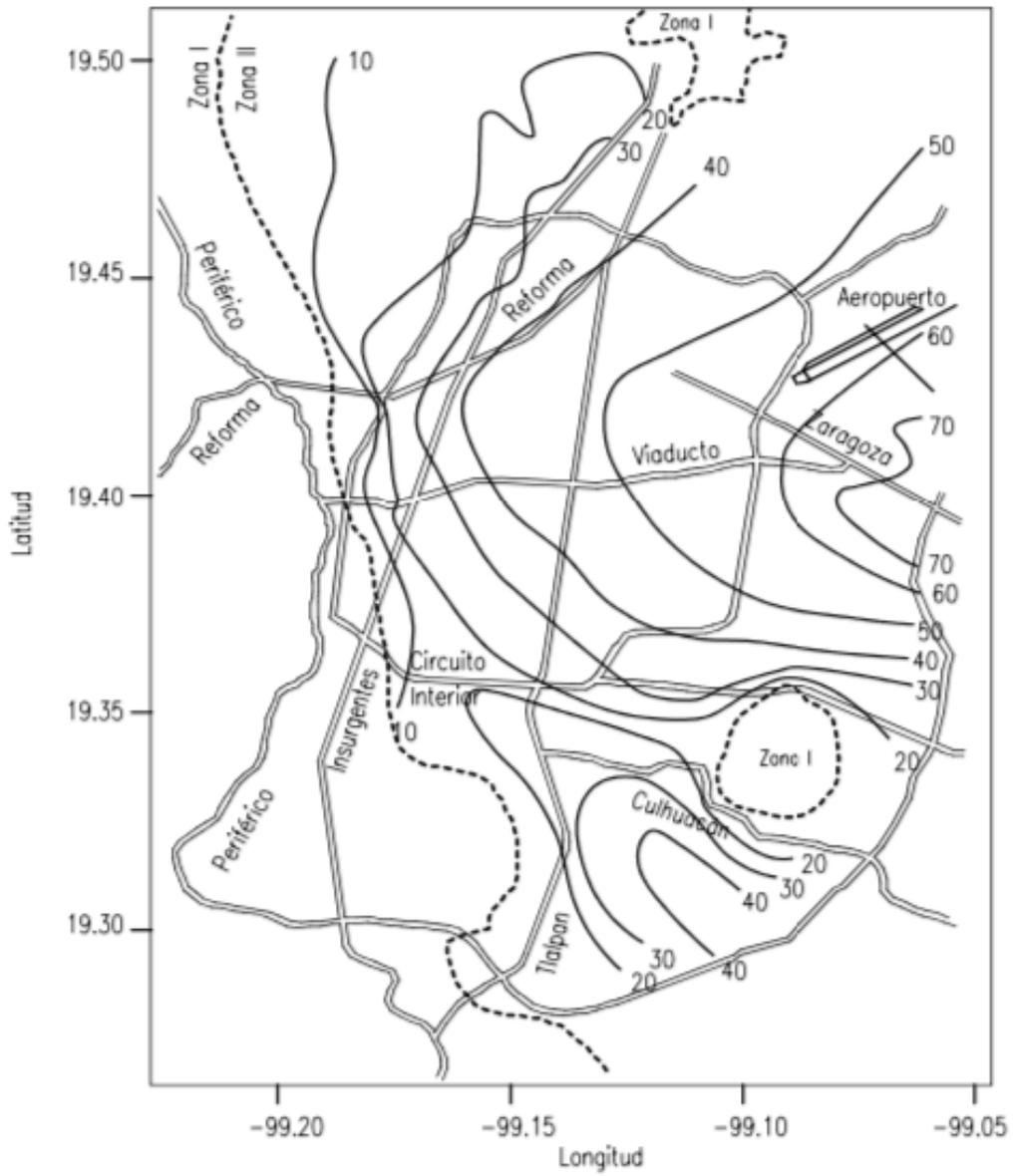


Figura 3.1.2. Curvas de igual profundidad al basamento local del Valle de México.

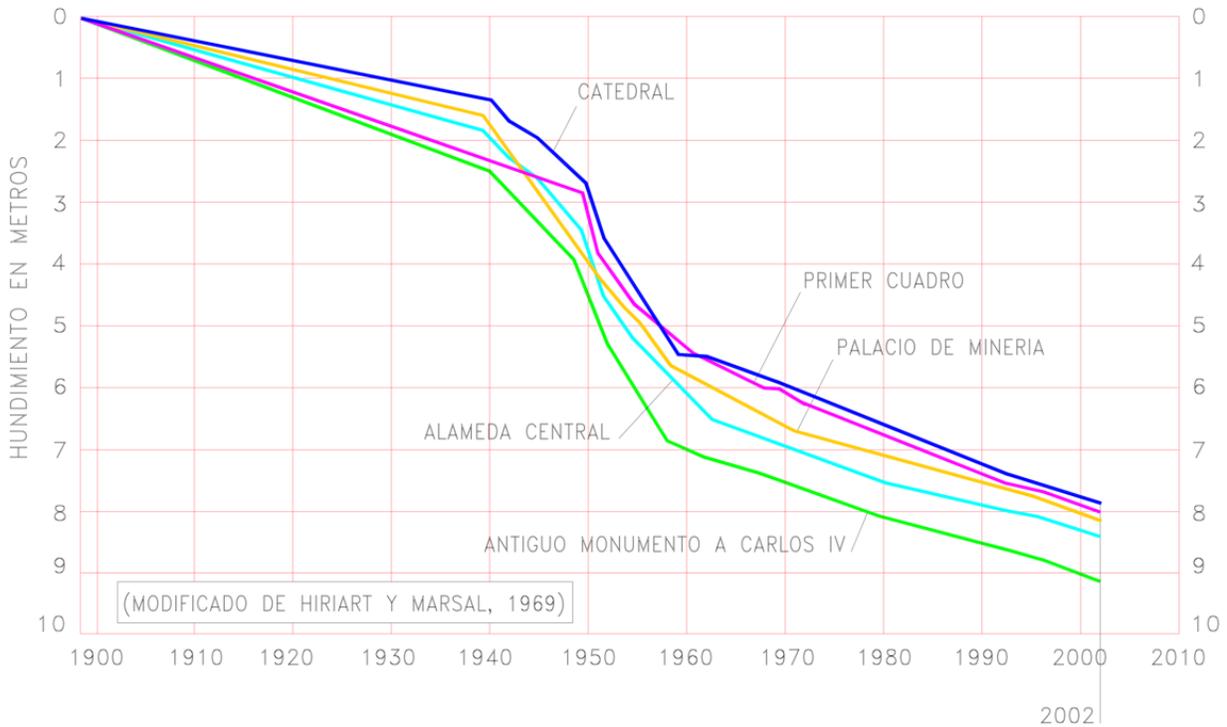


Figura 3.1.4. Evolución del hundimiento en varios monumentos del centro histórico.

A la fecha los hundimientos regionales promedio rondan los 15 cm/año y varían según a zona, yendo desde los 10cm hasta los 35cm en las zonas más afectadas, como lo son el límite de la CDMX con Ciudad Nezahualcóyotl, el AICM, la zona poniente de a alcaldía Iztapalapa, Xochimilco, el centro de la ciudad entre otras.

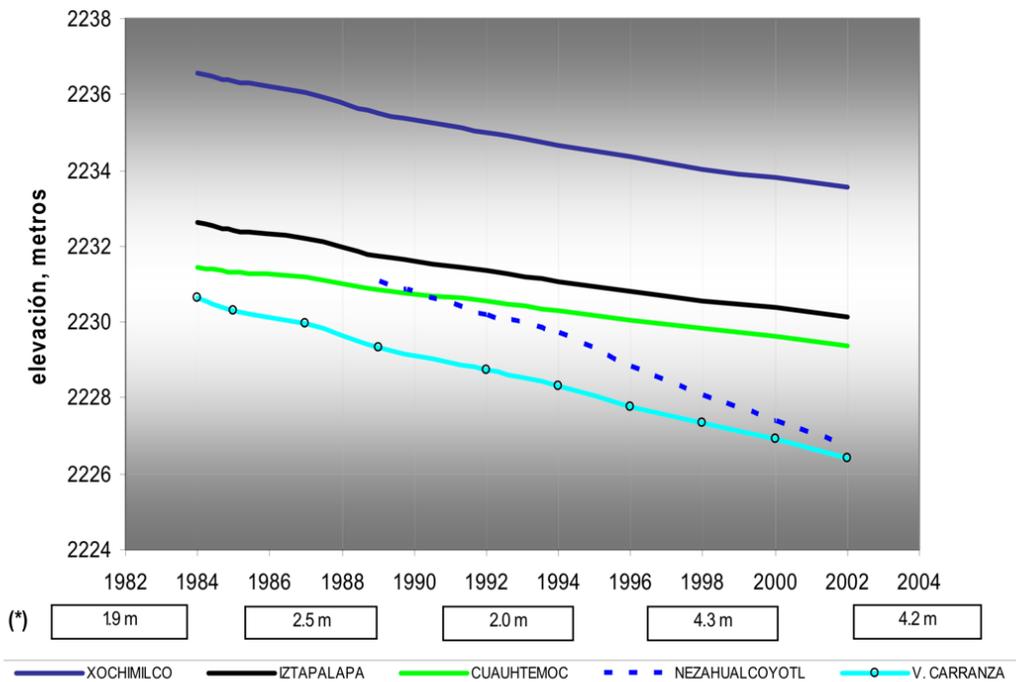


Figura 3.1.5. Evolución del hundimiento en diferentes puntos de la Ciudad de México y su zona conurbada. 1984-2002.

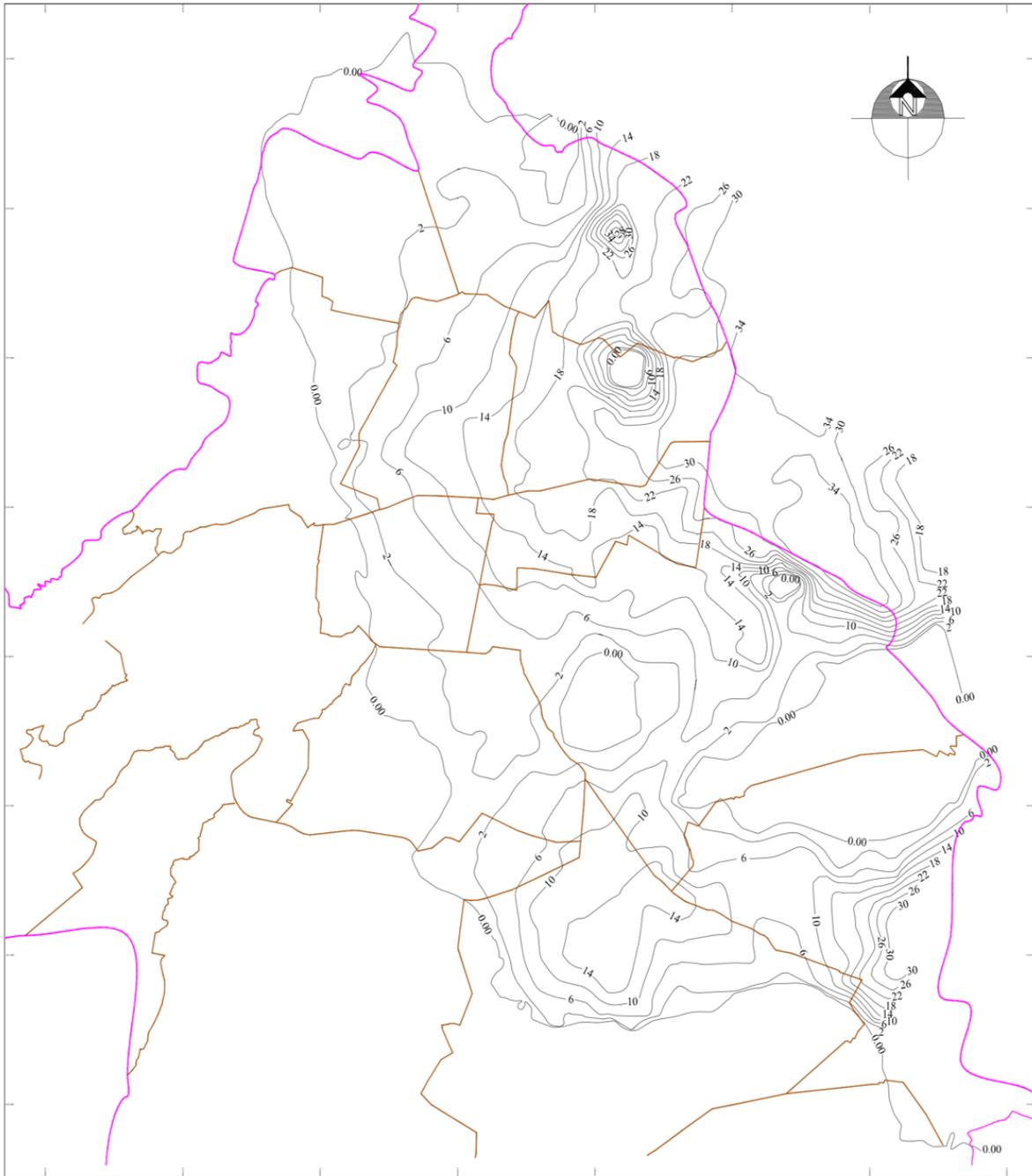


Figura 3.1.6. Hundimientos promedio anual en periodo. 1992 - 2002.

A partir de las distintas figuras mostradas se puede inferir que los depósitos que poseen una mayor cantidad de material compresible tendrán velocidades de hundimiento más altas y viceversa, de igual manera podemos apreciar que la tasa con la que se reduce el espesor compresible tiende a decrecer conforme al tiempo.

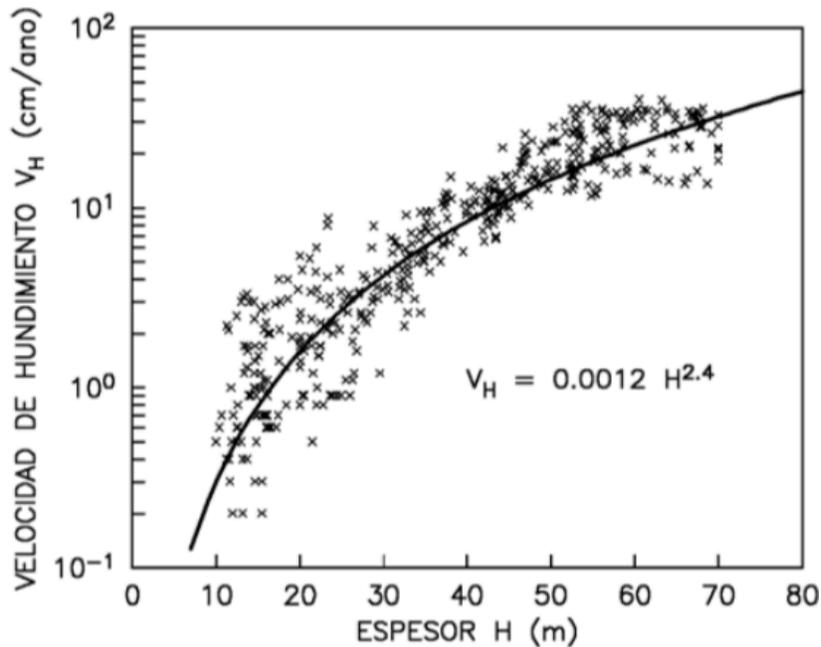


Figura 3.1.7. Correlación entre el espesor compresible y la velocidad de hundimiento.

La expresión que relaciona la tendencia de la velocidad de hundimiento regional (V_H) con el espesor del depósito del suelo compresible (H) se define como

$$V_H = 0.0012 H^{2.4}$$

Para obtener una estimación del comportamiento futuro de los suelos de la Ciudad de México en función del tiempo, se analizaron depósitos de suelo con espesores comprendidos entre 10 y 70 m a intervalos de 10 m. Se asume que este escenario es representativo para la mayoría de los suelos del valle. El hundimiento que presentan cada uno de estos sitios parte de una velocidad inicial, que al reducir su espesor se atenúa (Aguilar, H., 2020).

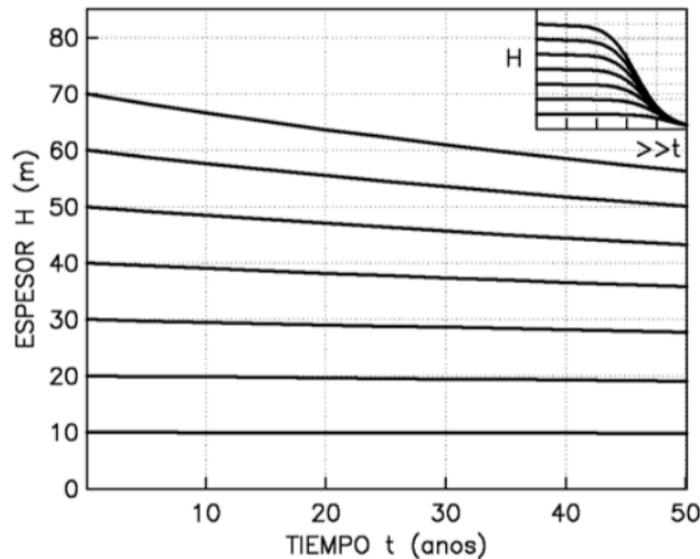


Figura 3.1.8. Cambio del espesor compresible de los suelos del Valle de México.

Como se puede ver en la figura 3.8.1, el comportamiento de los sitios estudiados es similar a la configuración de una curva típica de consolidación.

Debido a la complejidad que representa la evolución del hundimiento en la Ciudad de México por los múltiples factores involucrados en el proceso y ya que el hundimiento varía según la zona surgió la necesidad de recopilar dicha información y poder presentarla de manera desglosada, es así como nace el Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico (SEHEDIS). El SEHEDIS es un mapa interactivo sin validez oficial que recopila información sobre el hundimiento regional en la Ciudad de México en los últimos 35 años a través del registro de 735 bancos de nivel superficial monitoreados por el SACMEX.

El Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico muestra para cada banco de nivel muestra además los posibles efectos que el hundimiento causará en la respuesta sísmica de los distintos sitios en años futuros. Del SEHEDIS se puede obtener para cada banco de nivel en la Ciudad de México la siguiente información

- El hundimiento medido
- El hundimiento estimado hasta el año 2070 con la función que describe el comportamiento esperado.
- La velocidad de hundimiento promedio y la última velocidad de hundimiento medida.
- El cambio estimado del periodo dominante de vibración del suelo hasta el año 2070.
- La evolución de los espectros de diseño sísmico a cada 10 años hasta el 2070.
- Los parámetros para la construcción de los espectros de diseño.

Basta con insertar las coordenadas (geográficas o UTM) del sitio de interés y el sitio mostrará los bancos de nivel más cercanos en un radio entre 500 y 1,500 m.

Resulta interesante la comparación de los espectros propuestos por el SASID y aquellos obtenidos en el SEHEDIS. Se puede apreciar que generalmente para los sitios con una alta velocidad de hundimiento los espectros arrojados por el SEHEDIS resultan ser más grandes respecto a los del SASID.

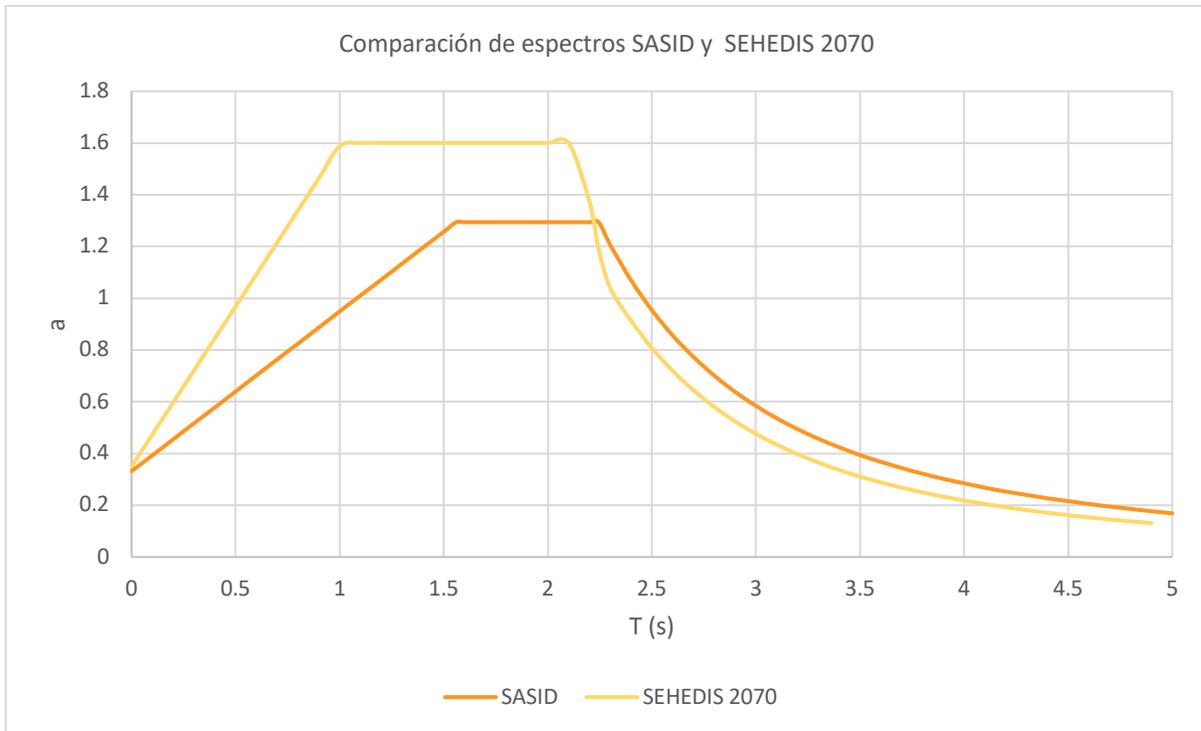
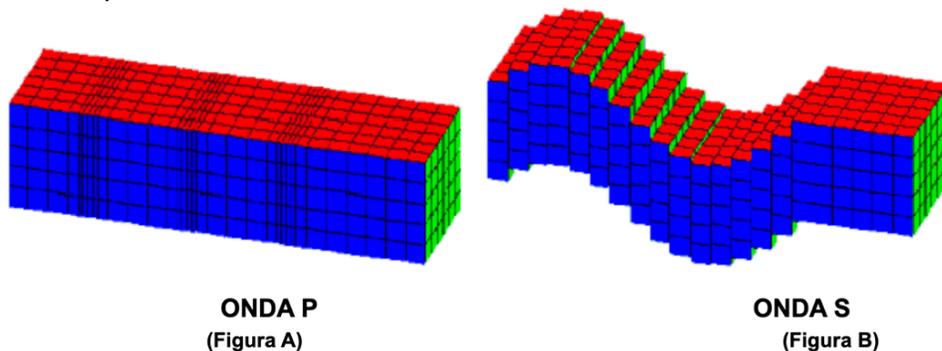


Figura 3.1.9. Comparación de espectros para el mismo sitio.

3.2 Cambio en Vs

Durante un evento sísmico se libera energía que produce diversos tipos de ondas las cuales se propagan a través de la corteza terrestre. Dichas ondas se agrupan en ondas internas o de cuerpo, y en ondas superficiales. Las primeras viajan a través del interior y se dividen en dos grupos, ondas primarias u ondas (p) y secundarias (s). Las ondas p son ondas longitudinales, lo que significa que el suelo es comprimido y dilatado en dirección de la propagación, generalmente este tipo de ondas poseen una velocidad mayor a la de las ondas s y son capaces de propagarse a través de líquidos o sólidos.

Las ondas primarias u ondas s son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente conforme la onda avanza. Las ondas s pueden desplazarse únicamente a través de sólidos, dada su naturaleza y a de los líquidos los cuales son incapaces de soportar esfuerzos de corte.

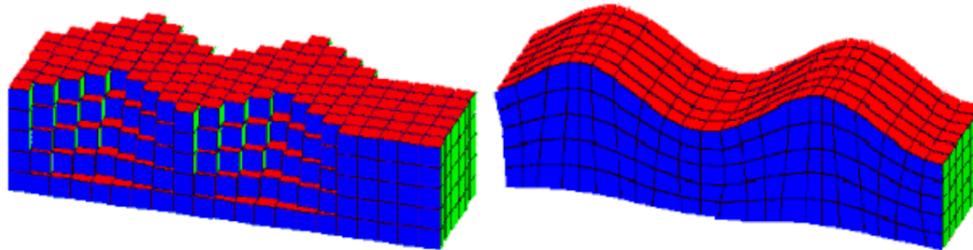


ONDA P
(Figura A)

ONDA S
(Figura B)

Figura 3.2.1. Esquema de la trayectoria de ondas P (A) y ondas S (B).

Las ondas superficiales son generadas cuando las ondas internas llegan a la superficie terrestre, las cuales se propagan por el terreno circundante y son las causantes de los principales daños a construcciones. Estas ondas se dividen en dos: las primeras conocidas como ondas Love, las cuales producen movimiento horizontal en la superficie y las ondas. Las segundas reciben el nombre de ondas Rayleigh, tienen la particularidad de seguir una trayectoria elíptica.



ONDA LOVE

(Figura C)

ONDA RAYLEIGH

(Figura D)

Figura 3.2.2. Esquema de la trayectoria de ondas Love (C) y ondas Rayleigh (D).

Las ondas sísmicas se propagan desde el origen de la excitación hasta la superficie del medio, para registrar los movimientos generados por los sismos se utilizan equipos denominados sismógrafos o acelerógrafos. Siguen un principio de operación basado en la inercia de los cuerpos y básicamente consisten en una masa suspendida por un resorte que permite permanecer inerte por algunos instantes con respecto al movimiento del suelo. Dicha masa puede registrar los movimientos de la superficie y así obtener un registro del movimiento del suelo o un sismograma.

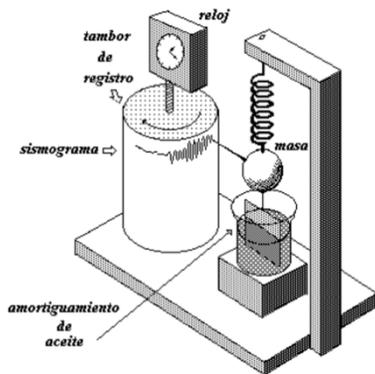


Figura 3.2.3. Sismógrafo.

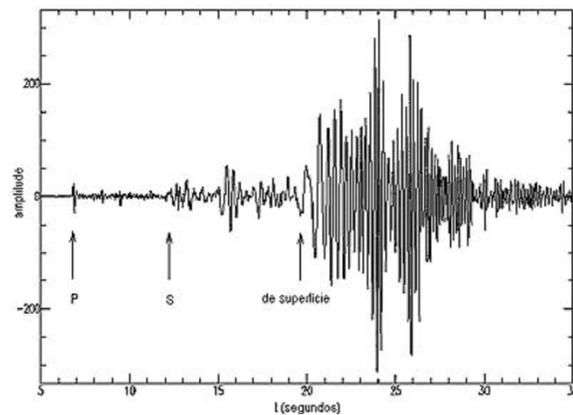


Figura 3.2.4. Sismograma.

Una de las consecuencias del hundimiento regional es la disminución en el espesor del suelo compresible, dicha disminución trae como resultado un aumento de rigidez en el suelo, por lo cual la propagación de ondas sísmicas a través de los estratos cambia, debido a que los esfuerzos efectivos aumentan y por consiguiente las velocidades de propagación de las ondas tiende a aumentar, las velocidades de onda son usualmente medidas en m/s.

Al propagarse las ondas se producen esfuerzos y deformaciones en el medio por el que viajan, la relación entre estos parámetros se define por medio de los módulos

elastodinámicos E y G , que son ron el resultado de asociar las ondas de compresión y cortante respectivamente.

$$G = V_S^2 \rho$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

De igual manera a partir de las velocidades de las ondas primarias y secundarias es posible obtener la relación de Poisson (ν).

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}$$

Resulta de especial interés la observación de este fenómeno, pues influirá directamente en la respuesta dinámica del suelo en estudio. Se considera que la rigidez (G) aumenta en función del tiempo, por lo cual la magnitud de la velocidad de las ondas de corte (V_S) también sufre un aumento. De igual manera la densidad (ρ) del suelo sufre una ligera modificación, pues se incrementa. Estas variables repercuten directamente en la velocidad de las ondas de corte, dicha relación se resume a continuación en la siguiente expresión

$$V_S = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

3.3 Cambios en el amortiguamiento

La razón de amortiguamiento (ζ) puede definirse como la capacidad del material para disipar energía, por lo cual éste último tiene una gran influencia en el establecimiento del nivel de amplificación dinámica que se generará en un depósito al ser sometido a una excitación. La capacidad del amortiguamiento depende en gran medida del índice de plasticidad del suelo y del nivel de deformación angular al que esté expuesto (Dobry y Vucetic, 1987; Romo, 1991). Se considera que la velocidad de propagación de las ondas de corte y el amortiguamiento del suelo son propiedades que cambian poco a través del tiempo.

Existen dos tipos de amortiguamientos que relacionan la pérdida de energía y la viscosidad intragranular del material. El primero de estos se conoce como amortiguamiento histórico, el cual está asociado a la disipación de energía por el desplazamiento que sufren las partículas al presentarse un contacto y posteriormente un reacomodo de las mismas. El segundo es de tipo viscoso y está relacionado con la pérdida de viscosidad debido al movimiento entre la parte líquida y sólida de un suelo.

En la siguiente figura se aprecian tres componentes fundamentales para el entendimiento del amortiguamiento. El primero de ellos es una masa suspendida de un resorte de longitud L que a su vez está anclado a un elemento rígido. En el momento en el que el resorte se vea afectado por la masa, este sufrirá una deformación x en su longitud. Si quisieramos regresar al resorte a su estado original tendríamos que aplicar una fuerza en sentido contrario a la deformación, esta fuerza quedaría definida de la siguiente manera

$$F = kx$$

Donde k es el coeficiente de elasticidad del resorte.

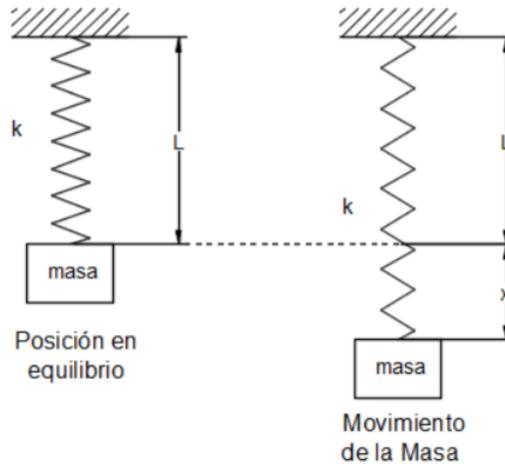


Figura 3.3.1. Sistema masa-resorte

3.4 Cambios en el periodo de sitio

Con el fin de conocer la forma en la que se relaciona el cambio de la velocidad de las ondas de corte a través del tiempo, se recopilaron registros acelerométricos de diversas épocas capturados en el momento de ocurrencia de algunos temblores. Los registros tomados corresponden a sismos de subducción y proceden de la Red Acelerométrica del Valle de México, dichos registros son pocos pues para el sismo de 1985 apenas había una decena de estaciones funcionando. Para cada sitio y registro acelerométrico se construyó un espectro de amplitudes de Fourier y cocientes espectrales, a través de la transformada rápida de Fourier (Claerbout, 1976). La figura 10 muestra los espectros de amplitudes de Fourier contruidos para el sitio Central de Abastos Oficina CAO. La línea continua indica los espectros de amplitudes para el temblor 1985, y con línea discontinua se muestran los asociados a un sismo ocurrido en 2003 (Aguilar, H. 2020). A partir de ambos registros se pudo obtener el cambio en la frecuencia dominante asociada al periodo de vibración del suelo.

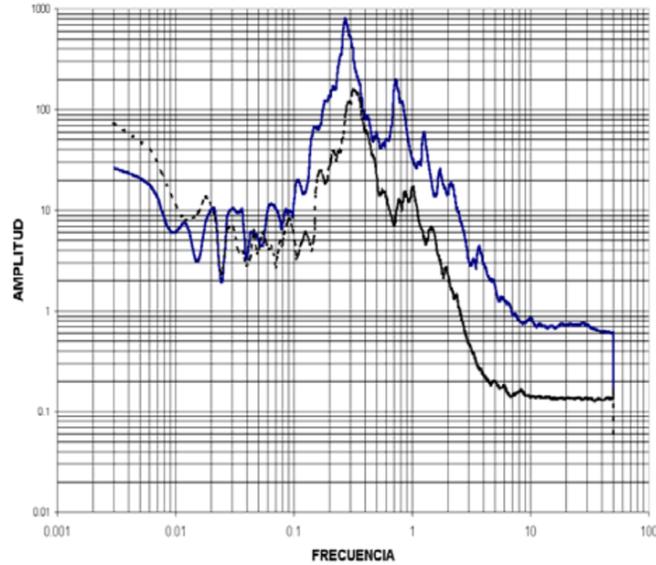


Figura 3.4.1. Espectros de Fourier en el sitio CAO para sismos en 1985 (___) y en 2003 (----)

Debido a que ambos registros pertenecen al mismo sitio, este fue ubicado en la figura 2 y así fue posible definir el espesor del depósito compresible, conocido el espesor original (H) y los periodos de vibración fundamentales (T_s) y conociendo la relación que guardan estos dos parámetros respecto a la velocidad de ondas de corte

$$V_s = 4H/T_s$$

El periodo de un suelo se refiere a la capacidad que tiene el suelo para volver a su posición original al ser sometido a una vibración, es decir, el tiempo que tarda en completar un ciclo o una longitud de onda, usualmente se mide en segundos.

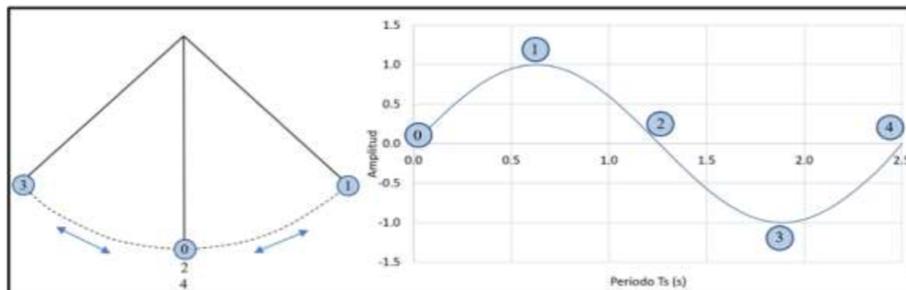


Figura 3.4.2. Periodo fundamental de vibración de un cuerpo

Está intrínsecamente relacionado con dos parámetros que ya se han abordado en el presente trabajo, el primero de ellos es el espesor del depósito que como se ha explicado no siempre se mantiene constante y en depósitos de origen lacustre como el que tenemos en el valle de la Ciudad de México este tiende a disminuir de forma gradual conforme pasa el tiempo. Una disminución en el espesor del depósito trae como consecuencia un cambio en la velocidad de ondas de corte que se propagaran a través de este depósito. El periodo de sitio está definido como se muestra en la siguiente ecuación.

$$T_s = \frac{4H}{V_s}$$

Donde

T_s (s)	Periodo de vibración del suelo
H (m)	Espesor de estrato de suelo compresible
V_s (m/s)	Velocidad de propagación de ondas de corte

Como los parámetros involucrados en la obtención del periodo del sitio no permanecen constantes con el transcurso de los años y ya que esta variación no es la misma en todo el valle, resulta preciso estudiar la tendencia que existe en cada sitio de interés para poder conocer mejor el comportamiento de cada lugar.

Con el fin de conocer la respuesta que tendrán los diferentes suelos compresibles del valle de México frente a eventos sísmicos es recomendable construir espectros de diseño que muestren la evolución en la respuesta de suelos que han sufrido consolidación.

Si se analiza la tendencia de cambio que existe en los periodos de vibración se pueden establecer correlaciones como la mostrada en la figura 3.4.3. El estudio de la evolución del periodo dominante de vibración en función del tiempo se ha realizado a partir de la construcción de cinco modelos representativos de sitios del valle de México. Los modelos se caracterizan por presentar periodos dominantes de vibración del suelo de 1, 2, 3, 4 y 5s. Se analiza la forma en que cambian las propiedades de los modelos de suelo propuesto durante un periodo de observación de 50 años. Para ello, se ha considerado una relación crítica donde el incremento anual de la velocidad de propagación de ondas S es menor para los mayores espesores de suelo compresible. (Aguilar. R., 2020).

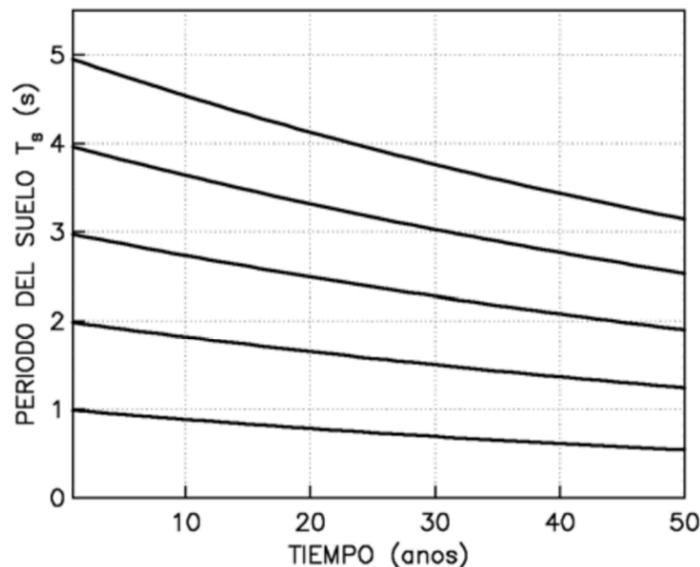


Figura 3.4.3. Variación del periodo con respecto del tiempo.

3.5 Cambios en la respuesta sísmica

La respuesta sísmica de un suelo dependerá de las condiciones dinámicas de cada suelo, así pues, un sismo no afectará de igual manera a dos depósitos. Como las condiciones dinámicas de los suelos compresibles en el valle de México evolucionan la respuesta dinámica lo hará de igual forma. Es menester que las estructuras construidos sobre este tipo de suelos compresibles tome en consideración estos cambios, pues de no hacerlo se pueden presentar problemas significativos que pongan en riesgo el correcto funcionamiento de las estructuras, quizá el más importante de estos problemas es el llamado efecto de resonancia, el cual se presenta cuando el periodo de vibración del suelo es igual al periodo de vibración de la estructura, dando paso a una amplificación significativa de las deformaciones y aceleraciones en la edificación y por supuesto un aumento en los esfuerzos.

La forma en la cual se analizan la respuesta sísmica de un suelo es a través de la construcción de espectros de respuesta, ya sean de desplazamiento, velocidad o aceleración. Son representados mediante la respuesta máxima de diversos osciladores de un grado de libertad sometidos a una misma excitación y con un mismo nivel de amortiguamiento. Así pues, para obtener el comportamiento sísmico de un sitio es necesario construir espectros de respuesta para cada una de las fuentes sísmicas que se presenten.

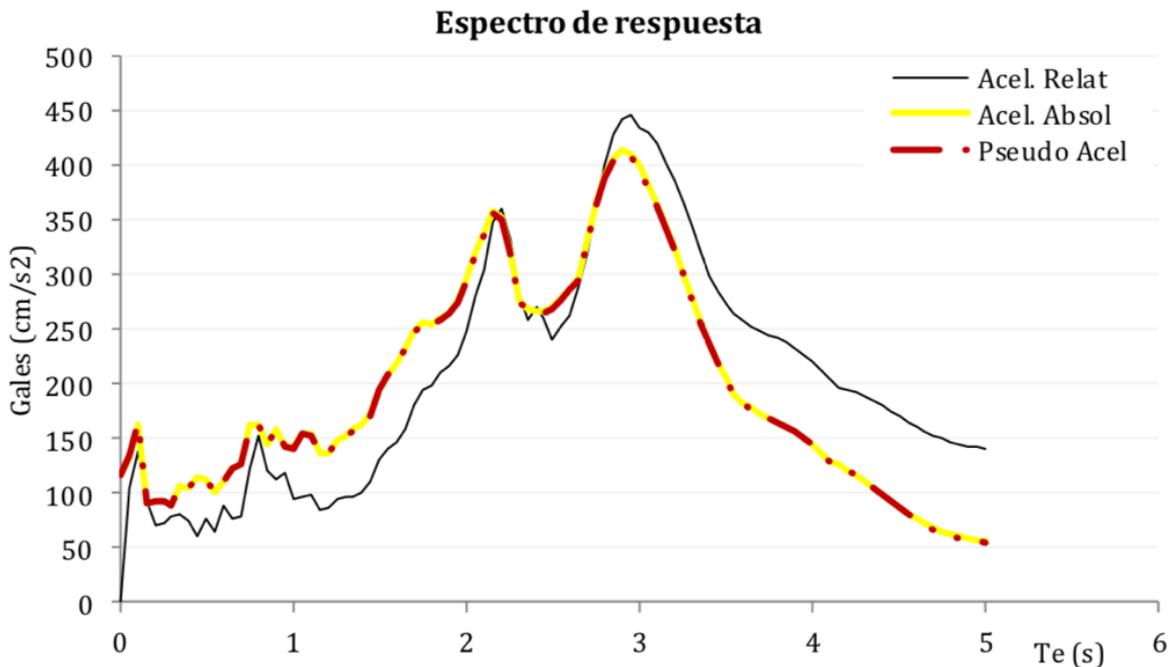


Figura 3.5.1. Espectros de respuesta.

Una vez obtenido un espectro de respuesta se procede a la obtención de los espectros de diseño, el cual básicamente es un espectro que abarca a todos los espectros de respuesta, se construye mediante una serie de ecuaciones.

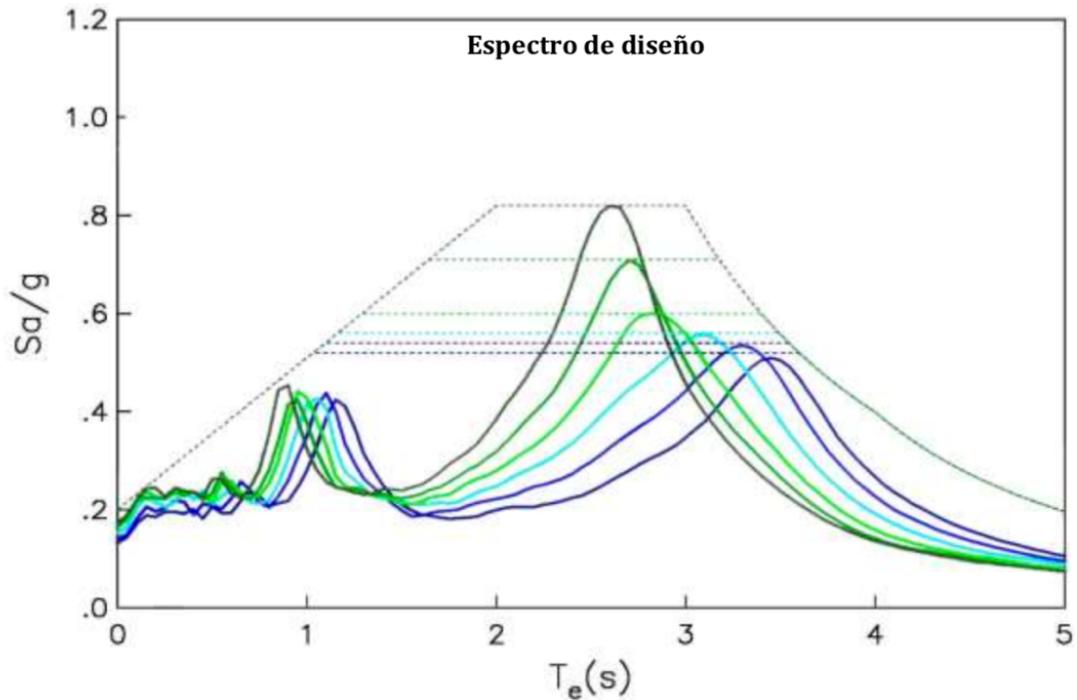


Figura 3.5.2. Espectro de diseño.

Las ordenadas de los espectros de diseño se obtienen haciendo uso de las siguientes expresiones.

$$a = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T}{T_a}; & \text{si } T < T_a \\ \beta c; & \text{si } T_a \leq T < T_b \\ \beta c p \left(\frac{T_b}{T} \right)^2; & \text{si } T \geq T_b \end{cases}$$

Donde

$$p = k + (1-k) \left(\frac{T_b}{T} \right)^2$$

$$\beta = \begin{cases} 1 - \left[1 - \left(\frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda \right] \frac{T}{T_a}; & \text{si } T \leq T_a \\ \left(\frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda; & \text{si } T_a < T < \tau T_b \\ 1 + \left[\left(\frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda - 1 \right] \left(\frac{\tau T_b}{T} \right)^\epsilon; & \text{si } T \geq \tau T_b \end{cases}$$

El factor de reducción β considera el amortiguamiento suplementario (mayor que 0.05) por efectos de interacción suelo-estructura o del uso de disipadores de tipo viscoso en este caso. Cuando no se toma en cuenta la interacción suelo-estructura $\beta = 1$

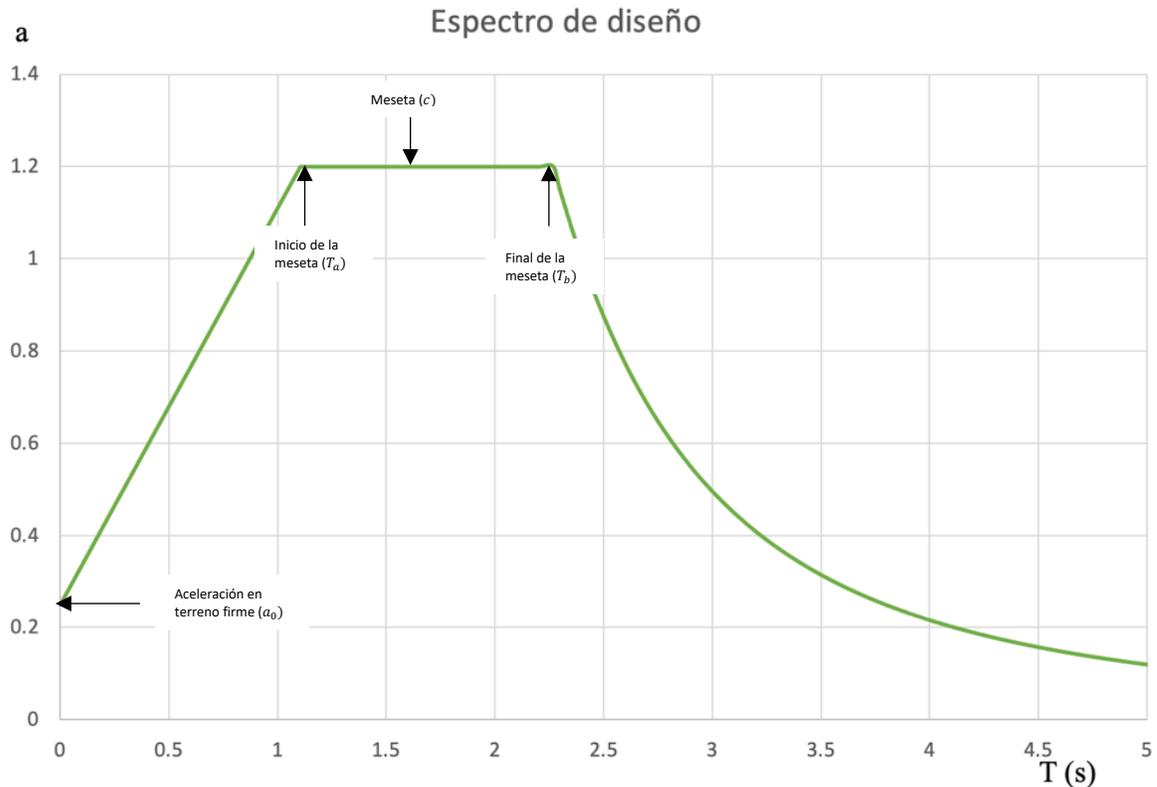


Figura 3.5.3. Parámetros de un espectro de diseño.

Recientemente las NTC han incorporado el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID), el cual es un software destinado a la obtención de espectros de diseño, sus parámetros y los periodos dominantes de vibración de diversos sitios en la Ciudad de México al introducir las coordenadas del sitio de interés. Debido el SASID y las NTC se limitan a la Ciudad de México existen otras normativas aplicables al resto del país, tal es el caso del Manual de Obras Civiles (MDOC) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que incorpora información y experiencia recabada a lo largo de los años por la CFE en sus diversos trabajos de investigación, diseño, ejecución y operación a lo largo y ancho de México. Dicha información ha sido editada desde 1969 y mantiene una última versión vigente del año 2015. Se divide en tres grandes secciones: A. Hidrotecnia, B. Geotecnia y C. Estructuras. La capítulo dedicado al diseño por sismo cuenta también con un software llamado Programa de Diseño Sísmico (PRODISIS) que puede servir de guía para consultar espectros de diseño en toda la republica al presentar las coordenadas correspondientes.

Cuando se trabaja fuera de la Ciudad de México se aplican los criterios del Manual de Obras Civiles de la CFE, cuando no es así, los criterios a tomar deben ser los de las Normas Técnicas Complementarias a excepción de que el proyecto a ejecutar corra a cargo de la CFE o tenga relación con el sector industrial o energético.

4. Sitios de estudio

Particularmente la zona oriente de la Ciudad de México se ha caracterizado por tener uno de los suelos más vulnerables a hundimientos. Entre los límites de las alcaldías Iztacalco y Venustiano Carranza (Viaducto Río de La Piedad y Avenida Río Churubusco) existen suelos altamente compresibles con espesores superiores a 50.0m, velocidades de onda de corte cercanas a 80 m/s y periodo dominante de vibración de 4.0 s.

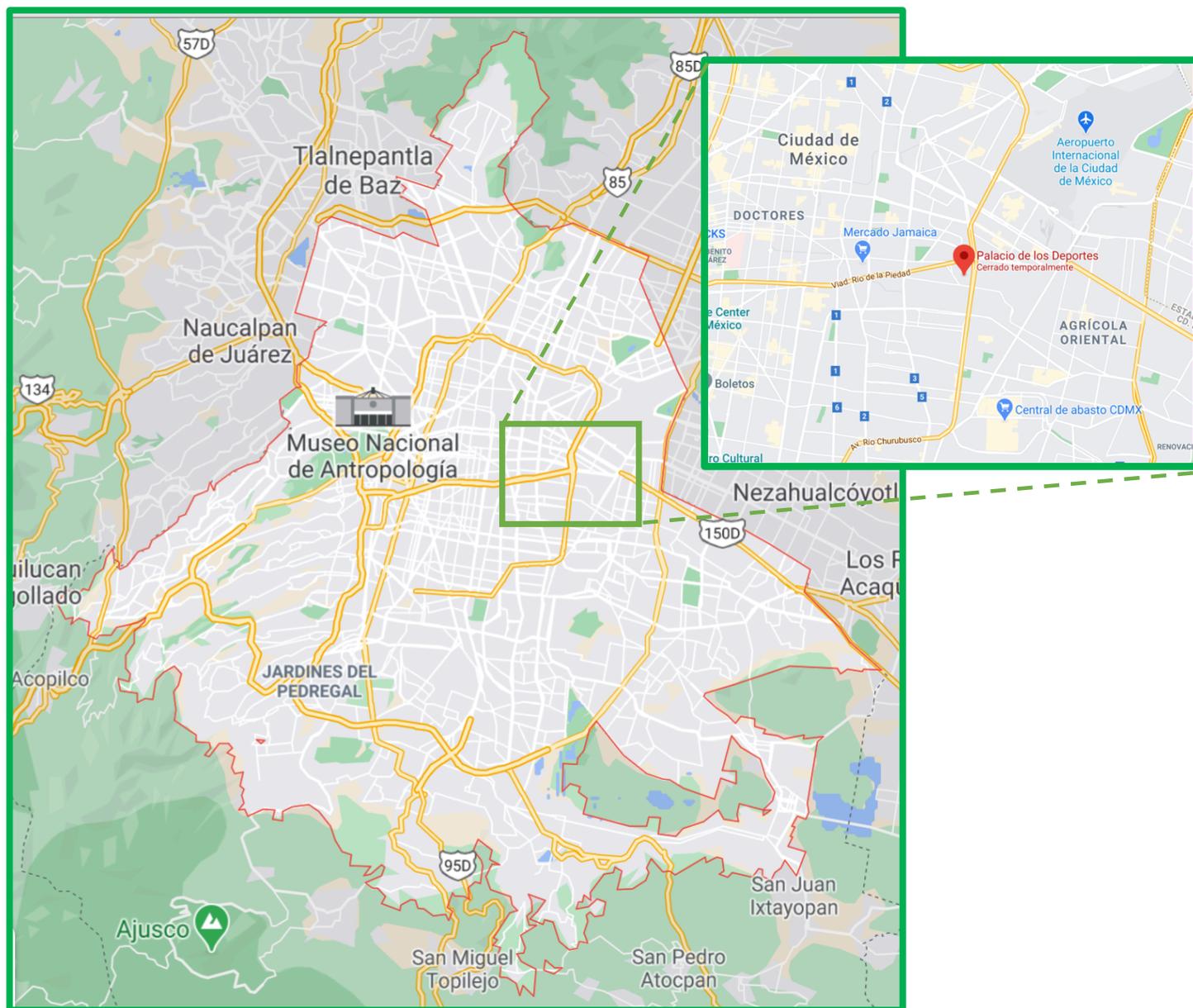


Figura 4.1 Sitio de estudio

El promedio de hundimiento anual ronda los 15.0 cm/año que, si bien representa menos de la mitad del máximo hundimiento anual registrado en la ciudad, es un hundimiento considerable que merece atención. El sitio de interés posee varios bancos de nivel superficial monitoreados por el SACMEX a su alrededor, a continuación, se muestra una

figura satelital con la ubicación de los diferentes bancos circundantes, los cuales están ubicados dentro de un radio de aproximadamente 2km.

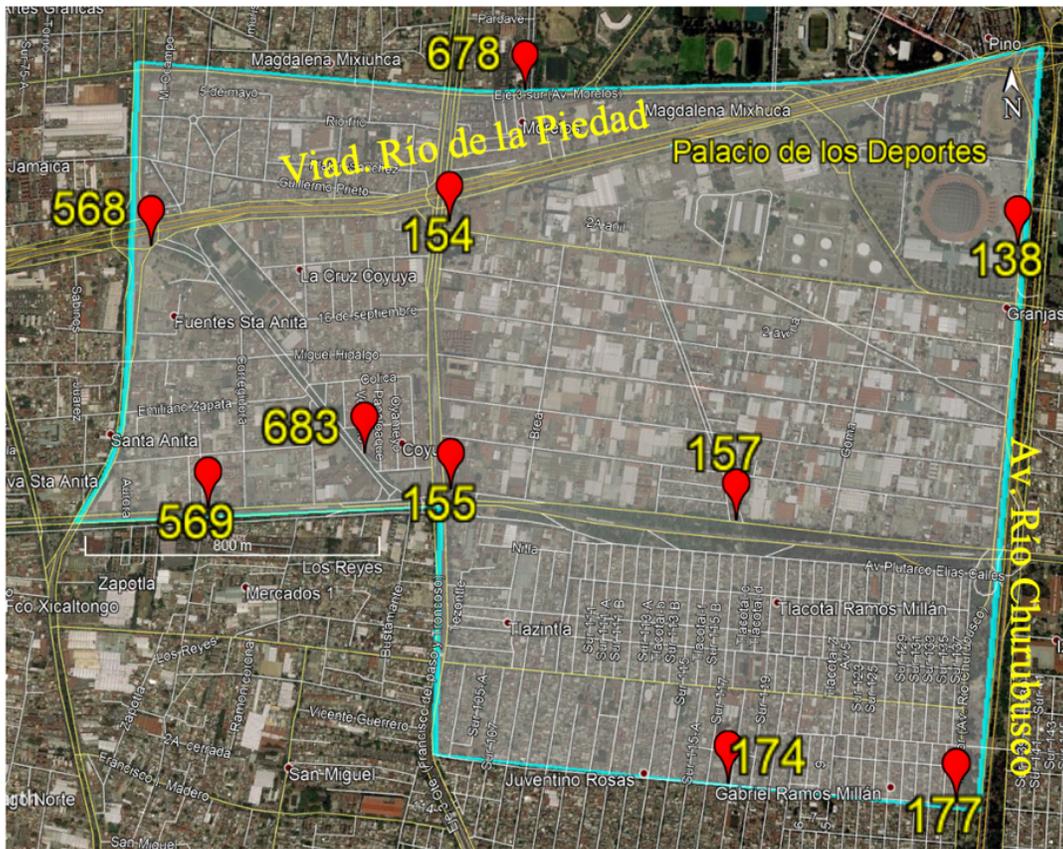


Figura 4.2. Bancos de nivel instalados alrededor del sitio de estudio.

Estos bancos han sido monitoreados periódicamente, y poseen datos que permiten determinar la velocidad de hundimiento, así como los periodos de sitio. En las siguientes páginas se abordará mas detenidamente cada aspecto, así como sus implicaciones y relación con las propiedades sísmicas del sitio.

4.1 Hundimiento regional

En el año 1925 en una sesión celebrada por la Asociación de Ingenieros y arquitectos de México, el presidente honorario Roberto Gayol y Soto advirtió acerca del fenómeno de hundimiento al que nuestra ciudad estaba siendo sometido, pues presento las nivelaciones realizadas a colectores del sistema de saneamiento del Sistema de Drenaje de la Ciudad de México, del cual había sido nombrado miembro un año antes. En aquella sesión el ingeniero Gayol demostró que aquellos colectores habían sufrido un hundimiento de mas de medio metro desde 1898, en conjunto con el área urbana circundante. Sus estudios tenían como base el nivel que existía en la Plaza de Seminario y otro en el monumento dedicado Don Enrico Martínez, la conclusión a la que llego Gayol fue alarmante, nuestra ciudad se estaba hundiendo. La necesidad de contar con bancos confiables de medición fue inminente, por lo cual se empezaron a hacer mediciones desde un afloramiento de roca volcánica, ubicado en el atrio de la iglesia de Atzacolco, hasta el punto bajo del llamado

calendario azteca, montado en ese entonces en la torre poniente de la Catedral Metropolitana, años después se demostró que las mediciones efectuadas allí tenían un error, pues dicho afloramiento no era más que un bloque de roca. Desde 1936 la Secretaría de Recursos Hidráulicos publicó información periódica referente a las nivelaciones topográficas de la zona centro de la Ciudad de México en su boletín de mecánica de suelos, que abarcaba mediciones en los cambios de niveles piezométricos. El último de estos boletines data de 1986.

A fin de estudiar el nivel de asentamientos presentados en el Valle de México a lo largo de varios años, se analizaron las mediciones hechas a 2215 bancos distribuidos en todo el valle, los cuales están a cargo de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH). La información recabada se presenta en la siguiente gráfica hundimiento-tiempo para aquellos bancos ubicados en zona II y III, donde se encuentran aquellos suelos susceptibles a consolidación.

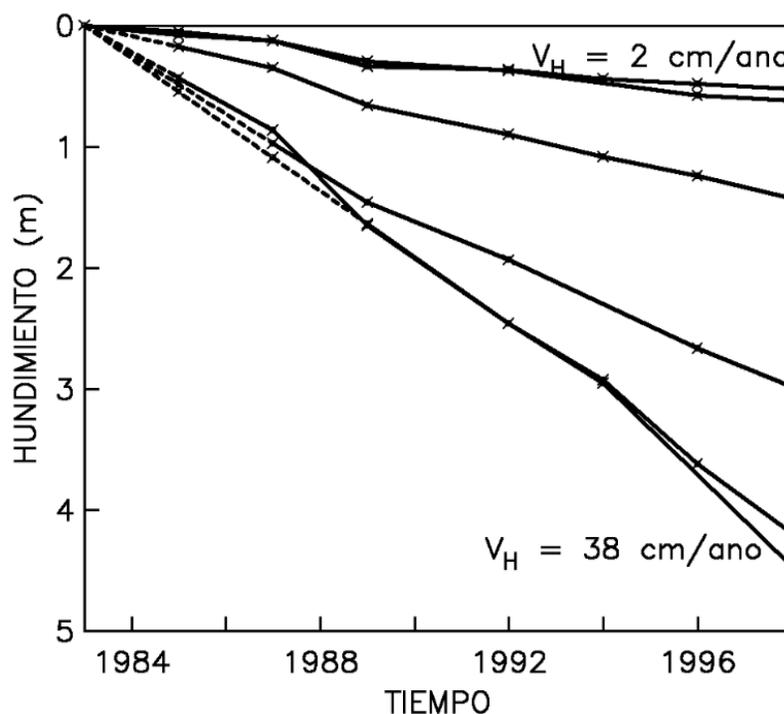


Figura 4.1.1. Evolución del hundimiento en el Valle de México.

Durante los 15 años de observación se puede apreciar que las velocidades de hundimiento van desde los 2 cm/año hasta los 38 cm/año , que en el caso más crítico representan hundimientos de más de 4m en alguna de las zonas en observación. Otra característica de esta evolución es su carácter errante, es decir, la variación en la pendiente de los hundimientos no es la misma a lo largo de los años de registro. El hundimiento no presenta velocidades constantes.

Cabe señalar que los sitios que presentan mayores hundimientos a lo largo de todos estos años de observación son aquellos que se ubican al oriente de la CDMX. Mientras que aquellos sitios en donde la velocidad de hundimiento esta entre los $41 \text{ y } 49 \text{ cm/año}$ corresponden a lugares donde existen amplios espesores de depósitos arcillosos y en los cuales la historia de carga es mínima.

Así pues, si accedemos al sitio web del SEHEDIS podemos encontrar los distintos bancos en operación con tan solo insertar las coordenadas geográficas o UTM, la siguiente gráfica muestra la evolución del hundimiento en los últimos 40 años, así como una proyección del futuro comportamiento para las próximas décadas.

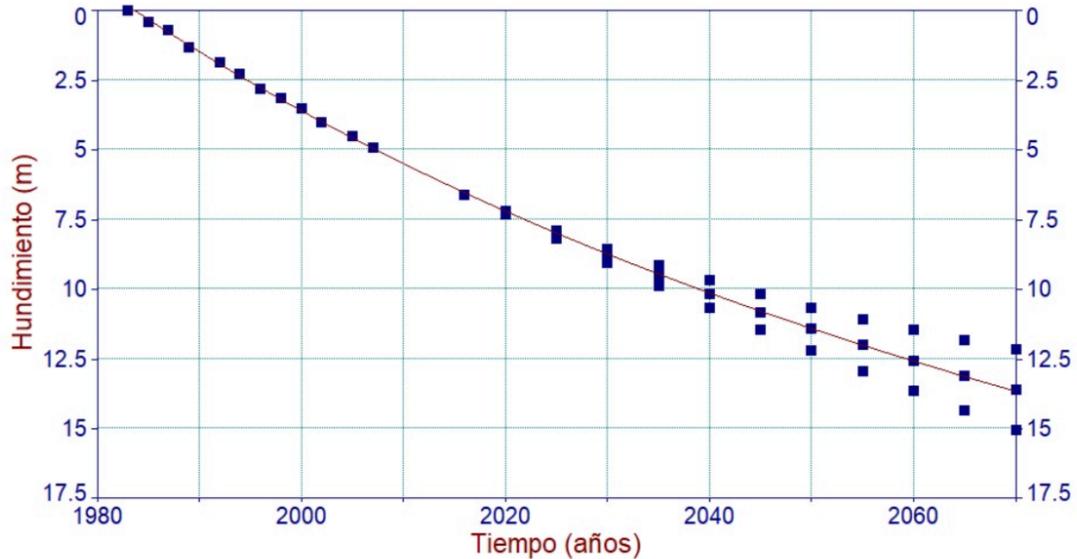


Figura 4.1.2. Evolución del hundimiento en zona aledaña al Palacio de los deportes. Banco 138 - B(S02E03)04.

La construcción de cada curva hasta el año 2016 se basa en la obtención de datos directos de cada nivel. Al tener un registro de los hundimientos para cada año monitoreado y el tiempo transcurrido entre cada uno, es posible obtener un valor promedio en centímetros por año.

A partir del año 2016 es necesario hacer una predicción del comportamiento futuro, que es dependiente de los registros tomados con anterioridad y de una función matemática que se ajuste de la mejor forma posible y así estimar la evolución. Las primeras proyecciones obedecían a un modelo matemático de carácter lineal, sin embargo, los registros tomados en el 2016 mostraron que dichos modelos no se ajustaban a la realidad.

Las ecuaciones que mejor se adaptaron a la realidad fueron las de tipo racional del tipo.

$$f(x) = \frac{P(x)}{Q(x)}$$

Este tipo de ecuaciones se comportan de la siguiente manera

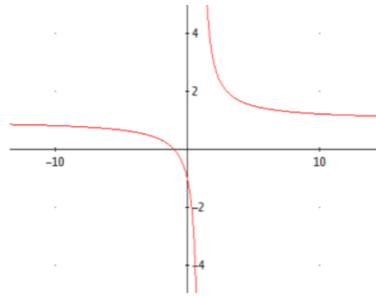


Figura 4.1.3. Función racional.

De manera que la rama ubicada en el primer cuadrante es la que se adecua más a la estimación del hundimiento futuro.

La siguiente tabla muestra la velocidad de hundimiento de los bancos circundantes a nuestro sitio de estudio desde el año 1983 hasta el 2016.

Sitio	569	683	174	177	155	157	568	154	678	138
Velocidad de hundimiento cm/año	15.80	16.23	16.31	17.12	18.63	18.19	18.92	19.24	18.99	20.72

Tabla 4.1.1. Comparación del promedio de velocidades de hundimiento (1983-2016).

El promedio de velocidad de hundimiento para la zona es de 18 cm/año al considerar los 10 bancos. La siguiente gráfica muestra el comportamiento promedio de la zona, considerando el comportamiento particular de cada banco entre los años 1983 y 2016.

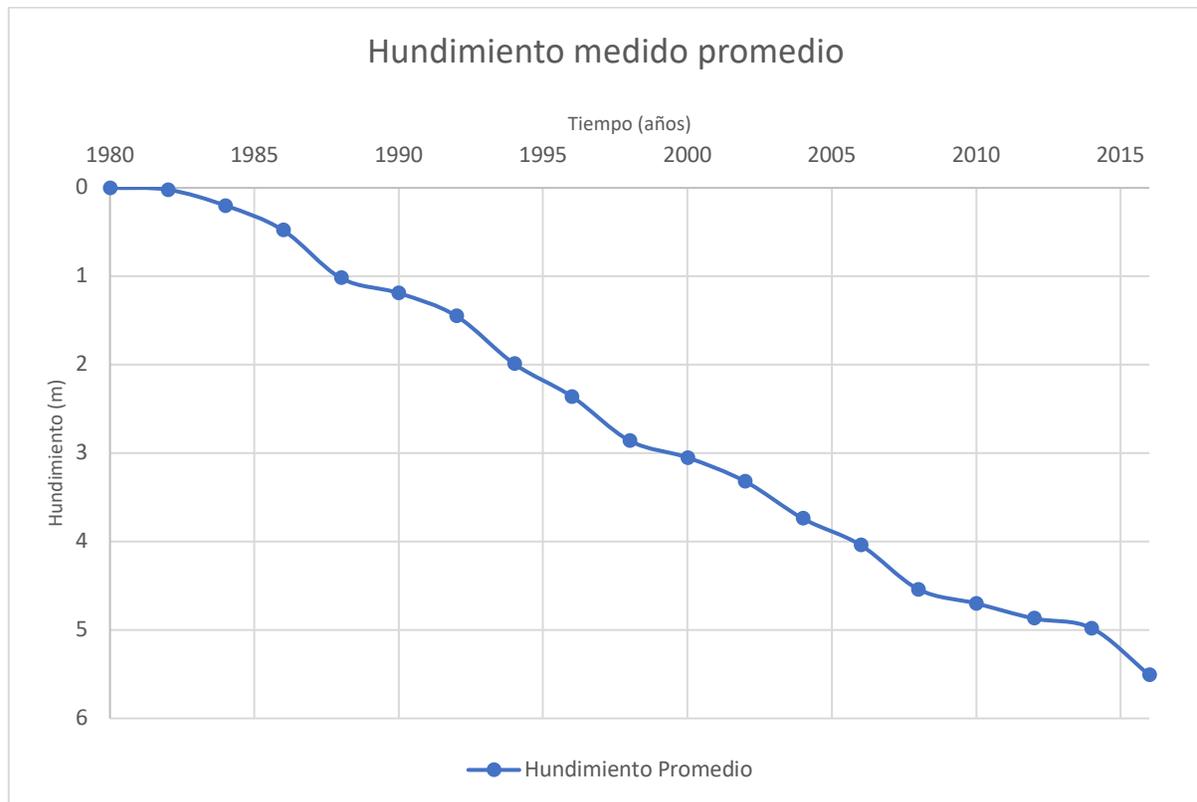


Figura 4.1.4. Hundimiento medido promedio en la zona (1983-2016).

La distancia promedio entre los bancos es de aproximadamente 900m de distancia entre cada uno, la información con la cual se proyectó la curva fue obtenida de la plataforma del SEHEDIS.

4.2 Efectos en el periodo

Como se trató anteriormente el periodo de vibración de suelo esta asociada con el espesor del depósito y con la velocidad de propagación de ondas de corte. Esta relación se resume en la siguiente ecuación:

$$T_s = \frac{4H}{V_s}$$

Donde

T_s (s)	Periodo de vibración del suelo
H (m)	Espesor de estrato de suelo compresible
V_s (m/s)	Velocidad de propagación de ondas de corte

La disminución en el estrato compresible de los depósitos trae consigo un aumento en la velocidad de propagación de ondas de corte, por lo cual el periodo de sitio se ve afectado y tiende a una disminución. Sin embargo, para conocer la aceleración a la que estará sujeto un suelo como el del sitio en estudio es recomendable construir espectros de diseño sísmico evolutivos que tomen en cuenta los cambios en las propiedades de los suelos con el paso del tiempo.

La siguiente tabla muestra los diez bancos analizados, su ubicación en coordenadas geográficas y los periodos dominantes de vibración obtenidos del SASID para el año 2017, SASID para el año 2020 y la prospección del SEHEDIS para el año 2020.

Sitio	Coordenadas		SASID 2017 Ts (s)	SASID 2020 Ts (s)	SASID 2070 Ts (s)
	Latitud	Longitud			
569	19.4043	-99.0982	2.75	2.8	3.05
683	19.3996	-99.1155	2.89	3	3.17
174	19.3917	-99.1061	3.1	3	3.36
177	19.3912	-99.1004	3.27	3.2	3.5
155	19.3986	-99.1132	2.95	3	3.25
157	19.3978	-99.1058	3.2	3.4	3.56
568	19.4047	-99.1212	2.76	3	2.97
154	19.4052	-99.1133	2.99	3.1	3.25
678	19.4085	-99.1113	3.05	3.1	3.31
138	19.4043	19.4043	3.47	3.9	3.76

Tabla 4.2.1. Comparación de periodos de vibración.

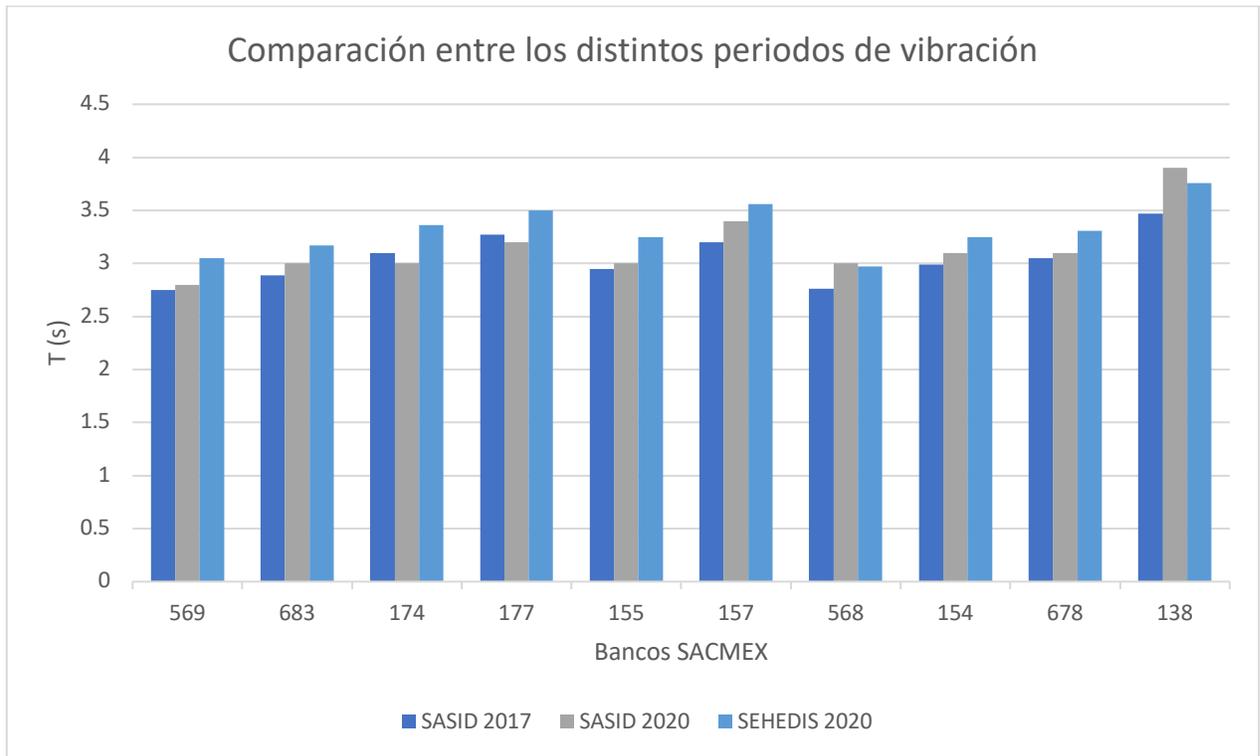


Figura 4.2.1. Comparación de periodos de vibración.

De la comparación resulta que la tendencia en el periodo de vibración para casi todos los bancos es menor por parte del SASID con respecto al SEHEDIS para el año 2017, dicha diferencia ronda el 10%, sin embargo, para la prospección del año 2020 las diferencias son menores, a excepción del sitio 138 en el cual se invierten los papeles.

La empresa Sísmica de Suelos realizó pruebas de exploración down hole y vibración ambiental a un costado del Palacio de los Deportes

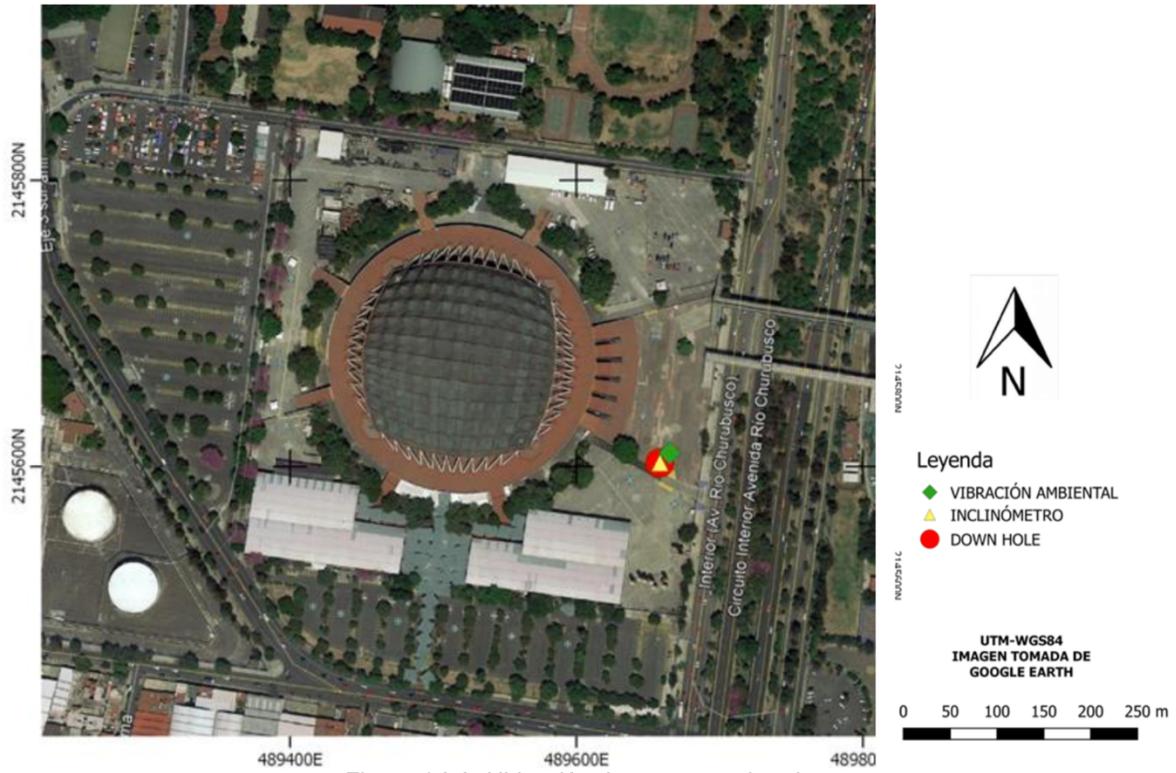


Figura 4.2.2. Ubicación de puntos explorados.

Exploración	Coordenadas UTM	
	Este (m)	Norte (m)
Down Hole	489,656.7	2,145,603.0
Vibración Ambiental	489,656.7	2,145,603.0

Tabla 4.2.2. Coordenadas de puntos explorados.

El periodo del sitio obtenido a partir de los registros de vibración ambiental se muestra en la siguiente gráfica.

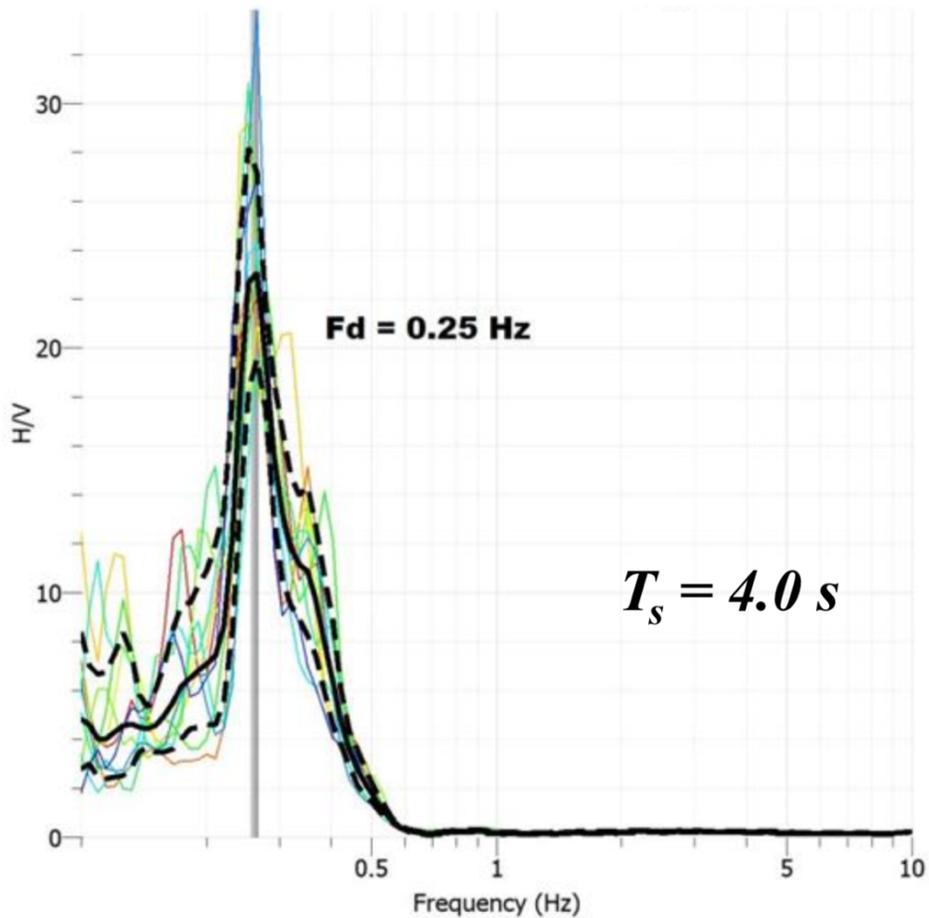


Figura 4.2.3. Cocientes espectrales obtenidos de los registros de vibración ambiental.

De la información recabada se pudo obtener un periodo de vibración

$$T_s = 4s$$

De la tabla 4.2.1 se obtuvieron periodos de vibración promedio tomando en cuenta los 10 bancos y el obtenido mediante vibración ambiental.

SASID 2017 T_s (s)	SASID 2020 T_s (s)	SEHEDIS 2070 T_s (s)	Vibración Ambiental T_s (s)
3.043	3.15	3.318	4

Tabla 4.2.3. Comparación de los distintos periodos de sitio.

La comparación de los periodos obtenidos por la prueba de vibración ambiental con respecto a los del SASID y SEHEDIS, se muestra a continuación.

V.A vs SASID 2017	V.A vs SASID 2020	V.A vs SEHEDIS 2070
-24%	-21%	-17%

Tabla 4.2.4. Comparación de los periodos con respecto al obtenido mediante vibración ambiental

4.3 Efectos en la respuesta sísmica y comparación con la normatividad vigente

El Valle de México es especialmente vulnerable a los sismos de origen subductivo, originados en la costa del Pacífico al deslizarse la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana, fenómeno que sucede frente a las costas de los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

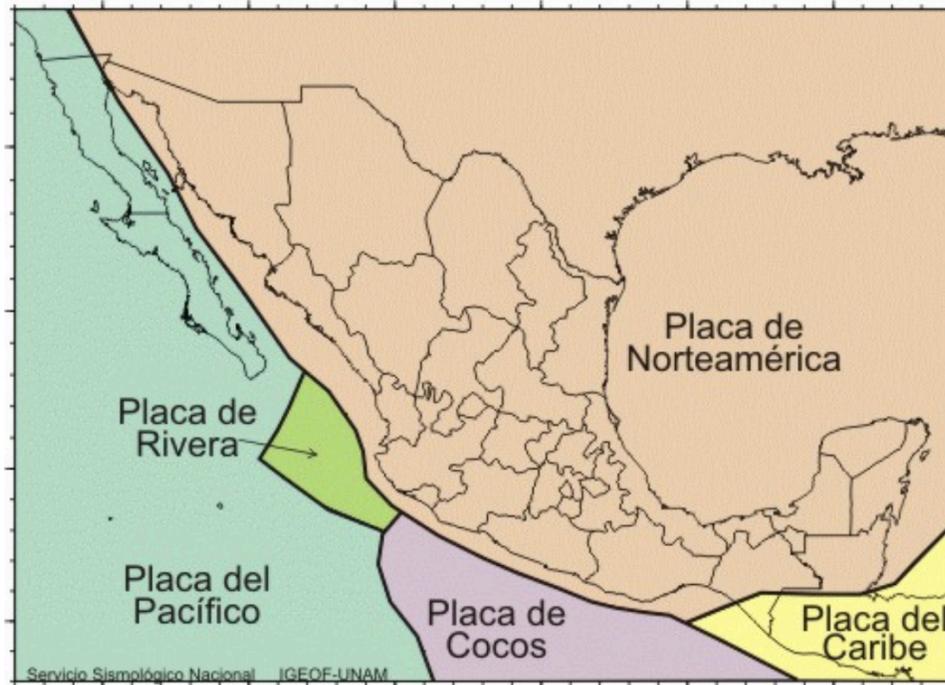


Figura 4.3.1. Placas tectónicas que interactúan en la República Mexicana.

Este tipo de eventos sísmicos tienden a tener periodo de vibración que ronda los 2s y frecuencias cercanas a 0.5Hz. Por lo cual sitios que poseen un periodo de vibración similar corren el riesgo de presentar un fenómeno de resonancia. La resonancia es un efecto de amplitud en el sistema oscilante y ocurre cuando este sistema recibe la influencia de una fuerza periódica exterior, en este caso un sismo, con una frecuencia similar a la del cuerpo mismo, en este caso el suelo. La frecuencia y el periodo de vibración se relacionan mediante la siguiente ecuación.

$$f = \frac{1}{T_s}$$

Así pues, los sistemas entrarán en resonancia cuando las frecuencias o periodos sean iguales. Las normas técnicas complementarias para el diseño por sismo (NTC-DS, 2004, 2017) asignan coeficientes sísmicos mayores a aquellos suelos con periodos de vibración cercanos a 2s.

A continuación, se muestra una tabla con los coeficientes sísmicos del sitio de interés.

Sitio	SASID 2017 (g)	SASID 2020 (g)	SEHEDIS 2020 (g)	SEHEDIS 2070 (g)
569	1.1	1.24	1.16	1.33
683	1.09	1.2	1.07	1.39
174	0.87	1.1	0.91	1.15
177	0.8	1.02	0.8	1.06
155	0.99	1.09	1	1.33
157	0.78	0.91	0.8	1.05
568	1	1.07	1.22	1.42
154	0.86	1.01	1	1.26
678	0.81	0.97	0.95	1.22
138	0.64	0.64	0.80	0.98

Tabla 4.3.1. Comparación de los coeficientes sísmicos.

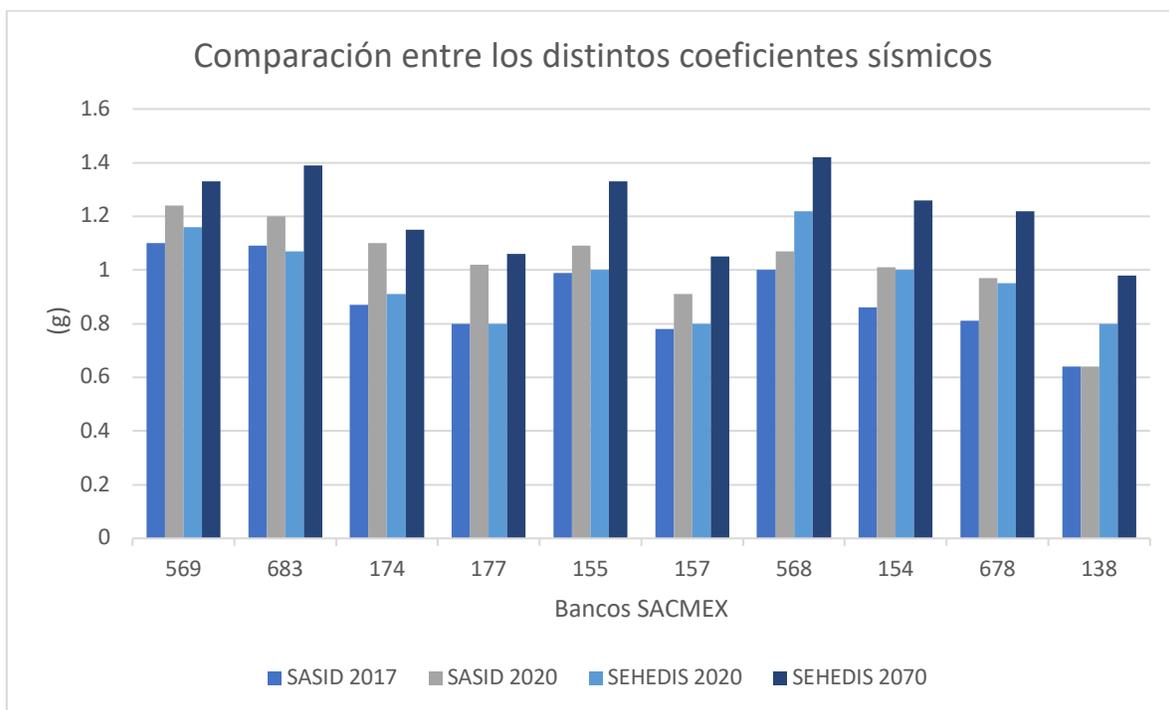


Figura 4.3.2. Comparación de los coeficientes sísmicos.

La comparación entre los coeficientes del SASID para el año 2017 son menores a los propuestos por el SEHEDIS, sin embargo, las adecuaciones hechas para el SASID para el año 2020 atenúan dicha diferencia, a excepción del sitio 138 el cual permanece igual. La diferencia entre los coeficientes sísmicos en términos de porcentuales se enlista en la siguiente tabla.

Sitio	SASIS 2017 vs SEHEDIS 2070	SASIS 2020 vs SEHEDIS 2070
569	-17%	-7%
683	-22%	-14%
174	-24%	-4%
177	-25%	-4%
155	-26%	-18%
157	-26%	-13%
568	-30%	-25%
154	-32%	-20%
678	-34%	-20%
138	-35%	-35%

Tabla 4.3.2. Comparación de los coeficientes sísmicos.

Conforme sean modificadas de las propiedades dinámicas en el suelo la respuesta cambiará. Los registros acelerométricos actuales y sus respectivas evoluciones permiten hacer una proyección de los espectros de diseño ante eventos sísmicos particulares.

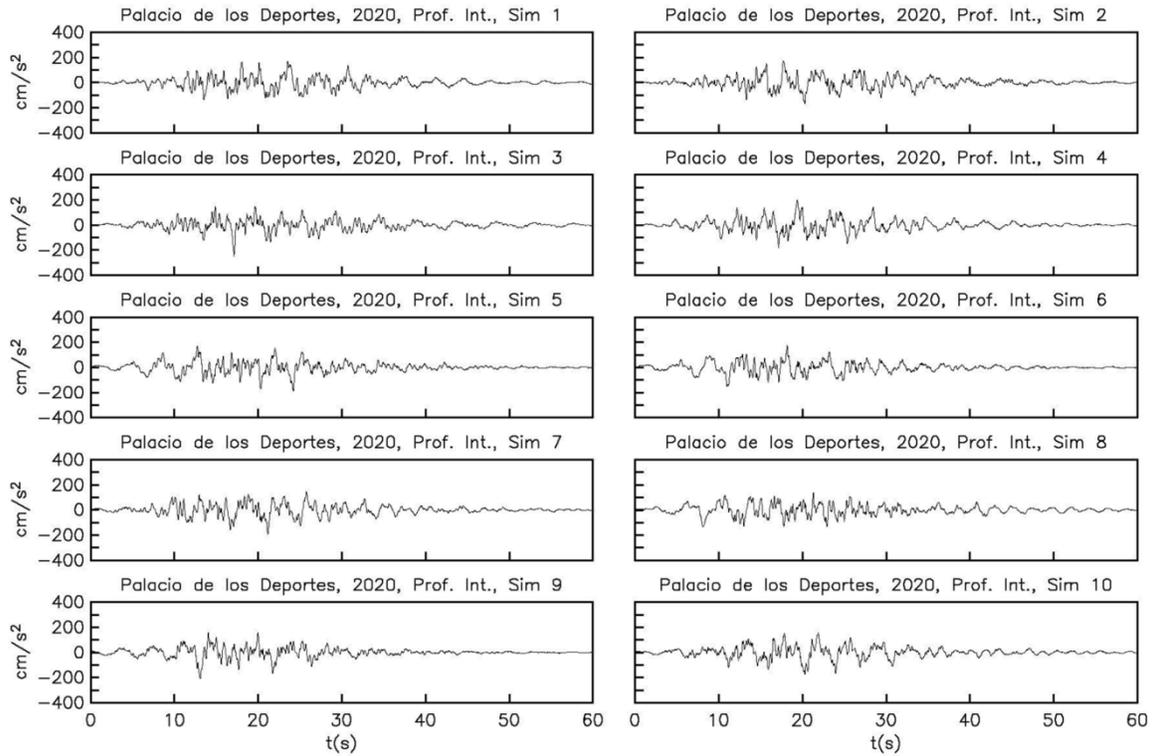


Figura 4.3.3. Acelerogramas por sismo interplaca en la superficie del terreno (2020).

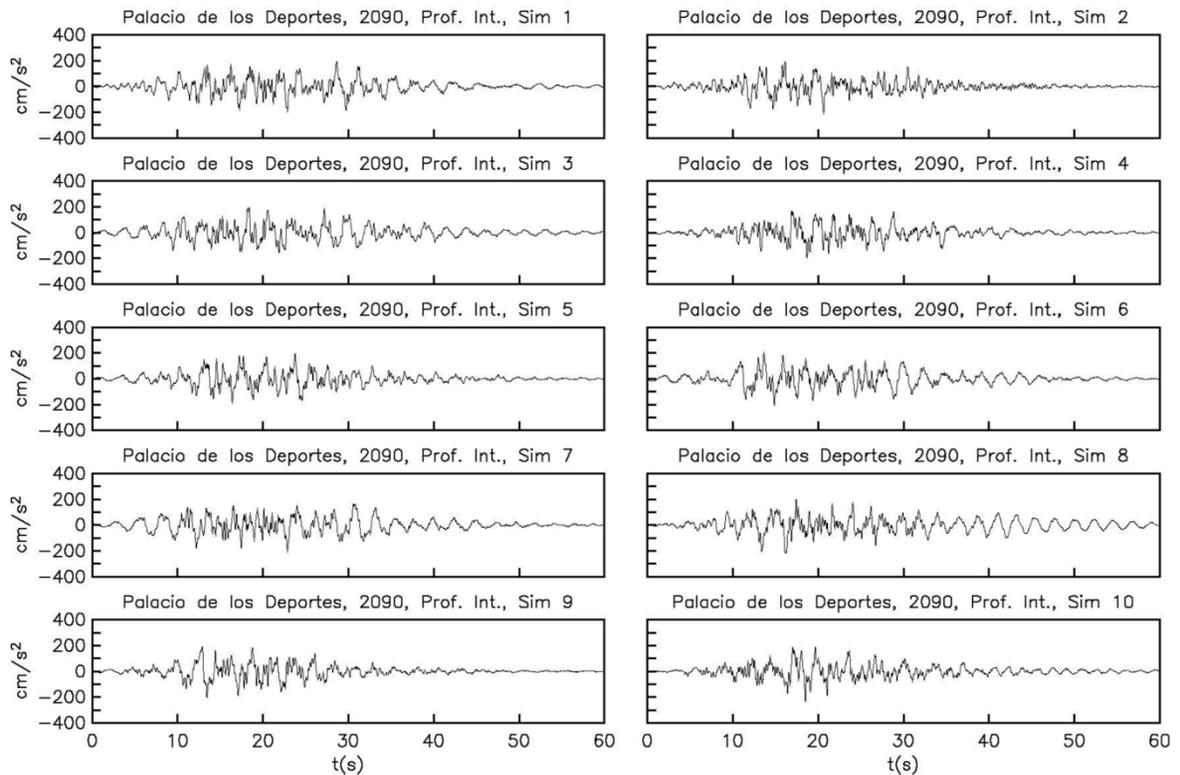


Figura 4.3.4. Acelerogramas por sismo interplaca en la superficie del terreno (2090).

Como se trató en la sección 3.2 es posible construir espectros de respuesta a partir de distintos acelerogramas, y con los primeros obtener espectros de diseño con las distintas consideraciones como lo son el amortiguamiento y los factores de comportamiento sísmico.

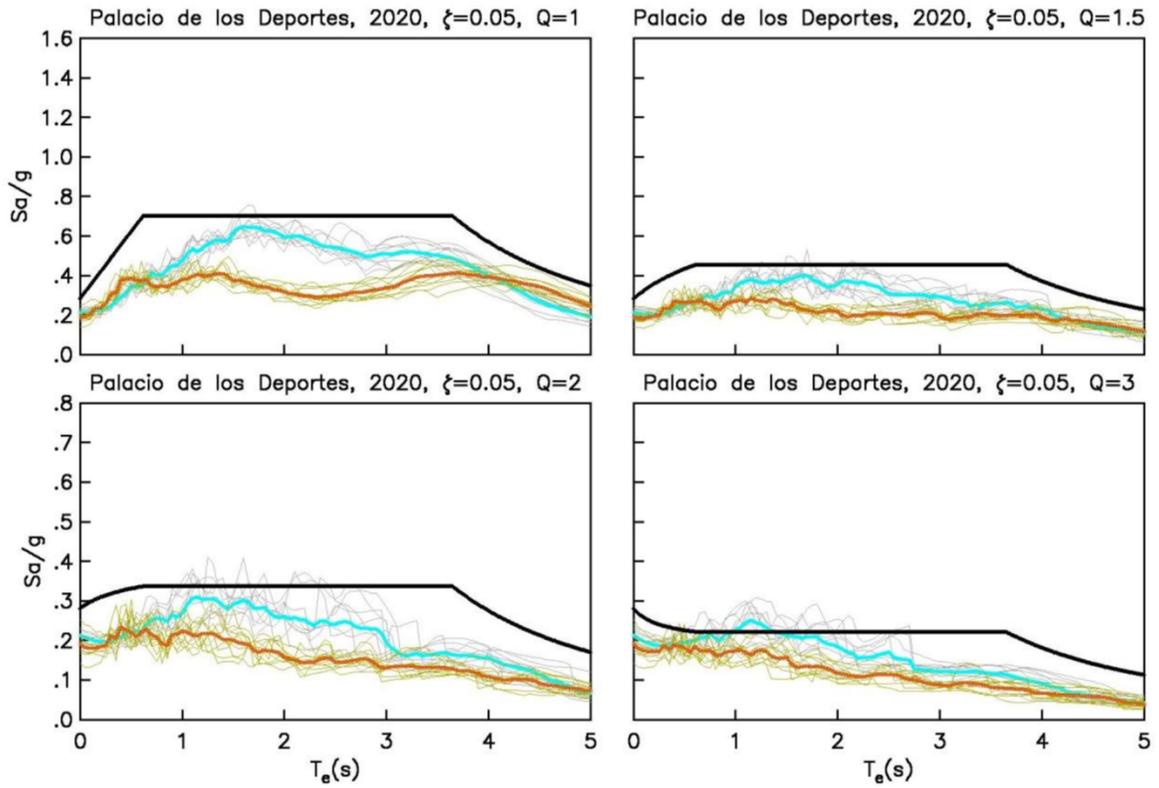


Figura 4.3.5. Espectros de respuesta y de diseño (2020).

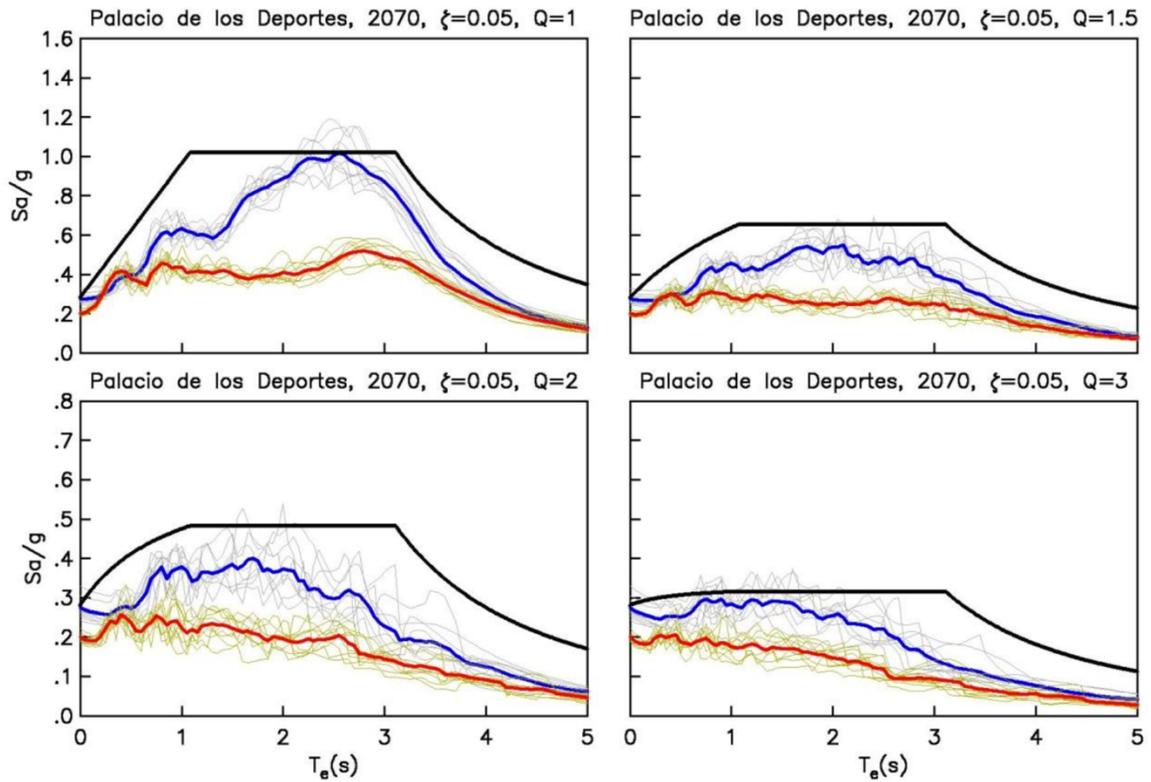


Figura 4.3.6. Espectros de respuesta y de diseño (2070).

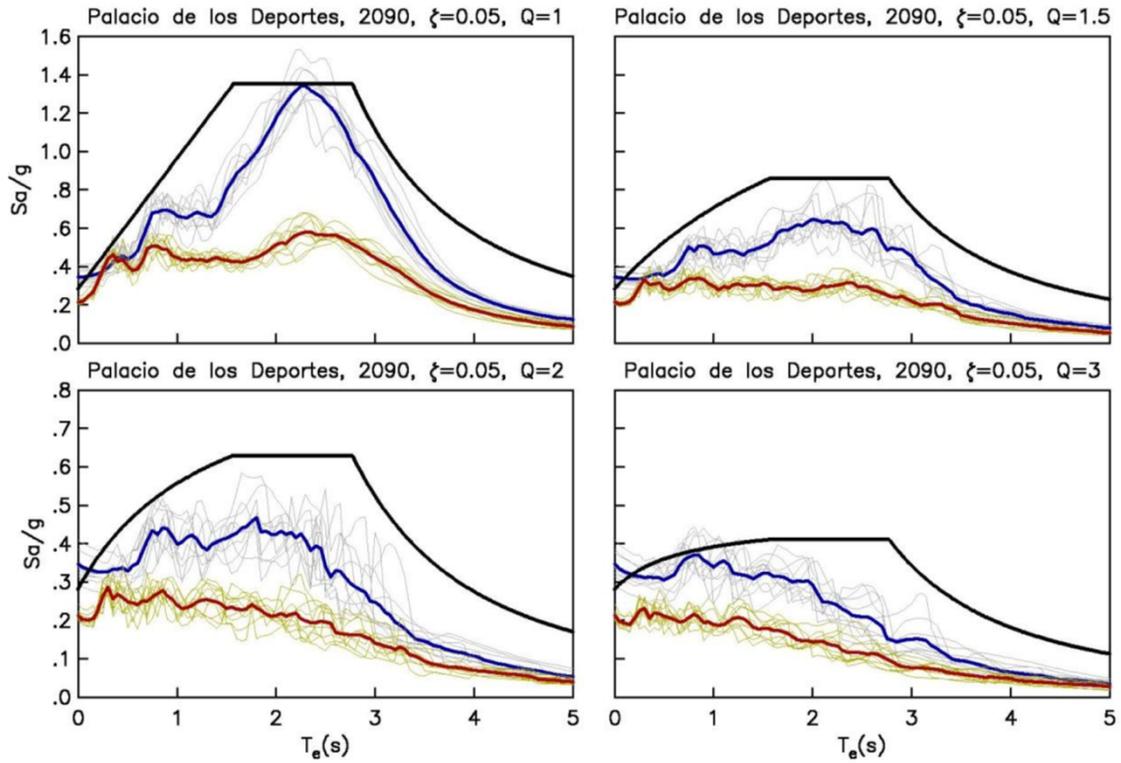


Figura 4.3.7. Espectros de respuesta y de diseño (2090).

La evolución en los parámetros básicos de diseño es evidente y queda constatada de mejor manera en la siguiente gráfica comparativa.

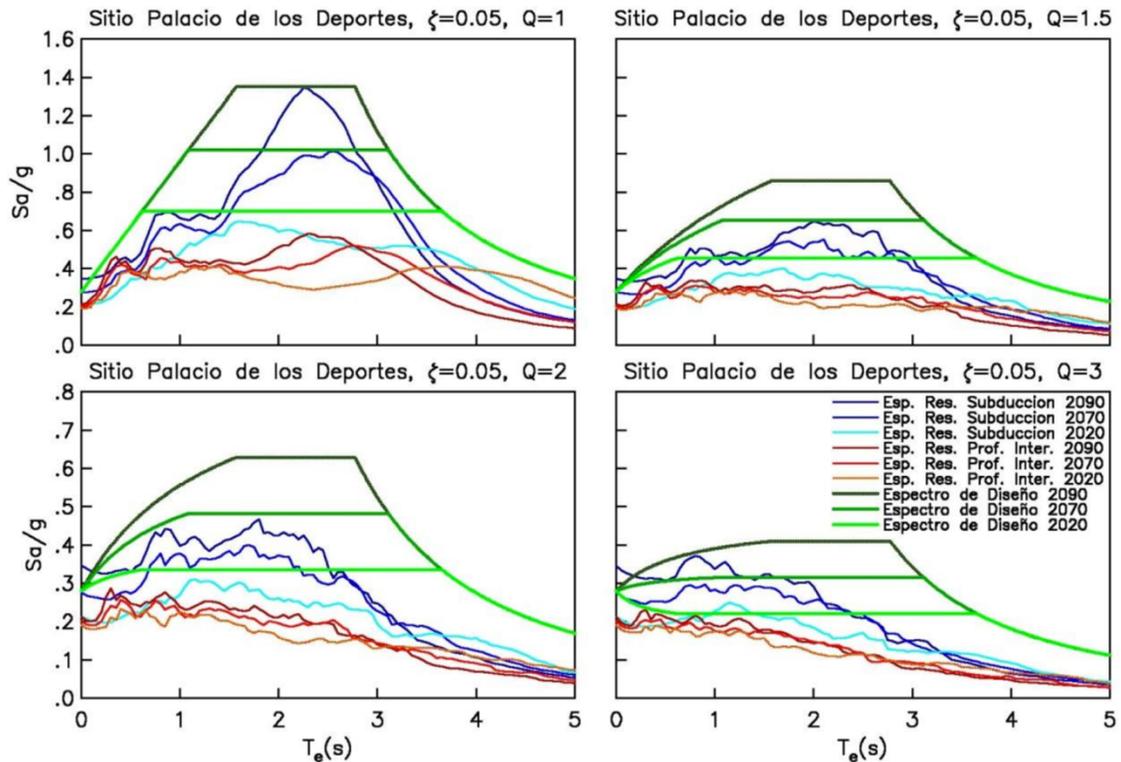


Figura 4.3.8. Comparativa entre los espectros de respuesta y de diseño para los años 2020, 2070 y 2090.

Considerando un factor de comportamiento sísmico $Q=1$, factor de resistencia $R=1$, y amortiguamiento estructural $\xi = 5\%$ para estructuras del grupo B, el diseño de los espectros transparentes de los años 2020, 2070 y 2090 luce de la siguiente manera

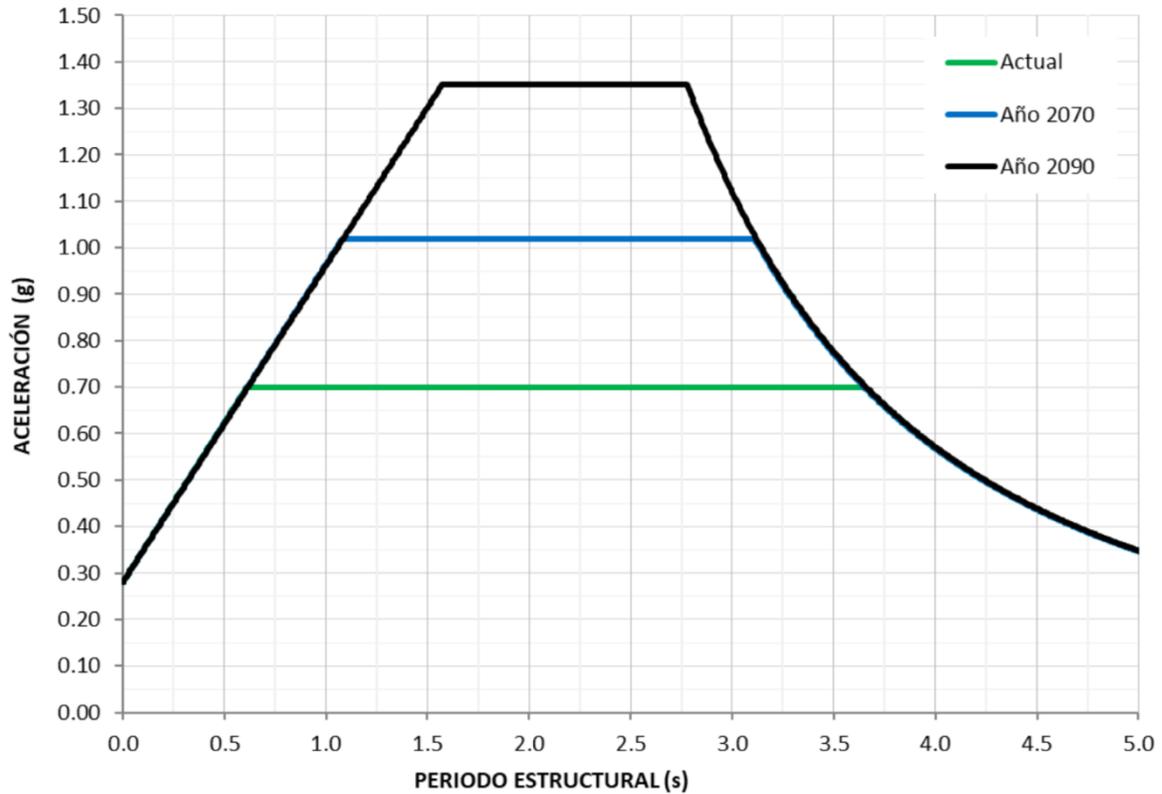


Figura 4.3.9. Comparativa entre los espectros de diseño transparentes para los años 2020, 2070 y 2090.

Parámetros	Q=1		K=1		$\xi = 5\%$	
	$a_0 (g)$	$c (g)$	$T_a (s)$	$T_b (s)$	k	β
Actual	0.28	0.70	0.61	3.65	0.85	1.0
2070	0.28	1.02	1.08	3.11	0.80	1.0
2090	0.28	1.35	1.57	2.78	0.76	1.0

Tabla 4.3.3. Parámetros de diseño transparentes para los años 2020, 2070 y 2090

5. Conclusiones

Las condiciones geológicas a las que ha estado expuesto nuestro territorio han resultado en un terreno complicado en muchos aspectos. Desde que nos hemos asentado sobre lo que era un lago, nos hemos visto en la necesidad de ingeniarnos de alguna forma la manera en la cual proveernos de las necesidades más básicas del hombre, como lo son la alimentación y la vivienda. Resulta inverosímil creer que después de casi siete siglos de habitar el valle de México aun tengamos que lidiar con la decisión de nuestros antepasados, edificar una ciudad en un lago.

Con el paso de los años la ingeniería mexicana ha logrado comprender de mejor manera lo que conlleva vivir sobre un suelo como el nuestro, aunque lamentablemente a costa de pérdidas humanas. Los estudios hechos en torno a los distintos fenómenos que intervienen e interactúan en la respuesta del suelo frente a cargas y acciones dinámicas han resultado en normatividad que constantemente busca afinarse y adecuarse a la evolución inducida por parte del hombre en el suelo.

Uno de los problemas más serios a los que ha estado sujeto el ser humano desde el comienzo de su historia es la obtención del líquido vital, el cual aún en nuestros tiempos es un tema fundamental que requiere una solución inmediata.

Entre los efectos secundarios de la extracción de agua se encuentra el fenómeno de hundimiento, que como ya se vio se refleja en una reducción de los estratos compresibles, con un incremento anual que va desde 0 a 2.5% en la velocidad de propagación de ondas de corte y una variación que puede considerarse despreciable en el amortiguamiento del material. Sin embargo, existen otras repercusiones que deben ser consideradas de peligro, como lo son la resonancia, fenómeno que bien puede pasar desapercibido en el diseño de alguna construcción, pues algunos parámetros de diseño no toman en cuenta la evolución de las propiedades dinámicas del suelo. Estos cambios pueden presentarse en algún punto de la vida útil de las estructuras que por lo general ronda los cincuenta años y causar daños no previstos, por lo cual es menester incluir dentro del diseño sísmico estructural consideraciones frente a la evolución de las propiedades dinámicas del suelo.

Mucha de la información que se presentó en este trabajo fue obtenido de bases de que poseen datos de instrumentación hecha en décadas anteriores, desgraciadamente está no posee continuidad y sería bueno que hubiese más. Sistemas como el SEHEDIS aportan valiosa información y son un claro ejemplo de que la instrumentación es necesaria para observar la evolución de distintos parámetros a través del análisis de registros periódicos, que en combinación con un adecuado criterio puede resultar en mejoras en la normativa vigente y por ende en proyectos exitosos.

Entre las posibles soluciones se han tratado, existe la de mejorar y darle mantenimiento a la red de distribución de agua, la cual constantemente sufre de fugas y robo por parte de tomas clandestinas, que según el Fondo Nacional de Infraestructura (Fonadin) conlleva pérdidas de alrededor de 41%. Se ha tocado el tema de reducirse la extracción de agua de acuíferos e incrementar su recarga de forma artificial mediante la inyección de agua residual tratada y así estabilizar los abatimientos, de igual forma se han buscado fuentes de abastecimiento alternas. Soluciones como ésta conllevan tiempo y su repercusión podrá verse en un par de años, por lo que cual regresamos a la solución trillada

pero no errónea que desde hace años se nos ha venido inculcando; reducir la demanda mediante un manejo responsable del agua.

En el caso particular del área en estudio se puede constatar que la naturaleza geotécnica de la zona y la consolidación del suelo a la que esta sometido aportan condiciones relevantes para tomarse en cuenta a la hora de realizar el diseño sísmico de las edificaciones, por lo cual es recomendable realizar estudios detallados a fin de garantizar la seguridad de la estructura y sobretodo de los usuarios.

Referencias

- Gobierno del Distrito Federal. (2004). Del Diseño de Cimentaciones. En *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (pp.49-50). Distrito Federal: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- NTC-DS (2017). Gaceta Oficial de la Ciudad de México del 15 de diciembre de 2017. "*Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*".
- Auvinet, G, & Juárez, M. (2011). *Geotechnical characterization of Mexico City subsoil*. XIV Congreso Panamericano de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica.
- SACMEX. (2018). *Diagnóstico, logros y desafíos* . Ciudad de México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- Pino, Y. (2018). *Evolución en la respuesta sísmica de la Ciudad de México*. Ciudad de México.
- González, E., Morán, D., Mori, L. & Martiny, B. (2015). *Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67.
- Mooser, F. (2018). *Geología del Valle de México y otras regiones del país*. Ciudad de México: Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C .
- Arce, J., Layer, P., Martínez, I . & Salinas, J. (2015). *Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67.
- Aguilar, H., Galicia, M., Salazar, M. & Avilés, J. *Cambios en los espectros de diseño sísmico del Valle de México debidos al hundimiento regional* . 19 de diciembre 2020, de Centro de Investigación Sísmica A.C. Sitio web: <https://sismica.com.mx/layout/acervo/cambios-espectros-disenno-siismico-valle-mexico-hundimiento-regional.pdf>.
- SACMEX. (2012). *Programa de gestión integral de los recursos hídricos, visión 20 años* . Ciudad de México: Secretaría del medio ambiente.
- Marsal, R., Hiriart, F. & Sandoval, R. . (1953). *Hundimiento de la Ciudad de México; observaciones y estudios analíticos*. Ciudad de México: Ediciones ICA.
- Rodríguez, J. (2016). *El subsuelo de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Ovando, E.. (2018). *Hundimiento en la CDMX dañan patrimonio arquitectónico, artístico y cultural*. agosto 2020, de Dirección General de Comunicación Social Sitio web: https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_528.html

· Auvinet, G., E. Méndez, y M. Juárez (2017). *El subsuelo de la Ciudad de México*. Vol. III. 3ª edición del libro de Marsal y Mazari. México.

· Reséndiz, D., G. Auvinet, M. Juárez y E. Méndez (2019). *Saving the valley of Mexico from disaster: The need and the method*. SID 703. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM. Enero.