



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio Sísmico sobre la
Subsidencia del Terreno que
Circunda al Puente de los Leones
en la 1ra. Sección del Bosque de
Chapultepec**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Valeria Peña Gaspar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Martín Cárdenas Soto



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

Al proyecto “Estudios geofísicos y geológicos para detectar y caracterizar inestabilidades en el subsuelo de la 1^a Sección del Bosque de Chapultepec” Fondo Mixto CONACyT-GDF No. 188908, por facilitar los datos de este estudio.

Este estudio ha apoyado por los proyectos UNAM-DGAPA; PAPIME-PE103918 y PAPIIT-117119, y parcialmente por el proyecto 266055 convocatoria C0013-2015-03 CONACYT-DST.

Al Departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería, por facilitarme el uso de recursos de infraestructura de la UNAM para la realización de la tesis.

Al Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES, A. C.) quienes amablemente me proporcionaron los datos empleados en este trabajo y que corresponden a una de las estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM), a su cargo desde 1987, que actualmente operan y conservan un total de 81 estaciones sensores de registro acelerométrico con el patrocinio del Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal.

Dedicatoria

A mi familia gracias por todo su apoyo y comprensión. En especial a mi hijo José Carlos por ser el motor de mi vida e iluminar mis días por mas grises que estos sean.

A mi padre José Isabel (†), a mi madre María Elena, a mis hermanos Virginia, Héctor, Carlos e Isaí por todo el cariño, paciencia y amor que me han brindado en la vida.

A mis amigos y compañeros José Antonio, Manuel, Miguel Ángel y Nashielly por su amistad y apoyo en todo momento. Y en general, a todos los que han sido parte de mi vida y me han brindado su amistad y cariño.

A mis sinodales Dr. Antonio Uribe Carvajal, M.C. David Escobedo Zenil, Dr. Jorge Aguirre González, Ing. Martín Vidal García e Ing. Juan Pablo Aguirre Díaz por el tiempo y comentarios para la mejora de este trabajo. A mi director de tesis Dr. Martín Cárdenas Soto por guiarme y ser parte fundamental en la realización de esta tesis, además de todo el apoyo, ayuda y aporte brindado durante todo este tiempo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México en especial a la Facultad de Ingeniería, mi alma mater en la que he tenido la fortuna de formar parte en formación académica, profesional y personal.

Índice general

Agradecimientos	I
Dedicatoria	II
Lista de figuras	v
Resumen	VIII
Abstract	IX
1. Introducción	1
2. Zona de Estudio	6
2.1. Bosque de Chapultepec	6
2.2. Crecimiento Poblacional	11
2.3. Crecimiento Urbano	13
2.4. Estado actual del Acuífero de la CDMX	15
2.5. Hundimiento en la CDMX	17
3. Adquisición y Procesamiento de Datos	19
3.1. Estación Acelerométrica MT50	19
3.1.1. Velocidad de Hundimiento y Espesor de la Capa Compresible	32
3.2. Estimaciones del Periodo de Vibración del Suelo a partir de mediciones de Ruido Ambiental	39
4. Análisis de Resultados	45
4.1. Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D	45
4.2. Cocientes Espectrales H/V	48
4.2.1. Estación Acelerométrica MT50	48
4.2.2. Puente de los Leones	52
5. Conclusiones	54
Bibliografía	55

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IV
A. Datos Sismos Registrados por la Estación MT50	58
B. Mediciones de Ruido Ambiental	60
C. Señal Completa	61
D. Parte Intensa de la Señal	63
E. Parte Final de la Señal	65
F. Velocidad de Hundimiento	67
G. Espesor Compresible	69

Índice de figuras

1.1. Mapa de localización de la Cuenca de México	2
1.2. Zonificación Geotécnica del Valle de México	3
2.1. Mapa de localización del Bosque de Chapultepec	7
2.2. Rasgos de agrietamiento y hundimiento presente en el Puente de los Leones en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.	10
2.3. Crecimiento Poblacional en México desde 1950 a 2015 (Datos tomados <i>INEGI</i> , 2016)	11
2.4. Crecimiento Poblacional en la CDMX de 1900 a 2015 (Datos tomados <i>INEGI</i> , 2016)	12
2.5. Relación del Crecimiento Urbano en la CDMX, considerando las viviendas particulares habitadas (Datos tomados <i>INEGI</i> , 2017)	14
2.6. Relación de la extracción de agua en el subsuelo del Valle de México (Modificado de Tamez, 1992)	16
3.1. Ubicación de las estaciones (puntos marrón) de la Red Acelerométrica de la Ciudad de México (Modificada de CIRES, 2016)	20
3.2. Localización de los epicentros registrados por la estación MT50.	21
3.3. Procesamiento de la señal completa del acelerograma registrado en la estación MT50 el 30 de septiembre de 1999.	23
3.4. Cocientes espectrales de los sismos registrados en la estación MT50 de 1988 a 2017, considerando la señal completa de los acelerogramas analizados.	24
3.5. Evolución del periodo de vibración del suelo con el tiempo considerando la señal completa de los acelerogramas analizados.	25
3.6. Procesamiento de la parte intensa de la señal del acelerograma registrado en la estación MT50 el 30 de septiembre de 1999.	26
3.7. Cocientes espectrales de los sismos registrados en la estación MT50 de 1988 a 2017, considerando la parte intensa de la señal.	27
3.8. Evolución del periodo de vibración del suelo con el tiempo considerando la parte intensa de los acelerogramas analizados.	28
3.9. Procesamiento de la parte final de la señal del acelerograma registrado en la estación MT50 el 30 de septiembre de 1999.	29

3.10. Cocientes espectrales de los sismos registrados en la estación MT50 de 1988 a 2017, considerando la parte final de la señal.	30
3.11. Evolución del periodo de vibración del suelo con el tiempo considerando la parte final de la señal.	31
3.12. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, considerando la señal completa de los sismos registrados en la estación MT50.	33
3.13. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, considerando la parte intensa de los sismos registrados en la estación MT50.	35
3.14. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, considerando la parte final de los sismos registrados en la estación MT50.	37
3.15. Ubicación de las mediciones de ruido ambiental dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec (círculos amarillos) y estación acelerométrica MT50 (cuadro verde).	39
3.16. Cocientes espectrales de las mediciones de ruido ambiental realizadas en Primera Sección del Bosque de Chapultepec.	40
3.17. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible de las mediciones realizadas en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec	41
3.18. Ubicación de las mediciones de ruido ambiental en el Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec (círculos amarillos)	42
4.1. Ubicación de las líneas de TRE 2D, línea naranja lado Este y línea amarilla lado Oeste del Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.	46
4.2. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D, lado Este del Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec	47
4.3. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D, lado Oeste del Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec	47
C.1. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1988 a 1990.</i>	61
C.2. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1990 a 1995.</i>	61
C.3. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1995 a 2000.</i>	61
C.4. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2000 a 2005.</i>	61
C.5. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2005 a 2010.</i>	62
C.6. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2010 a 2015.</i>	62
D.1. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1988 a 1990.</i>	63
D.2. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1990 a 1995.</i>	63
D.3. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1995 a 2000.</i>	63
D.4. <i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2000 a 2005.</i>	63

D.5.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2005 a 2010.</i>	64
D.6.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2010 a 2015.</i>	64
E.1.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1988 a 1990.</i>	65
E.2.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1990 a 1995.</i>	65
E.3.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1995 a 2000.</i>	65
E.4.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2000 a 2005.</i>	65
E.5.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2005 a 2010.</i>	66
E.6.	<i>Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2010 a 2015.</i>	66
F.1.	Velocidad de Hundimiento en la estación MT50, considerando el procesamiento de la señal completa, parte intensa y final de los acelerogramas registrados	67
F.2.	Velocidad de Hundimiento en los puntos medidos dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec	68
G.1.	Espesor de la capa compresible en la estación MT50, considerando el procesamiento de la señal completa, parte intensa y final de los acelerogramas registrados	69
G.2.	Espesor de la capa compresible en los puntos medidos dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec	70

Resumen

La subsidencia en la Ciudad de México produce grietas y fisuras en la superficie del terreno debido a la compactación de las arcillas lacustres. Estos efectos son acelerados por el incremento urbano y poblacional, incremento que se traduce en la demanda de agua, y disminución de las zonas de recarga.

Con el fin de evidenciar el efecto que tiene el incremento urbano en la compactación del subsuelo, exploro los cambios en la respuesta sísmica de sitio y su relación con el incremento urbano y poblacional. Para ello analizo cocientes espectrales H/V de 44 sismos de subducción registrados de 1988 hasta el 2017. El estudio incluye el análisis de ruido sísmico ambiental en estaciones aledañas al Puente de los Leones, zona que presenta subsidencia local dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

Los resultados muestran que con el paso del tiempo, existe un incremento en la frecuencia fundamental del sitio que está relacionada con la disminución relativa del espesor de la capa compresible y la velocidad de hundimiento presente en la zona de estudio. En el Puente de los Leones, además de la evidente subsidencia local, los extremos de la estructura se localizan en capas compresibles con diferente frecuencia de sitio.

Abstract

The subsidence in Mexico City produces cracks and fissures due to the compaction of lacustrine clays. These effects are accelerated by the urban and population increase due to water demand and a decrease in recharge areas.

In order to prove the effects of urban increase over subsoil compaction, I explore seismic site response changes and its relationship with the urban and population increase. For this, I analyze spectral ratios H / V of 44 subduction earthquakes recorded from 1988 to 2017. The study includes the analysis of ambient seismic noise recorded at stations near to Puente de los Leones, an area that presents local subsidence within the First Section of the Chapultepec Forest.

I observe an increase in the site frequency related to the relative decrease in the thickness of the compressible layer and the sinking speed present in the study area. In the Puente de los Leones, in addition to the apparent local subsidence, the ends of the structure are located in compressible layers with different site frequency.

Capítulo 1

Introducción

La Cuenca de México constituye un gran vaso natural azolvado. En el cual se depositaron los productos de erosión derivados de las dos grandes sierras laterales y la Sierra de Pachuca, que se eleva en la cola del vaso, así como las cenizas de los numerosos volcanes del Sur, activos en los últimos años. La enorme cortina natural que represso el vaso fue la Sierra Chichinautzin que se extiende entre la Sierra de Zempoala en el Oeste y las bases del Popocatepetl en el este apoyándose en el centro en el macizo del Tepozteco (Mooser, 1978)

La Ciudad de México se localiza en la parte meridional de la Cuenca de México, la cual es un valle extenso de alta montaña, situado a más de 2000 msnm, rodeado por montañas de origen volcánico. Esta cuenca se formó hace 600 mil años cuando la Sierra Chichinautzin, que divide actualmente la Cuenca de México de la Cuenca de Morelos, bloqueó el antiguo drenaje de los ríos Salado y Cuautla, los cuales escurrían hacia el Océano Pacífico dentro del valle que se encuentra entre la Sierra Nevada (volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl) y la Sierra de las Cruces; dominada por el Nevado de Toluca. Los materiales predominantes son lavas producto del vulcanismo y que actualmente forman las sierras circundantes a la cuenca. Los materiales superficiales son depósitos aluviales que constituyen en la actualidad el acuífero profundo de la cuenca de México, el cual tiene entre 600 y 700 m de espesor (SACMEX, 2012)

La Ciudad de México se encuentra ubicada dentro de la Cuenca de México, la cual cuenta con una superficie aproximada de $9,600 \text{ km}^2$, de los cuales $4,800 \text{ km}^2$ corresponden al Estado de México, $2,540 \text{ km}^2$ a estado de Hidalgo, $1,320 \text{ km}^2$ de la Ciudad de México, 840 km^2 estado de Tlaxcala y 100 km^2 de Puebla (*Figura 1.1*).

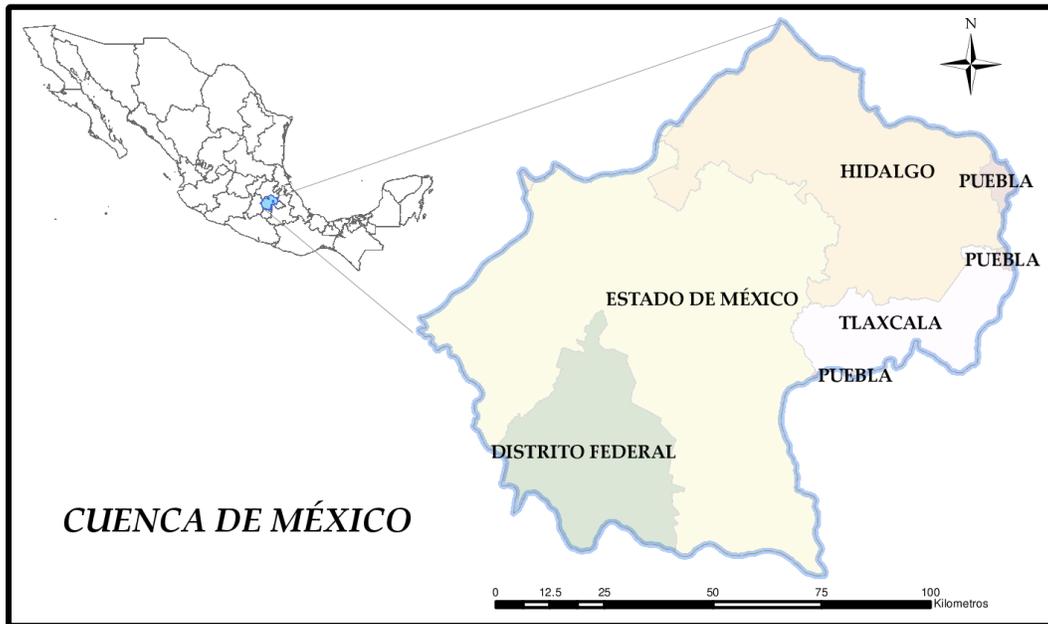


Figura 1.1. Mapa de localización de la Cuenca de México

La secuencia estratigráfica de la Cuenca de México consiste de rocas volcánicas, depósitos aluviales, fluviales y lacustres del Terciario y del Cuaternario, que subyacen discordantemente a rocas calcáreas y calcáreo-arcillosas del Cretácico (Aguayo, 1989).

El relleno de la cuenca está constituido por arcillas lacustres en su parte superior y por clásticos producto de la acción de ríos, arroyos, glaciares y volcanes en su parte inferior. Intercalados en el relleno se encuentran materiales como capas de ceniza y estratos de pómez producto de las erupciones volcánicas menores y mayores durante los últimos 500,000 años. También existen numerosos suelos, producto de la meteorización de los depósitos volcánicos, fluviales, aluviales y glaciales, que suelen presentar un color característico del ambiente en que fueron formados (Mooser, 1978).

Zonificación Geotécnica

Debido a las condiciones del subsuelo de la Ciudad de México (construido sobre un lago), se puede tratar como una zona sísmica distinguiéndose tres zonas de acuerdo al tipo de suelo como puede observarse en la *Figura 1.2*

- **Zona I Firme o de Lomas.** Localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles. Formadas por 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 cohesivo relativamente blandos.
- **Zona II o de Transición.** Los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercaladas con capas de arcilla lacustre, el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.
- **Zona III o de Lago.** Localizada en las regiones donde antiguamente se encontraban lagos (lago de Texcoco, lago de Xochimilco). El tipo de suelo consiste en depósitos de arcilla altamente compresible con alto contenido de agua; favoreciendo la amplificación de las ondas sísmicas, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales, el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

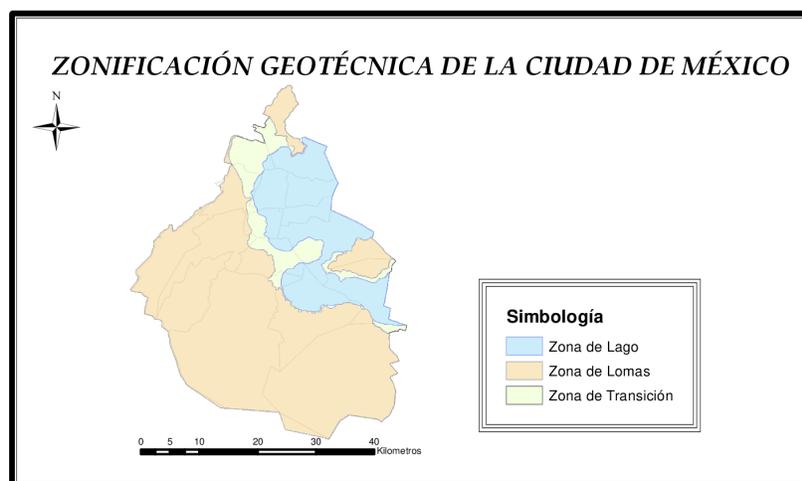


Figura 1.2. Zonificación Geotécnica del Valle de México

El primer antecedente del hundimiento presente en la Ciudad de México lo dió a conocer el ingeniero Roberto Gayol, quien en 1925 informa a la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos de México que la ciudad se estaba hundiendo y que la causa probable era la perturbación producida por el drenaje de las aguas del subsuelo en el Valle de México (Marsal, 1959). Se sostenía que el Lago de Texcoco se estaba azolvando.

El ingeniero José A. Cuevas, iniciador de la Mecánica de Suelos en México, mostró en 1936 que a medida que se incrementaba la población de la Ciudad de México, se observa una correlación positiva entre la extracción de aguas subterráneas y el hundimiento de la ciudad. Por lo cual, a partir de 1940 no se autorizó la perforación de nuevos pozos en la zona lacustre y se trató de concentrar todas las extracciones del acuífero en la zona de transición (SACMEX, 2012).

En 1947 el doctor Nabor Carrillo demostró que el hundimiento de la Ciudad de México se debía a la consolidación de las arcillas lacustres del acuífero superior, debido a la pérdida de presión hídrica que producía la extracción de agua, ya que su composición era de 30 % de sólidos y 70 % de agua. Establecía que la pérdida de presión en los acuíferos ocasionado por el bombeo, provocaba cambios en el estado de esfuerzos efectivos (Carrillo, 1969).

En efecto, la sobreexplotación del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es lo que ha permitido satisfacer las demandas de agua en la concentración citadina, trastornando de manera muy significativa su equilibrio al extraer más agua de la que se infiltra y generando hundimientos del suelo en el Valle de México. Por ello la preocupación actual sobre la explotación del acuífero se enfoca en primer lugar, en los hundimientos, porque van a seguir causando daños a la infraestructura urbana, en segundo lugar en la producción de los pozos, ya que en la medida que van extrayendo el agua a mayores profundidades pueden rendir un caudal menor o un deterioro en la calidad química del agua (SACMEX, 2012).

En México el hundimiento regional y los consecuentes agrietamientos se han extendido a las ciudades de Celaya, Irapuato, Querétaro, Torreón y Aguascalientes, además de que se han comenzado a manifestar en Toluca y Puebla.

El centro de la ciudad se ha hundido aproximadamente 10 metros en los últimos 60 años. (SACMEX, 2012). El ejemplo más característico de hundimiento es el Ángel de la Independencia, al cual se le han tenido que añadir más de 14 escalones a la base original, debido a que el hundimiento presente en la zona es de alrededor de 3 m en el periodo de 1910 a 2008 (Del Ángel et al., 2010).

En la presente tesis abordamos el problema de subsidencia en una zona muy local ubicada en la 1ra sección del Bosque de Chapultepec. Se trata del Puente de los Leones, el cual sirve como paso peatonal a miles de visitantes del Bosque, que cruzan el circuito interior hacia el Castillo de Chapultepec (y viceversa), provenientes de Paseo de la Reforma y de Metro Chapultepec. El Puente de los Leones fue construido en 1975, actualmente presenta rasgos de fracturamiento en la losa y hundimiento en los estribos del mismo.

El Puente de los Leones se encuentra ubicado en la zona geotécnica III denominada zona de Lago, la cual se caracteriza por tener espesores de suelos blandos, los cuales se localizan a una profundidad máxima de 20 m. Los suelos en esta zona son predominantemente arcillas y limos de alta plasticidad, saturados y con grandes contenidos de agua, ya que el nivel de aguas freáticas (NAF) usualmente se encuentra muy cercano a la superficie (RCDF, 2004).

El objetivo de este trabajo es analizar si el hundimiento actual en el Puente de los Leones está relacionado con la subsidencia de la Ciudad de México, o si es generado por un efecto local. En caso de ser causada por un efecto local, determinar si existe alguna relación con el exceso de carga inducida por los edificios aledaños.

En el Capítulo II se presenta un apartado relacionado con la zona de estudio; donde se incluye un análisis del hundimiento de la Ciudad de México en confrontación con el crecimiento poblacional, explotación del acuífero y crecimiento urbano de la zona. En el Capítulo III se muestran los resultados del análisis de la respuesta sísmica de la estación acelerométrica MT50 y mediciones de vibración ambiental dentro de la zona de estudio a fin de cuantificar las variaciones espaciales y temporales de los efectos de sitio. En el Capítulo IV; incluimos los resultados obtenidos con Tomografía de Resistividad Eléctrica, las cuales fueron realizadas en ambos lados del puente con el propósito de comparar los resultados obtenidos con métodos eléctricos con los obtenidos con la técnica de cocientes espectrales H/V . Finalmente, en el Capítulo V, se muestran las conclusiones, observaciones y recomendaciones.

Capítulo 2

Zona de Estudio

2.1. Bosque de Chapultepec

El Bosque de Chapultepec es el bosque urbano mas grande de América Latina con 686 hectáreas cuyo nombre significa ”*Cerro del Chapulín*”, es el bosque mas antiguo de América y se encuentra dividido en tres secciones. En el Bosque de Chapultepec se encuentran 7 de los más importantes museos de nuestro país. Es visitado por 15 millones de personas al año y por 200 mil visitantes cada fin de semana (González, 2014).

Ubicación

El Bosque de Chapultepec se localiza en la porción occidental de la Ciudad de México, sus coordenadas geográficas extremas están entre los $99^{\circ} 10' 40''$ y $99^{\circ} 14' 15''$ de longitud oeste y $19^{\circ} 23' 40''$ y $19^{\circ} 25' 45''$ de latitud norte. Se localiza dentro de la Delegación Miguel Hidalgo, se encuentra limitado por las vialidades siguientes: Rubén Darío y Paseo de la Reforma al norte; por Calzada General Mariano Escobedo y Circuito Interior al oriente; Avenida Constituyentes al sur; por las calles Cumbres de Acultzingo, Paseo de la Reforma, Sierra Mijes, Montes Cárpatos, Miguel Ángel de Quevedo y Av. Bulevar de los Virreyes al poniente (Enríquez, 2012).

La superficie del Bosque de Chapultepec se encuentra distribuida de la manera siguiente: 274 hectáreas en la Primera Sección, 168 en la Segunda Sección y 244 hectáreas en la Tercera Sección.

La Primera y Segunda Sección se encuentran divididas por el Periférico o Boulevard Adolfo López Mateos; mientras que la Segunda y Tercera Sección se encuentran divididas por la intersección de Calzada Lomas y Calle Bernardo de Gálvez (*Figura 2.1*)

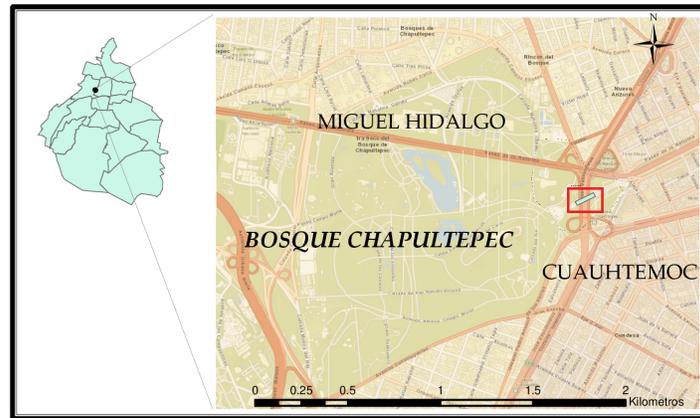


Figura 2.1. Mapa de localización del Bosque de Chapultepec

La Primera Sección del Bosque de Chapultepec es la más antigua; ocupa 274 hectáreas en total, de las cuales 182 corresponden a áreas verdes. En ella se encuentra un lago, varias fuentes entre las que destacan la fuente de Netzahualcóyotl, fuente de las Ranas, fuente del Quijote, fuente de la Templanza, monumentos como el Altar a la Patria, Obelisco a los Niños Héroes, Monumento a las Águilas Caídas, el Ahuehuete y los Baños de Moctezuma.

Además de museos e instituciones de carácter cultural de relevancia para la ciudad como el Museo Nacional de Historia (Castillo de Chapultepec), la casa del Lago de la UNAM, Auditorio Nacional, Centro Cultural del Bosque, Museo Nacional de Antropología, Museo Rufino Tamayo, Museo Arte Moderno. Así como otros espacios para la recreación y esparcimiento como son el Zoológico Alfonso L. Herrera, el Jardín de la Tercera Edad y el Audiorama.

Geología

La geología del Poniente de la Ciudad de México se explica considerando la fisiografía presente entre la elevación (3820-2260 msnm), constituidos por abanicos volcánicos de la Sierra de las Cruces, que comprenden una gran acumulación de materiales piroclásticos depositados a los pies de los diferentes aparatos volcánicos durante su intensa actividad explosiva. La actividad volcánica se desarrolló durante el Mioceno superior extendiéndose hasta el Plioceno y Pleistoceno (González, 2014).

La unidad rocosa que forma parte de la geología de la zona poniente de la Ciudad de México es la Formación Tarango. Fue nombrada debido a la población que posee el mismo nombre que se ubica a la orilla suroeste de la Cuenca de México, esta constituida por tobas, brechas, gravas volcánicas de origen fluvial y capas delgadas de pómez.

Lugo-Hubp et al. (1995), describen a la Formación Tarango en la delegación Álvaro Obregón reconociendo las siguientes unidades litológicas:

1. Piroclastos finos conformado principalmente por ceniza de color amarillento a paró y en partes de tonos rosados. Este depósito tiene la distribución mas amplia, y su espesor varia de los 0.5 a 5 m.
2. Ceniza con clastos angulosos mal clasificados y con tamaño de hasta 70 cm. Es un material andesítico de color rojo y gris con un espesor que va de los 0.5 a 2m.
3. Ceniza con pómez de color blanco con fragmento de tamaño que varia de los 0.5 a los 5 cm, presente de forma transicional en medio de dos unidades diferentes en contacto normal. Tiene un espesor que va de los 0.5 a 1.5 m.
4. Pómez, unidad muy abundante que se observa de forma continua, principalmente en el subsuelo a poca profundidad, yace abajo el depósito que originó un derrame piroclástico. Se han reportado tres capas de pómez que están separadas por otros depósitos volcánicos como ceniza, ceniza con pómez, depósitos de derrame piroclástico.

Los tres tipos de pómez encontradas son:

- En capas casi horizontales, muy abundante y con espesor que va de los 0.5 a los 50 m, de color amarillo claro.
- Pómez fina menos abundante en la zona, de color blanco que contiene pequeños fragmentos que van de los 3 a los 5 mm y representa en lentes de 10 a 15 cm de espesor.
- Pómez rosa que se presenta en estrato de 1 a 3 m de espesor con fragmentos que varían de 1 a 15 cm de diámetro.

5. Depósitos de derrames piroclásticos. Se clasifican en tres:

- Con clastos mal clasificados, angulosos con tamaño que varia de los 2 a 5 cm y algunos llegan a alcanzar los 15 cm. Presenta un color gris azulado y en algunas partes es rosa o pardo rojizo y esta poco consolidado, se observa en capas de 5 m de grosor y apoyados generalmente en tobas o pómez.
- Capa delgada con clastos angulosos bien clasificados, de tamaño variante de 1 a 5 cm, bien cementados, esta capa descansa de manera concordante sobre la pómez y su espesor va de los 0.6 a los 2 m.
- Sedimentos volcánicos de color gris azulado con clastos angulosos bien clasificados de tamaño máximo de 3 cm, poco consolidados y dispuestos de manera masiva.

6. Depósitos de lahares o derrames piroclásticos con bloques de andesitas de hasta 1.5 m de diámetro presentes de manera angulosa y muy mal clasificados, se encuentra cementado con piroclastos finos con pómez. Su espesor aproximado es de 35 m.

7. Depósitos de derrame de lodo con bloques angulosos y subredondeados con clasificación regular, su tamaño aproximado es de 1 m de diámetro. Esta presente en capas de poco tamaño y son depósitos característicos de desembocadura de arroyos de montaña.

8. Conglomerados presentes principalmente en la base de las barrancas. Esta constituida por cantos bien clasificados, redondeados de tamaño que varia de 2 a 5 m.

9. Lavas expulsadas del volcán Xitle de edad de 2200 años aproximadamente que cubrieron con varios metros las capas de pómez que se describieron anteriormente.

Los depósitos mas recientes de la Formación Tarango y que marco el fin de esta etapa de vulcanismo, se ubican en el Bosque de Chapultepec y en la zona Poniente de la Ciudad de México, incluyen a los depósitos piroclásticos del volcán-escudo San Miguel con un espesor aproximado de 250 m.

Mooser et al. (1992), definieron las siguientes unidades litológicas en el piedemonte de la Sierra de las Cruces:

- Derrames piroclásticos, arenas azules de 270 mil años
- Erupciones piroclásticas Xolopo de 430 mil años
- Tres erupciones plinianas de pómez
- Derrames piroclásticos Cuquita
- Erupciones de nubes ardientes menores de polvo fino de menos de 600 mil años.

Puente de los Leones

El Puente de los Leones fue construido en 1975, para dar paso peatonal al Circuito Interior que corre por debajo. Forma parte de la Calzada Juventud Heroica, la cual va desde la Entrada de los Leones hasta el Monumento del Altar a la Patria.

Este puente se encuentra flanqueado en los costados por jardineras, cuenta con esculturas de leonas en los cuatro extremos. Actualmente este puente presenta rasgos que indican la presencia de hundimiento, como lo es la inclinación de los soportes de cada una de las leonas, así como el fracturamiento en los adoquines de la plancha del puente como se observa en la *Figura 2.2*.



(a) Desnivel

(b) Fracturamiento en la plancha del Puente



(c) Detalle del fracturamiento en adoquines

Figura 2.2. Rasgos de agrietamiento y hundimiento presente en el Puente de los Leones en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

2.2. Crecimiento Poblacional

La concentración y el crecimiento acelerado de la población en las localidades urbanas han implicado fuertes presiones sobre el medio ambiente y las instituciones, derivadas de la demandas incrementada de servicios (CONAGUA, 2014).

La tasa de crecimiento de la población en México, inicia su descenso a partir de la década de los setentas, por primera vez en 45 años no disminuyó y mantuvo el promedio anual de crecimiento de 1.4% (Migueles, 2015).

Durante los últimos 65 años, la población en México ha crecido un poco más de cuatro veces. En la *Figura 2.3* se aprecia que 1950 había 25.8 millones de habitantes, en 2015 existen 119.5 millones. De 2010 a 2015, la población se incremento en 7 millones de habitantes, lo que representa un crecimiento promedio anual de 1.4% (INEGI, 2016).

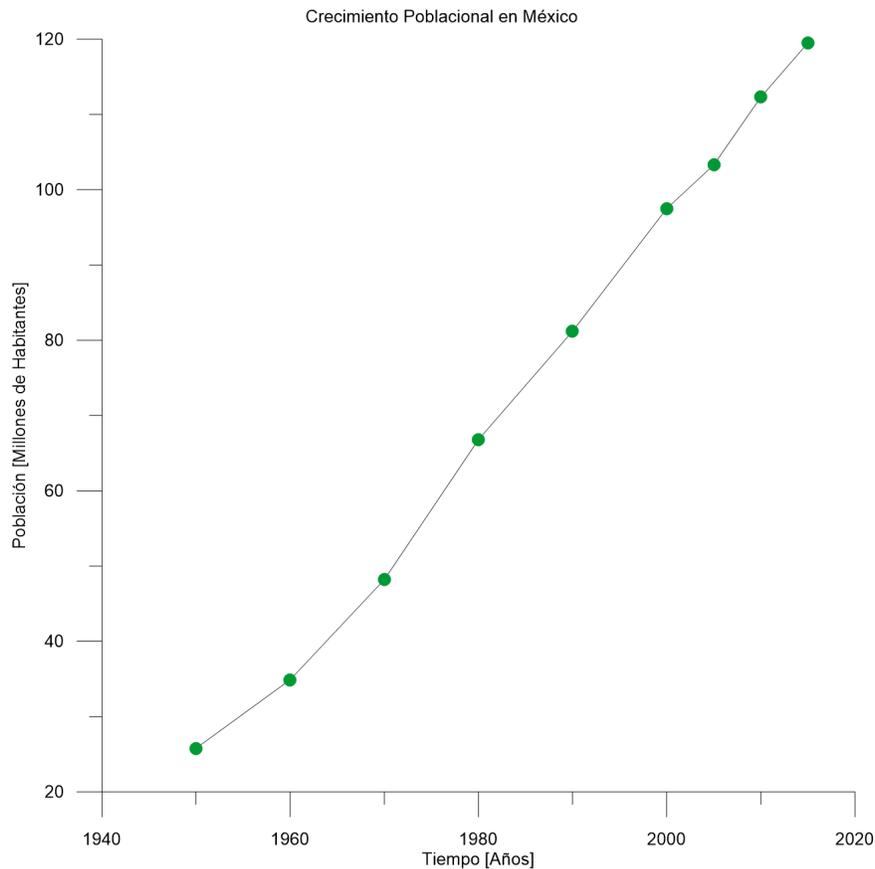


Figura 2.3. Crecimiento Poblacional en México desde 1950 a 2015 (Datos tomados INEGI, 2016)

En el último siglo la Ciudad de México tuvo un incremento poblacional acelerado. En la *Figura 2.4* se observa como el número de habitantes aumentó en casi un millón de personas de 1900 a 1940 y 7.39 millones de habitantes de 1940 a 1980. A partir de la década de los 90's, se observó una disminución en el ritmo de crecimiento poblacional en el Distrito Federal, inclusive convirtiéndose en una tasa negativa en esa década asociada a los efectos de los terremotos de 1985, la población en esta década disminuyó un poco mas de medio millón de habitantes. El incremento poblacional de 1990 a 2010 fue de 0.62 millones de habitantes. El incremento poblacional de 2010 a 2015 fue de 60000 habitantes llegando a una población total en la Ciudad de México de 8.91 millones de habitantes.

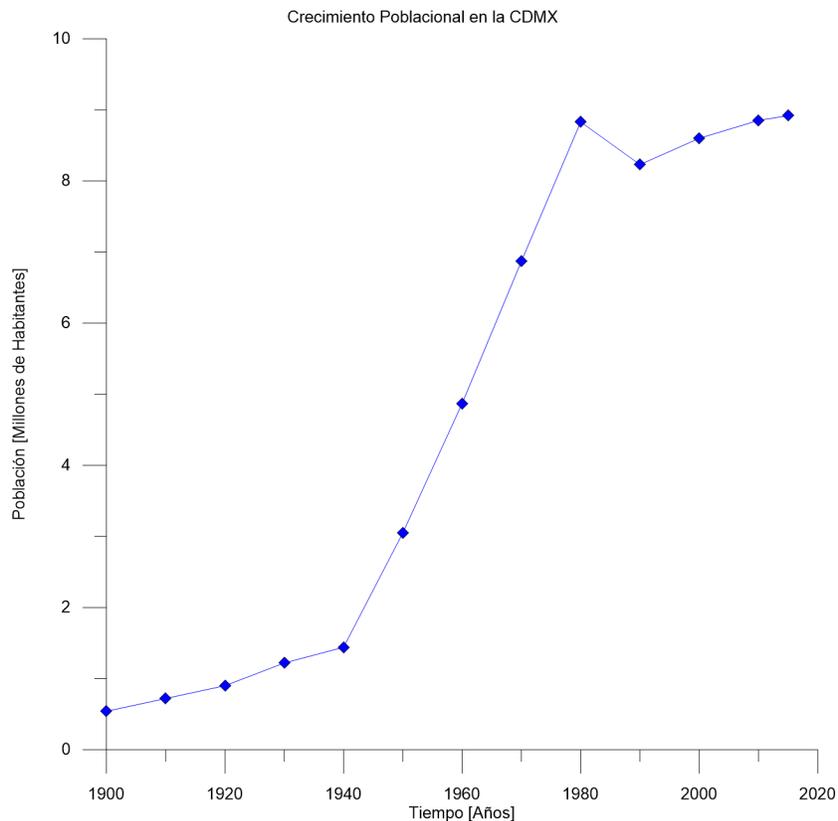


Figura 2.4. Crecimiento Poblacional en la CDMX de 1900 a 2015 (Datos tomados INEGI, 2016)

De manera particular para la Delegación Miguel Hidalgo, el número de habitantes disminuyó de 406 mil a 352 mil de 1990 a 2000. Contando con un pequeño incremento de mil habitantes para el 2005, y de 20 mil para el 2010. Para el año 2015 se estimó un descenso en la población de esta delegación de aproximadamente 8000 habitantes. Con una población total para este año superior a los 364000 habitantes.

2.3. Crecimiento Urbano

Durante el siglo pasado llegaron millones de migrantes de la provincia en busca de trabajo. La superficie de la ciudad pasó de abarcar 80 kilómetros cuadrados en los años cuarenta a 7954 kilómetros cuadrados sesenta años más tarde, tomando en cuenta las zonas conurbadas, un crecimiento que ha dado lugar a una megalópolis vibrante pero caótica compuesta principalmente por desarrollos no planeados y que se extienden con rapidez (Kimmelman, 2017).

En la Ciudad de México se ubican casi todas las oficinas centrales del Gobierno Federal, centros de negocios nacionales e internacionales, las actividades culturales, universidades y los centros de investigación más importantes.

El crecimiento de la Ciudad de México en 1930 se expandió hacia la delegaciones de Coyoacán y Azcapotzalco, así como en algunas zonas de las delegaciones que rodeaban la parte central de la ciudad como Tacubaya, La Villa y San Ángel.

De 1930 a 1950, el crecimiento urbano fue muy acelerado debido a la industrialización, lo que representó una gran migración de campesinos de las zonas vecinas a la capital. De 1950 a 1980 se denominó la llamada "dinámica metropolitana", época en la cual el crecimiento urbano rebasó los límites del DF por el norte y se expandió hacia los municipios del Estado de México como Tlalnepantla, Naucalpan, Chimalhuacán y Ecatepec.

En 1964 se prohibió la construcción de nuevos fraccionamiento dentro del Distrito Federal, provocando que el crecimiento urbano se dirigiera hacia los municipios del Estado de México. En 1970 el área urbana en la Ciudad de México era de 650 km^2 , esta superficie incluía las delegaciones Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Azcapotzalco, Coyoacán, Iztacalco y Gustavo A. Madero, exceptuando Milpa Alta.

En 1980 la superficie del área urbana de la Ciudad de México era de $1,115 \text{ km}^2$, extendiendo la mancha urbana a los municipios de Coacalco, Cuautitlán Izcalli, Romero Rubio, Chalco, Chicoloapan, Ixtapaluca, Tultitlán y Nicolás Romero (Sánchez, 1996).

Según el INEGI (2017) la Ciudad de México tiene una superficie de $1,485.49 \text{ km}^2$, la Delegación Miguel Hidalgo cuenta con 46.38 km^2 para uso de suelo y vegetación. De la superficie total con la que cuenta la Ciudad de México 591.92 km^2 corresponden al área urbana, de ésta 39.50 km^2 corresponden a la Delegación Miguel Hidalgo.

En la *Figura 2.5* se muestra el incremento que se tuvo en la CDMX, en el número de viviendas en los últimos 25 años, los mayores incrementos se observan de 1990 a 1995 y de 2010 a 2015.

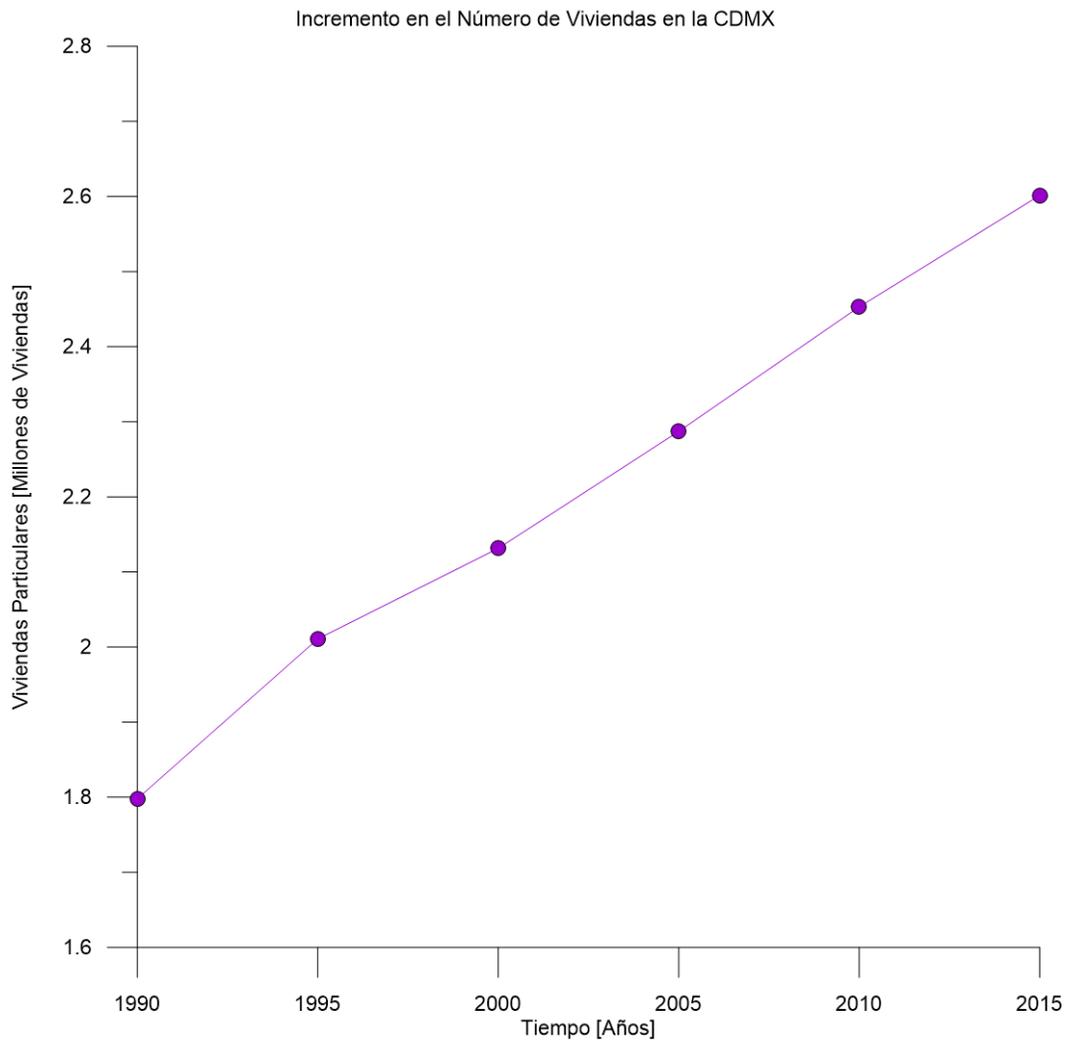


Figura 2.5. Relación del Crecimiento Urbano en la CDMX, considerando las viviendas particulares habitadas (Datos tomados INEGI, 2017)

2.4. Estado actual del Acuífero de la CDMX

El acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra ubicado en el sur poniente de la Cuenca del Valle de México, ocupa el 17% de la superficie de la cuenca. La ciudad y el acuífero están separados, en su mayor parte por un acuitardo arcilloso cuyo espesor es de aproximadamente 50 metros. El acuífero alcanza profundidades mayores a 800 metros; en el se encuentran pozos con profundidades que oscilan entre 100 y 400 m (CONAGUA, 2002).

Las obras para proteger de inundaciones y proporcionar agua potable a la Ciudad de México han provocado la desecación de la Cuenca del Valle de México, al producir el desequilibrio geohidrológico que abate los niveles piezométricos, además de que induce la consolidación y agrietamiento de la zona lacustre (Murillo, 1990).

Para reducir el gasto de extracción de agua subterránea de la cuenca del Valle de México en 1950 se dio inicio el proyecto de Aguas del Lerma, con el cual se comenzó a dar forma al criterio de importación de agua de cuencas externas al Valle. En 1955 se construyó la primera planta de tratamiento de aguas residuales, para un gasto de 60 L/s , en el Bosque de Chapultepec, cuyo objetivo era el reciclado de agua residual. A partir de 1988 se comenzó con el cambio de inodoros de diseño antiguo por otros mas modernos, de bajo volumen de descarga, comenzando así con el ahorro en el consumo de agua (Tamez, 1992).

El rápido crecimiento poblacional en la zona metropolitana, ocasionó la expansión de áreas urbanas y asentamientos no planificados en áreas periféricas. La expansión de la mancha urbana provocó la disminución significativa de la infiltración del agua de lluvia, llegando a considerar que no existe infiltración natural debido a que las posibles áreas en donde podría tenerse recarga natural se encuentran pavimentadas o se ubican asentamientos irregulares (CONAGUA, 2002).

El crecimiento de la metrópoli ha llevado al limite la capacidad de los mantos acuíferos, agotando las fuentes de suministro y degradando la calidad del agua como consecuencia de la sobreexplotación.

De acuerdo a la *Figura 2.6*, se extrae más del doble del agua que se infiltra, provocando un desequilibrio geohidrológico teniendo como efectos principales el descenso de los niveles piezométricos, la deformación por consolidación de toda la parte baja del valle con los consecuentes agrietamientos y el deterioro de la calidad del agua subterránea.

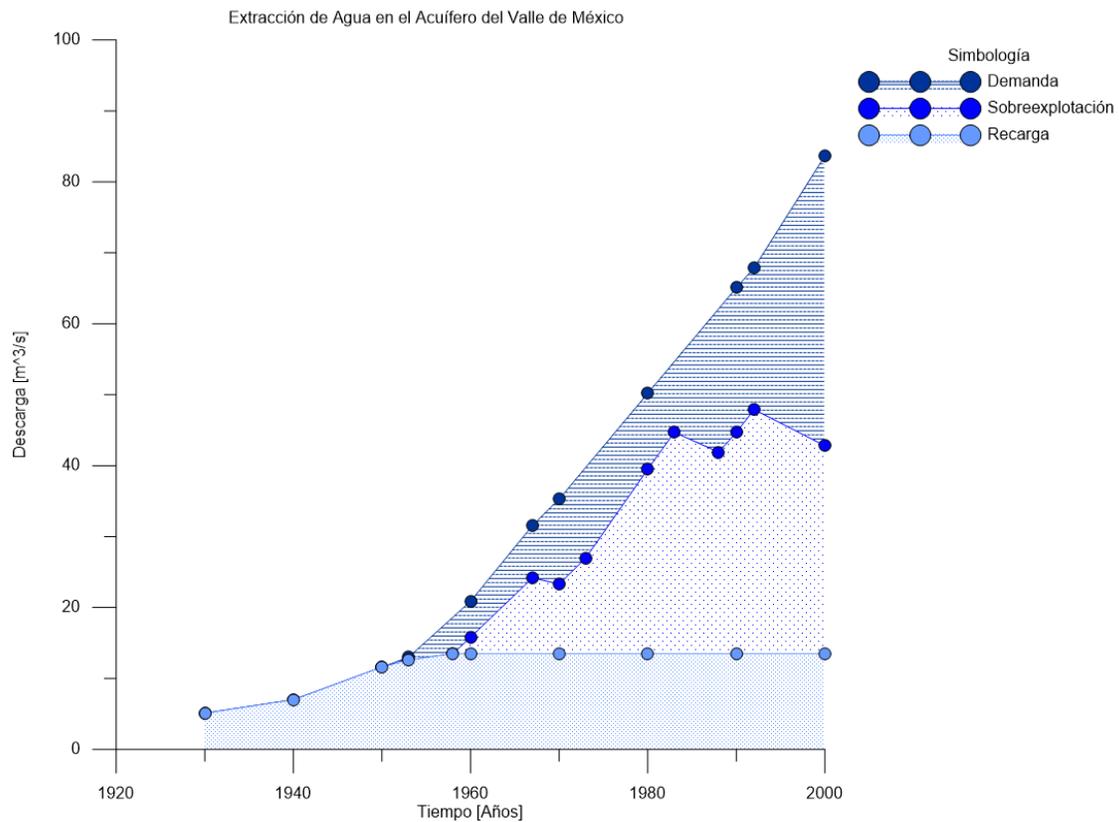


Figura 2.6. Relación de la extracción de agua en el subsuelo del Valle de México (Modificado de Tamez, 1992)

En la CDMX los cuerpos de agua cubren una superficie aproximada de 2.84 km^2 , los cuales se encuentran en las delegaciones Gustavo A. Madero, Tláhuac y Xochimilco (INEGI, 2017).

2.5. Hundimiento en la CDMX

Entre los años de 1960 y 1970 los pozos se perforaban de 100 a 150 m de profundidad y en la actualidad se perforan de 450 a más de 1,000 metros, es por ello que, a medida que se va profundizando el nivel de bombeo, se encuentran formaciones geológicas más consolidadas en las que se tienen permeabilidades y porosidades menores y el caudal de los pozos decrece. Actualmente la extracción de agua es de aproximadamente 40 litros por segundo, con el paso del tiempo se espera que la extracción sea de 5 a 10 litros por segundo. Al estar sacando agua a mayor profundidad, el material será menos permeable, se tendrá menos gasto y la calidad del fluido disminuirá, incrementando así los costos de potabilización y mantenimiento. En zonas de la Ciudad de México donde la mayor parte de los suelos son arcillosos, los hundimientos van desde los 6 cm/año hasta más de 30 cm/año (SACMEX, 2012).

La consolidación de los suelos es un proceso donde se tiene disminución de volumen, el cual es provocado por un aumento de las cargas sobre el suelo (Juárez, 1974). La compresión es causada por la deformación de las partículas del suelo, la reorientación de las partículas del suelo y la expulsión de aire o agua de los espacios vacíos (Braja, 2015).

La compactación es la consolidación del suelo por eliminación de aire, el grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco (Braja, 2015). Al compactar los suelos se tiene aumento en su resistencia y disminución en su capacidad de deformación, esto se obtiene al aumentar el peso específico seco y disminuyendo sus vacíos (Juárez, 1974). La compactación aumenta las características de resistencia de los suelos, incrementando la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos y disminuye la cantidad de solución no deseada de las estructuras.

La subsidencia del terreno es un fenómeno natural que se caracteriza por el descenso irregular del nivel del suelo de manera paulatina, se manifiesta mediante daños y agrietamientos en inmuebles e infraestructura por lo general en áreas urbanas, así como hundimiento y agrietamiento del terreno en zonas rurales. Su origen es diverso, siendo el más común la explotación de aguas subterráneas, cuyas consecuencias implican impactos sociales como el abandono y deterioro de viviendas, impactos económicos representados en la inversión para restauración de edificaciones y líneas vitales e impactos ambientales que incluyen cambios en el paisaje, agotamiento de las fuentes de agua y contaminación de acuíferos.

Otro de los factores que se ha señalado como principal factor del hundimiento, es el aumento de las cargas en la superficie debidas a construcciones y rellenos. Cuando las cargas son pequeñas o moderadas el asiento crece de manera proporcional a la carga aplicada. Si la carga sigue aumentando la relación asiento-carga, alcanza una situación en la que el terreno no acepta mas incrementos de carga a pesar de que las deformaciones continúen creciendo, se habrá alcanzado así el hundimiento (González et. al., 2002)

Para la zona lago en la Ciudad de México la velocidad de propagación de las ondas de corte (v_p) es de 81 m/s a una profundidad [H] de 7 a 30 m (Díaz, 2006), esta zona es la mas importante desde el punto de vista geotécnico debido a su alto valor de compresibilidad el cual es de $m_v = 0.1 \text{ kg/cm}^2$. Las construcciones ubicadas en esta zona suelen ser las más afectadas durante los sismos. Con base a las NTCS la zona III, se subdivide en cuatro zonas: IIIa, IIIb, IIIc y IIId, de acuerdo con el nivel de amplificación dinámica de cada una de ellas, esta subdivisión se encuentra asociada con los espesores de los suelos blandos y con el periodo fundamental de vibración del terreno.

Capítulo 3

Adquisición y Procesamiento de Datos

3.1. Estación Acelerométrica MT50

En México los estados con mayor sismicidad son Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco. La alta sismicidad en el país es debido principalmente a la interacción entre las placas de Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe; así como a fallas locales que corren a lo largo de varios estados aunque estas últimas menos peligrosas (SSN, 2017).

Aunque las zonas epicentrales se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México se ha convertido en el receptor sísmico de todos ellos debido a la naturaleza de su terreno ya que fue fincada en lo que fuera un lago.

En enero de 1986 (CIRES, 2016), después de evaluar la magnitud del desastre que causaron los sismos de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, expertos en ingeniería sísmica y geofísica propusieron ejecutar diversas investigaciones básicas y desarrollos tecnológicos útiles para mitigar la vulnerabilidad de la zona urbana del Valle de México, ante este peligro natural.

En 1987 el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES) inició el desarrollo de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM) con 78 aparatos, los cuales fueron donados al CIRES por el Gobierno del Distrito Federal (GDF) y la Fundación de Ingenieros Civiles Asociados (FICA). Actualmente la red cuenta con 80 acelerógrafos (*Figura 3.1*), distribuidos de la siguiente forma: 66 acelerógrafos en estaciones de registro en superficie, 6 acelerógrafos instalados en dos estructuras y 8 sensores de registro subterráneo (CIRES, 2016).

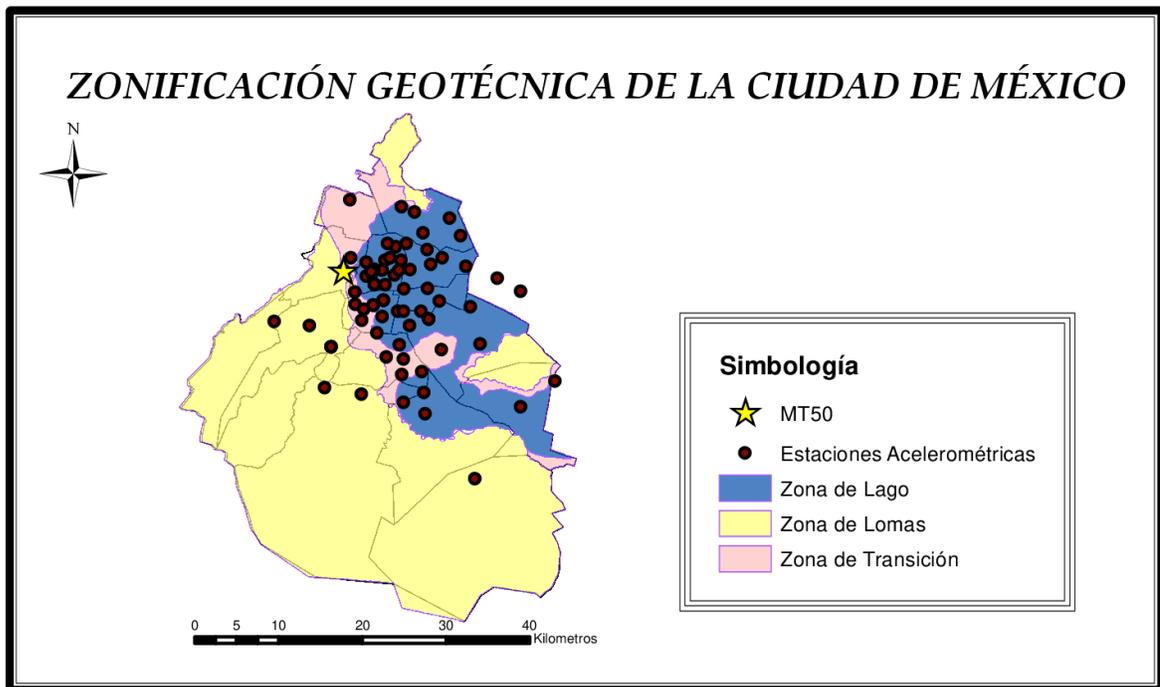


Figura 3.1. Ubicación de las estaciones (puntos marrón) de la Red Acelerométrica de la Ciudad de México (Modificada de CIRES, 2016)

La estación utilizada para este estudio fue la estación Mariscal Tito (*MT50*) ubicada en Reforma y Gandhi en la delegación Miguel Hidalgo, dentro de la zona geotécnica de lomas, aproximadamente a 350 m del Puente de los Leones.

He analizado con la técnica de cocientes espectrales H/V 44 acelerogramas de movimientos fuertes, registrados por la estación acelerométrica *MT50* de febrero de 1988 a septiembre de 2017. La localización de estos eventos se muestra en la *Figura 3.2*. En esa figura se observa que los epicentros de los sismos analizados se ubican en los estados de Chiapas, Colima, Guerrero, Michoacán, Morelos, Oaxaca y Puebla. Las características de los eventos analizados se encuentran en la *Tabla A.1*.

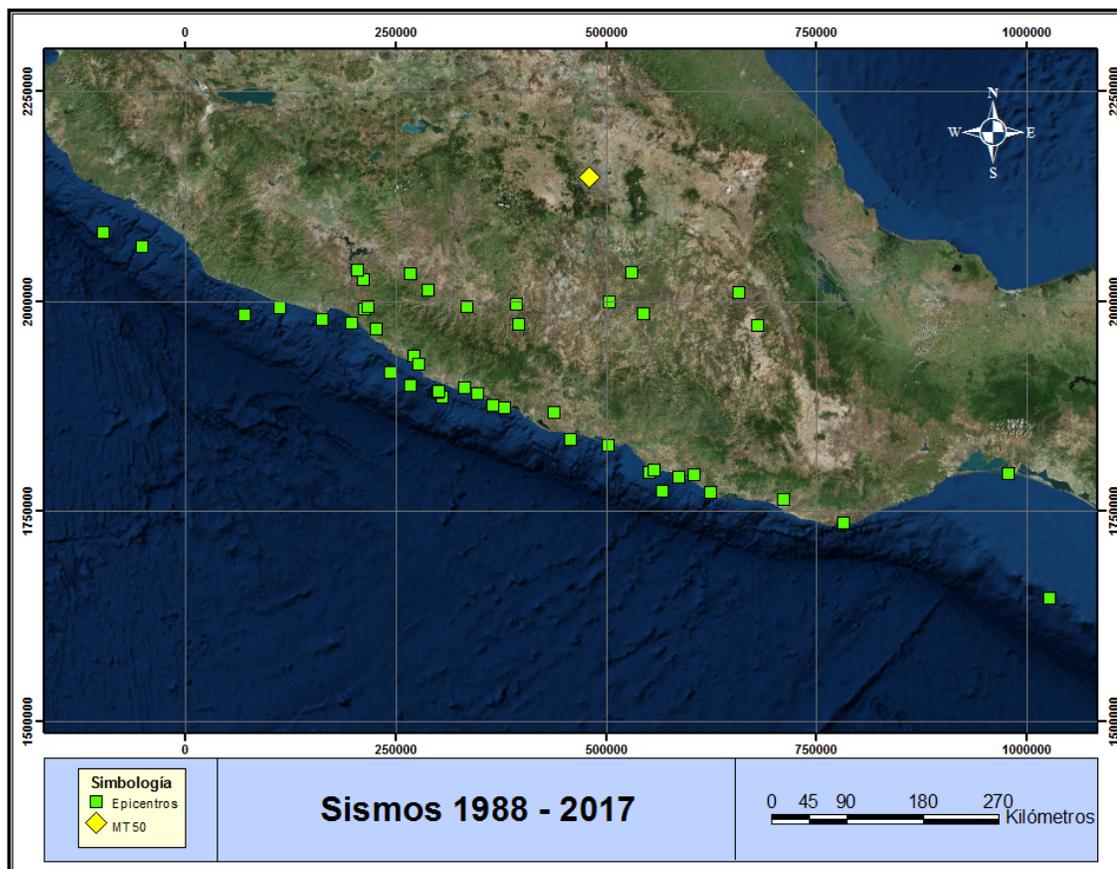


Figura 3.2. Localización de los epicentros registrados por la estación *MT50*.

Procesamiento Estación Acelerométrica MT50

El método de Cocientes Espectrales H/V fue propuesto por Nakamura en 1989, es una de las técnicas más usadas para el análisis de microtemores por su bajo costo y simplicidad en la adquisición de datos con un sensor de tres componentes.

Este método es un método pasivo, no invasivo, que usa como fuente el ruido sísmico para determinar y evaluar una frecuencia fundamental de resonancia de un sitio. La frecuencia de resonancia es determinada a través del análisis del cociente de las componentes vertical y horizontal del ruido sísmico ambiental. También se ha usado para estimar el espesor de sedimentos no consolidados.

Se basa en relacionar los espectros de Fourier de los componentes horizontales ($N-S$ y $E-W$) y vertical del registro de microtemores obtenido en superficie.

Nakamura (1989) explica que la componente horizontal es amplificada por la multi-reflexión de la onda S, mientras que la componente vertical lo es mediante la multi-reflexión de las ondas P. Además, el efecto de la onda Rayleigh aparece en la componente vertical, así el grado de su efecto puede ser conocido; determinando el cociente de la componente vertical entre la superficie y el estrato que la subyace.

Para el procesamiento de los acelerogramas registrados por la estación MT50 utilicé el software *Geopsy* (Wathelet et al., 2008), con el cual realicé el cálculo de los cocientes espectrales de cada uno de los sismos registrados por la estación acelerométrica. Para este análisis realice tres diferentes tipos de procesado; los cuales consistieron en primer lugar tomar la señal completa, posteriormente tomé la parte intensa del sismo y por último la parte final del registro.

A cada uno de los registros analizados se realizaron las actividades siguientes:

- Importar las tres componentes de los sismos registrados (N-S, E-W y Z).
- Indicar el intervalo de tiempo con el que se procesaría cada uno de los registros.
- Especificar el tamaño de las ventanas y el traslape entre ellas. Para la realización de este trabajo sólo se utilizó una ventana, cuya longitud dependía directamente del tipo de procesamiento que se realizará (señal completa, parte intensa o parte final) del registro, así como de la duración que tenía el registro.
- Elegir los parámetros de suavizado y la forma de operar de las componentes horizontales. El tipo de suavizado utilizado es el Proporcional a un 40%.

Procesamiento Señal Completa

El procesamiento de la señal completa de cada uno de los acelerogramas registrados en la estación MT50, se realizó considerando todo el registro, es decir, se incluye el tiempo preevento y el tiempo posevento; estos tiempos dependen de los acelerógrafos instalados en la estación acelerométrica. Actualmente estos tiempos son de 56 segundos antes del sismo y de 64 segundos después del mismo.

En la *Figura 3.3* se muestra la selección completa (tiempos de preevento y posevento) para el procesado de la señal completa de uno de los acelerogramas analizados para este trabajo. Este registro tuvo tiempo preevento de 16 [seg] y tiempo posevento de 48 [seg].

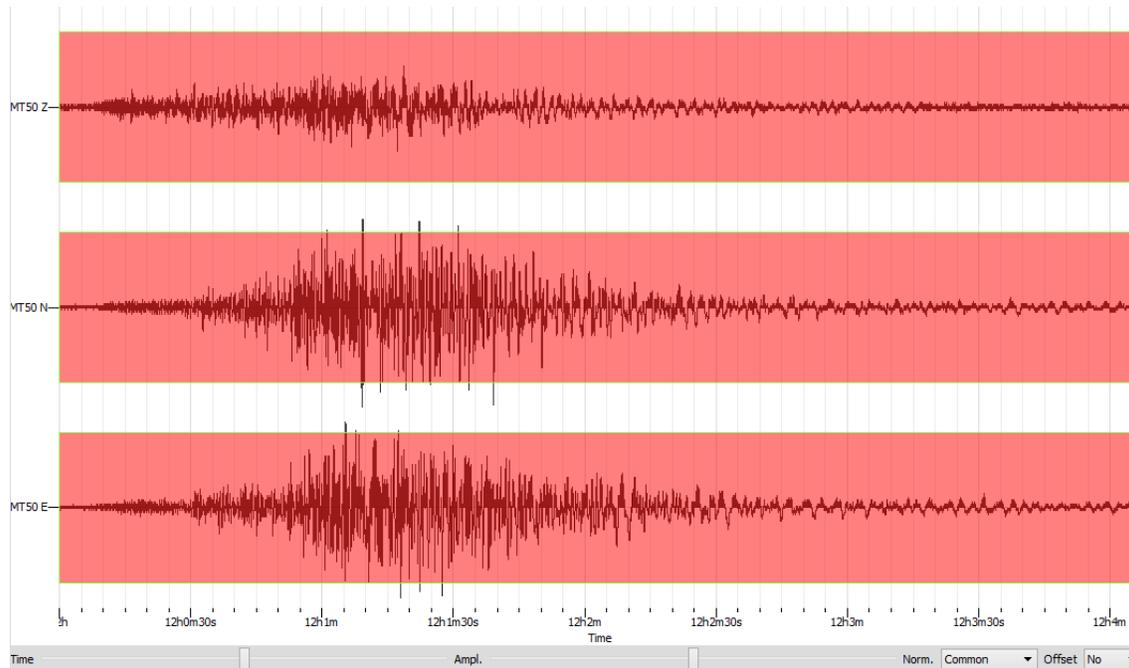


Figura 3.3. *Procesamiento de la señal completa del acelerograma registrado en la estación MT50 el 30 de septiembre de 1999.*

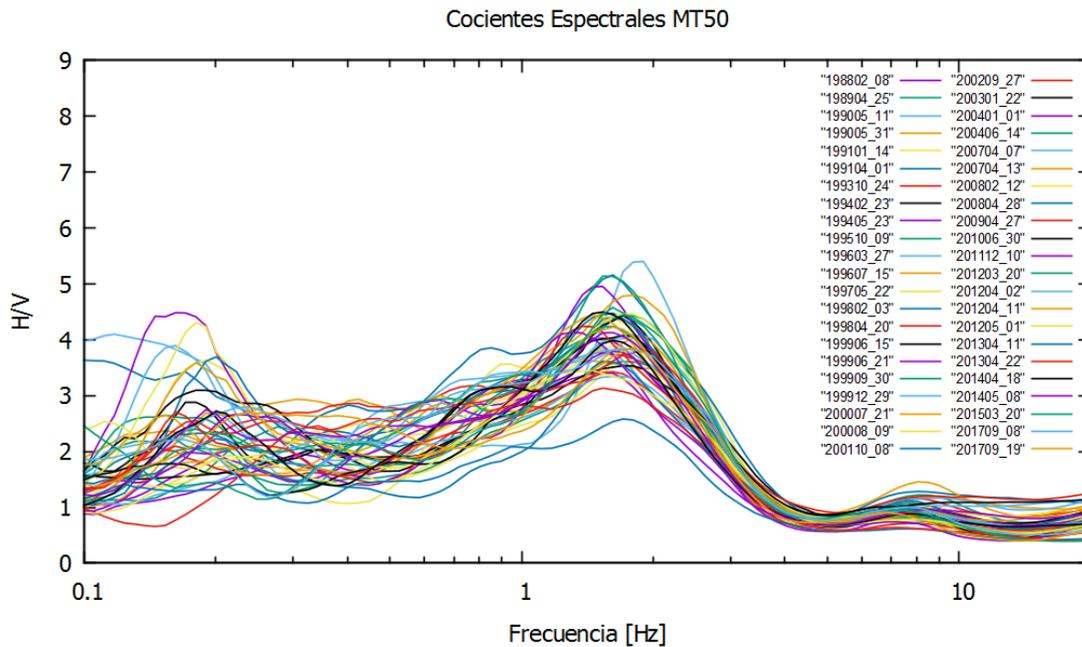


Figura 3.4. Cocientes espectrales de los sismos registrados en la estación MT50 de 1988 a 2017, considerando la señal completa de los acelerogramas analizados.

En la *Figura 3.4* se muestran los cocientes espectrales de los 44 acelerogramas registrados por la estación MT50; considerando la señal completa, se observa que la que la frecuencia del sitio tiene rango de 1.30 a 1.90 [Hz], lo cual nos da como resultado un periodo de 0.52 hasta 0.76 [s], el incremento de estos valores no es constante debido a la diversidad de los sismos registrados.

La estimación del cociente espectral de los acelerogramas de 1988 y 2015, indica que una frecuencia de 1.50 [Hz] para el primero y de 1.62 [Hz] para el segundo registro. Estos valores muestran un aumento en la frecuencia del sitio, lo que corresponde con la disminución en el periodo de vibrar. El periodo de vibración disminuyó 0.05 [s], esto considerando que el periodo de vibración en 1988 fue de 0.66 [s] y en 2015 de 0.61 [s]. Este resultado parece indicar cambios en el estrato compresible en 27 años.

La magnitud registrada del sismo del 7 de septiembre del 2017 fue de 8.2, el epicentro de este evento tuvo lugar en el estado de Chiapas con profundidad de 45.9 km. El sismo registrado el 19 de septiembre del mismo año fue de 7.1 con epicentro en el estado de Morelos a 57 km del epicentro.

Los resultados obtenidos con los cocientes espectrales de los sismos ocurridos en septiembre de 2017 muestran que para el ocurrido el 07 de septiembre la frecuencia del sitio fue de 1.70 [Hz], mientras que para el sismo del 19 fue de 1.79 [Hz].

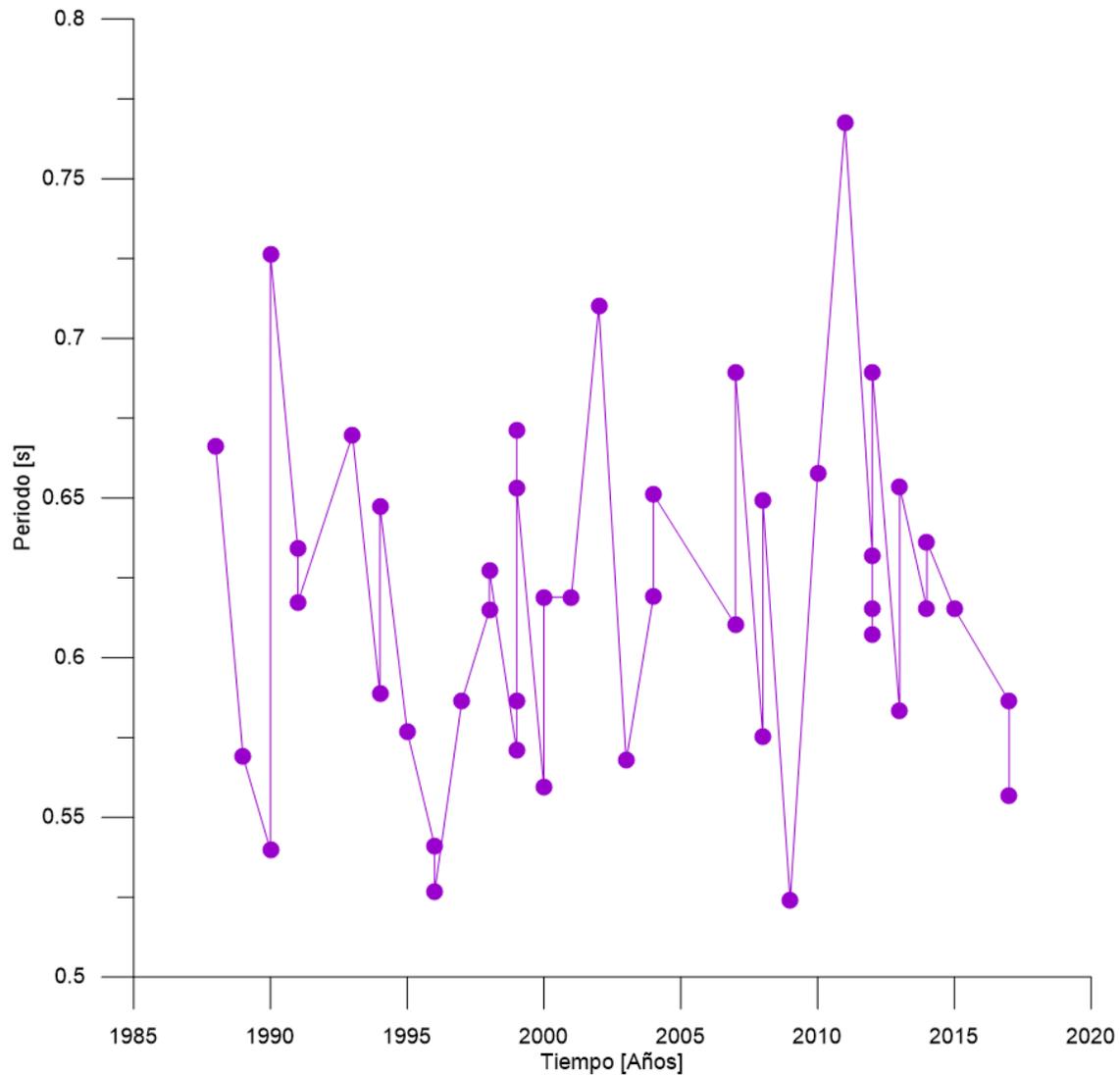


Figura 3.5. Evolución del periodo de vibración del suelo con el tiempo considerando la señal completa de los acelerogramas analizados.

En la *Figura 3.5* se muestra la evolución del periodo de vibración del suelo con el paso del tiempo, en ella se observa que el comportamiento no es uniforme; esto lo atribuimos a que las características tales como el epicentro, magnitud, profundidad, aceleración, de los eventos analizados son diferentes entre sí.

El rango del periodo de vibración para este procesamiento es de 0.52 a 0.76 [s]. Los valores máximos en el periodo de vibración aparecen aproximadamente cada 2 años después de que se tiene el mínimo. El tiempo que tarda en decaer el periodo de vibración del suelo esta alrededor de 6 años.

Procesamiento Parte Intensa de la Señal

Para la realización del procesado de la parte intensa del acelerograma, el tiempo preevento y posevento no se consideró para este procesamiento. Sólo se tomó parte del registro donde se observaban las ondas de cuerpo en el acelerograma analizado. A continuación se muestra un ejemplo de como se realizó este procesado en la *Figura 3.6* para el acelerograma del sismo ocurrido en Septiembre de 1999.

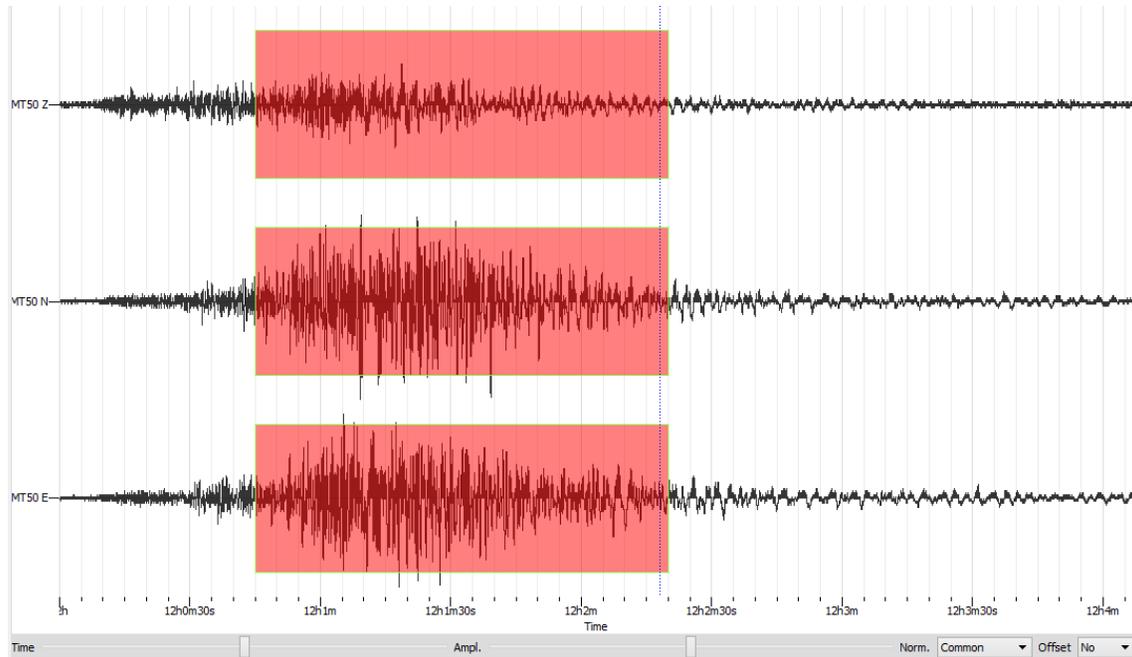


Figura 3.6. Procesamiento de la parte intensa de la señal del acelerograma registrado en la estación MT50 el 30 de septiembre de 1999.

En la *Figura 3.7* se observan los cocientes espectrales obtenidos con el procesamiento de la parte intensa de la señal de los acelerogramas registrados por la estación MT50. Con este procesamiento la frecuencia del sitio se encuentra entre 0.99 hasta 1.95 [Hz], con valores en el periodo de vibración de 0.51 hasta 1.00 [s].

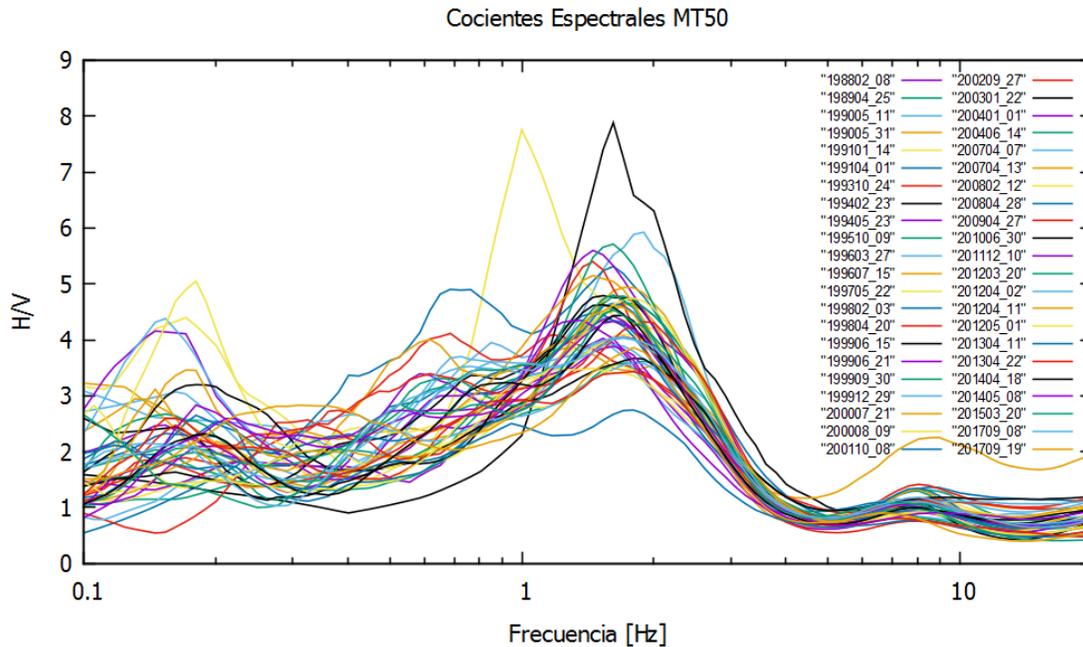


Figura 3.7. Cocientes espectrales de los sismos registrados en la estación MT50 de 1988 a 2017, considerando la parte intensa de la señal.

Para el registro de 1988 la frecuencia del sitio obtenida es de 1.52 [Hz] con un período de 0.65 [s]. Mientras que la frecuencia del sitio para el acelerograma de 2015 es de 1.61 [Hz] con un periodo de 0.61 [s]. Comparando los resultados de ambos registros tenemos una disminución en el periodo de vibración de 0.04 [s] y aumento en la frecuencia del sitio de 0.09 [Hz], estos valores indican que el suelo presente en la zona de estudio se ha compactado.

Los resultados obtenidos con los cocientes espectrales de los sismos ocurridos en septiembre de 2017 indican que la frecuencia del sitio para el sismo ocurrido el 07 es de 1.70 [Hz] con un periodo de 0.58 [s]. Para el sismo del 19 la frecuencia obtenida es de 1.80 [Hz] y periodo de 0.55 [s].

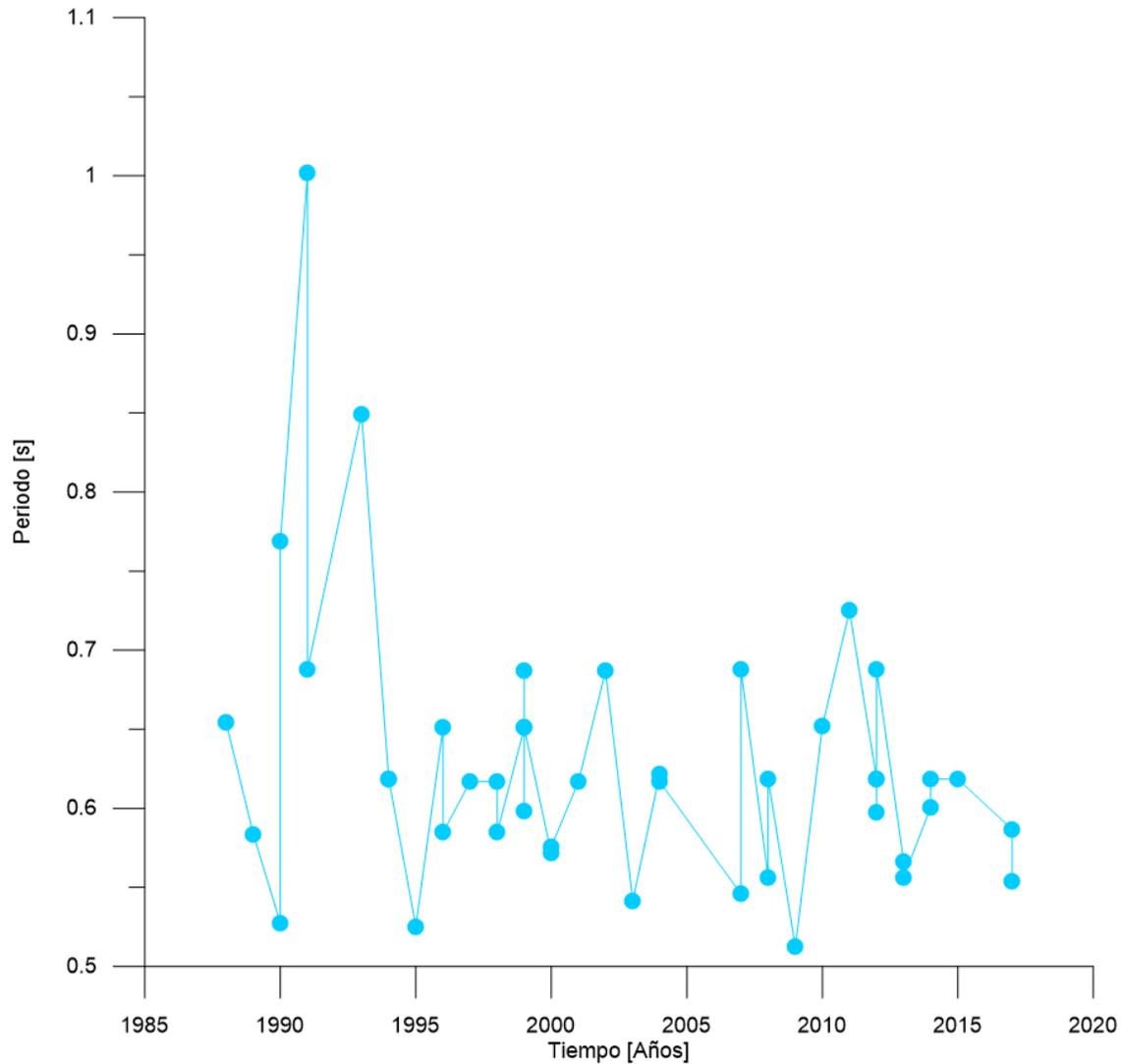


Figura 3.8. Evolución del periodo de vibración del suelo con el tiempo considerando la parte intensa de los acelerogramas analizados.

En la *Figura 3.8* se observa como fue el comportamiento del periodo de vibración del suelo con el paso del tiempo, el cual se encuentra en un rango de 0.51 hasta 1.0 [s] para el análisis de la parte intensa de las señales estudiadas. El incremento en el periodo de vibración ocurre cada 4 y 2 años después de un descenso en el periodo de vibración el cual tarda en ocurrir 1 o 4 años.

Procesamiento Parte Final de la Señal

El procesamiento realizado en este apartado se realizó considerando la coda de los acelerogramas registrados por la estación acelerometrica. La coda corresponde a la parte tardía de la señal que decrece monotónicamente conforme pasa el tiempo hasta alcanzar su nivel original, previo al sismo. En la *Figura 3.9* se muestra un ejemplo de como se realizó este procesamiento para el acelerograma del sismo ocurrido en Septiembre de 1999.

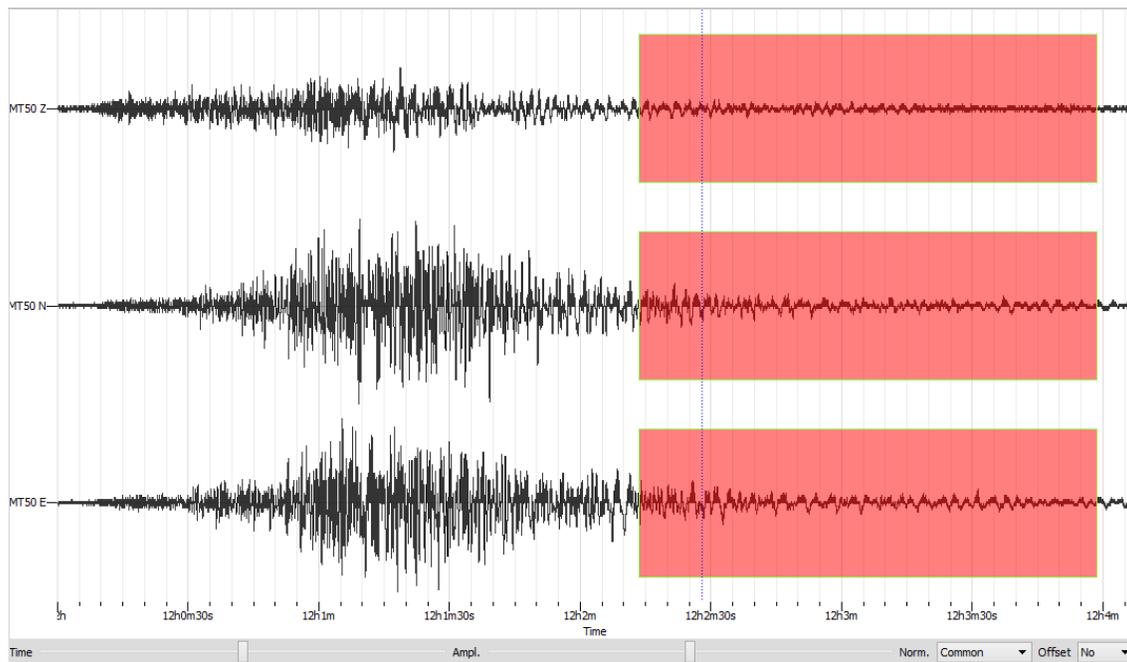


Figura 3.9. Procesamiento de la parte final de la señal del acelerograma registrado en la estación MT50 el 30 de septiembre de 1999.

Los cocientes espectrales obtenidos considerando la parte final de los acelerogramas registrados por la estación acelerométrica se observan en la *Figura 3.10*. En esta imagen se observa una frecuencia del sitio con un rango de 1.38 hasta 2.11 [Hz], con periodo de vibración de 0.47 hasta 0.72 [s].

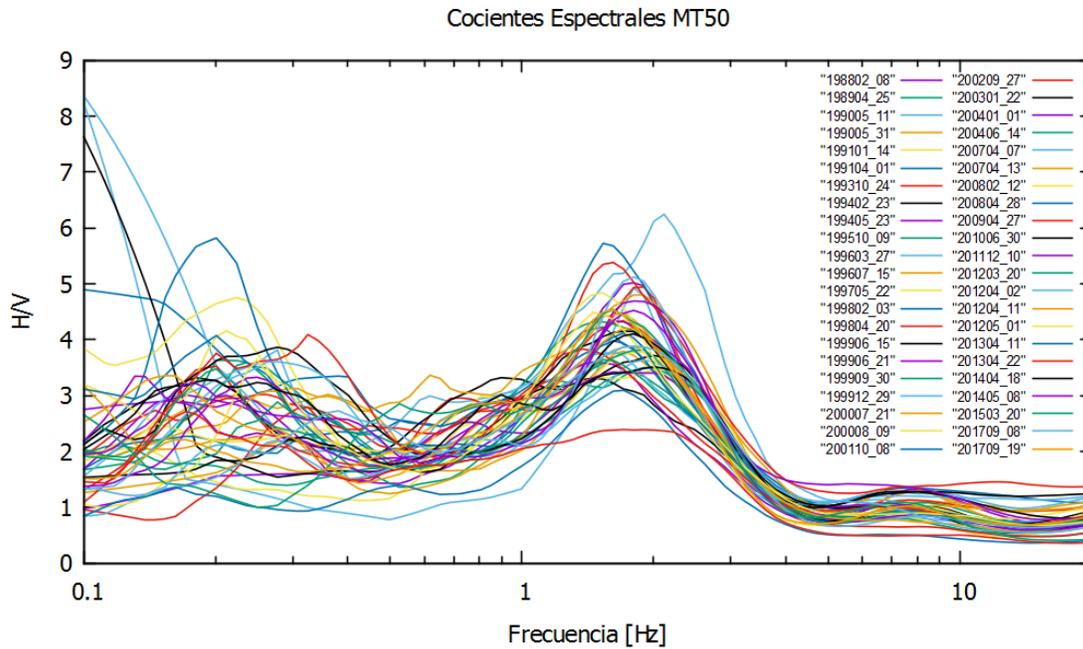


Figura 3.10. Cocientes espectrales de los sismos registrados en la estación MT50 de 1988 a 2017, considerando la parte final de la señal.

Considerando el acelerograma registrado en 1988 y 2015, se tiene que la frecuencia del sitio para el primer registro es de 1.80 [Hz], mientras que para el segundo la frecuencia es de 1.61 [Hz]. Para el acelerograma mas antiguo el periodo de vibración es de 0.55 [s] mientras que para el mas reciente es de 0.62 [s]. Con los datos anteriores tenemos una disminución en la frecuencia del sitio de 0.19 [Hz] así como un aumento en el periodo de vibración de 0.07 [s].

Los resultados obtenidos con los cocientes espectrales para los sismos ocurridos en Septiembre de 2017 muestran una frecuencia de vibrar de 1.79 [Hz] con periodo de vibración de 0.55 [s] para el primer sismo registrados. Para el segundo sismo la frecuencia es de 1.61 [Hz] y periodo de vibración de 0.62 [s].

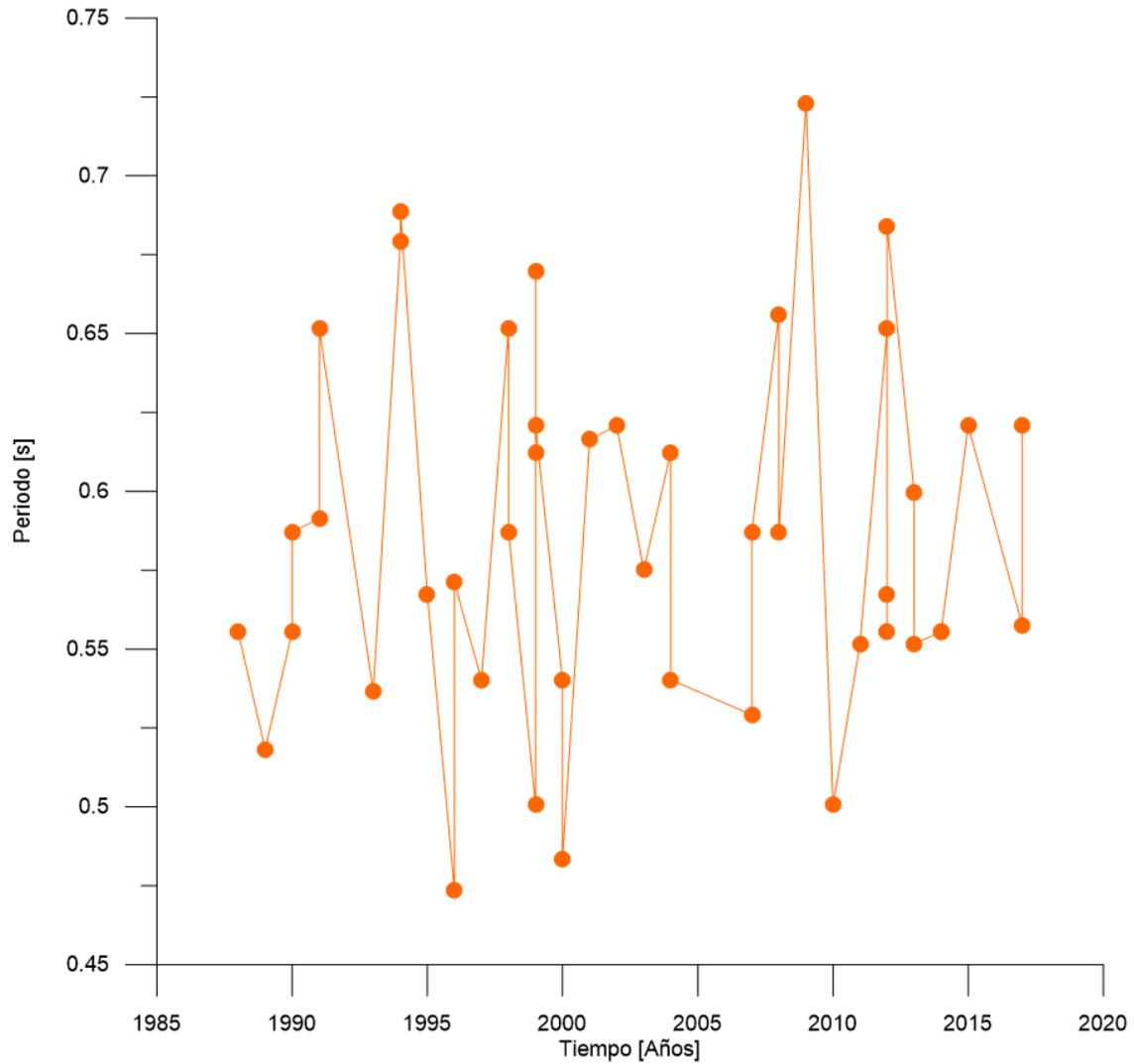


Figura 3.11. Evolución del periodo de vibración del suelo con el tiempo considerando la parte final de la señal.

En la *Figura 3.11* se observa como ha sido el comportamiento del periodo de vibración del suelo con el paso del tiempo resultado del procesamiento de la coda de los acelerogramas analizados en este trabajo. El periodo de vibración se encuentra en un rango de 0.47 a 0.72 [s], en este procesamiento no se observa un comportamiento constante en la zona de estudio, esto se atribuye a las características de los sismos utilizados.

3.1.1. Velocidad de Hundimiento y Espesor de la Capa Compresible

El periodo de vibración correspondiente a la frecuencia fundamental se denomina período característico del sitio. El periodo característico del sitio T_S , depende del espesor H y de la velocidad de onda de corte del suelo V_S . La *Ecuación 3.1* proporciona aproximación del período de vibración en el cual puede esperarse la amplificación más significativa del sitio (Kramer, 1996):

$$T_S = \frac{4H}{V_S} \rightarrow f_S = \frac{V_S}{4H} \quad (3.1)$$

De acuerdo a Aguilar et al. (2003) la correlación existente entre el periodo dominante de vibración de suelo y la velocidad de hundimiento esta dada por la *Ecuación 3.2*.

$$V_H = 2 T_S^{1.9} \quad (3.2)$$

La *Ecuación 3.3* asocia el espesor de los depósitos compresibles con el periodo de vibración.

$$H = 31 (T_S - 0.5)^{1/2} \quad (3.3)$$

Los sitios con mayores depósitos compresibles presentan altas velocidades de hundimiento, mientras que las menores velocidades se encuentran asociados a sitios con menor espesor compresible (Aguilar et al., 2004). La expresión que relaciona la velocidad de hundimiento con el espesor del depósito compresible esta definida por:

$$V_H = 0.0012 (H)^{2.4} \quad (3.4)$$

Las imágenes que se presentan en las páginas siguientes fueron obtenidas haciendo uso de las ecuaciones 3.2 y 3.3, el periodo característico del sitio T_S utilizado fue el obtenido con los cocientes espectrales H/V mostrados en las paginas anteriores.

Procesamiento Señal Completa

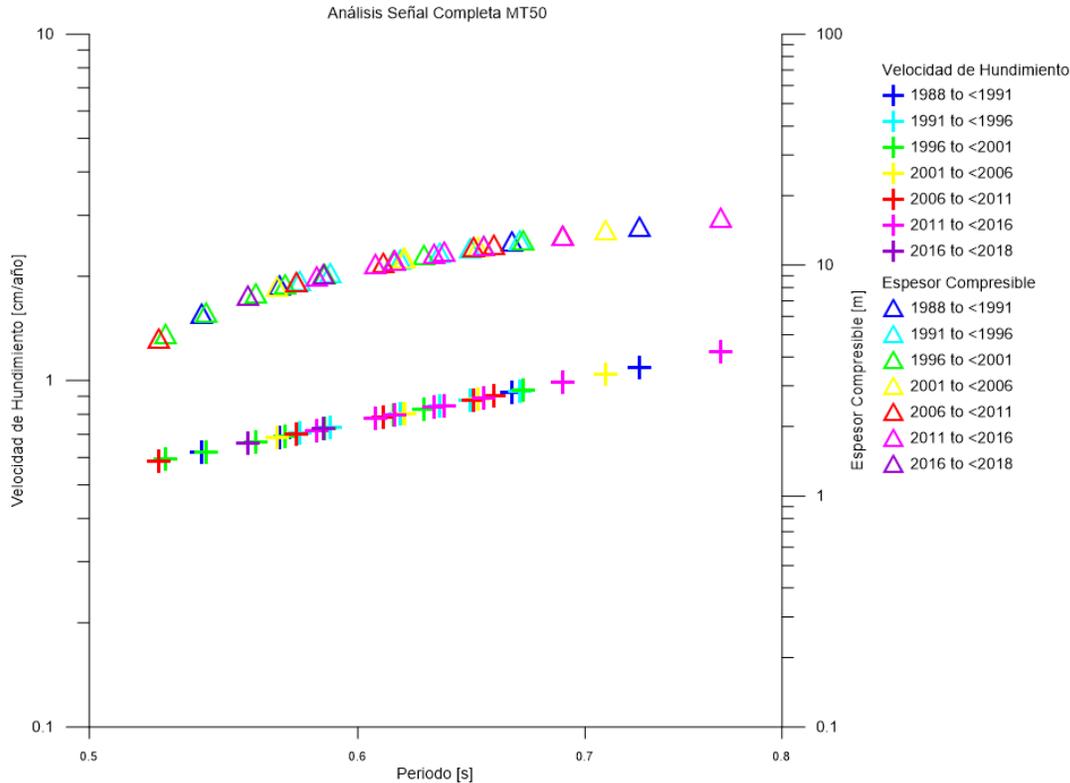


Figura 3.12. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, considerando la señal completa de los sismos registrados en la estación MT50.

En la *Figura 3.12* se muestran los valores de velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible obtenidos con los valores de periodo característico, los cuales se obtuvieron con los cocientes espectrales mostrados en el apartado anterior. Los resultados se muestran en intervalos de tiempo de 5 años.

De acuerdo a los valores mínimos y máximos de periodo característico, la velocidad de hundimiento está en un rango de 0.58 a 1.20 [$cm/año$]. El espesor de la capa compresible está en un rango de 4.80 a 16.08 [m]. Con lo anterior podríamos decir que el hundimiento a lo largo de los últimos 29 años no ha sido constante, ya que si lo fuera significaría que la zona de estudio no ha sufrido cambios o perturbaciones en su entorno.

Los valores obtenidos con el registro de 1988 y 2015, muestran que la velocidad de hundimiento para el primero es de 0.92 [cm/año] y el espesor de la capa compresible para el mismo registro es de 12.64 [m] . Para el segundo registro la velocidad de hundimiento es de 0.79 [cm/año] con espesor de la capa compresible de 10.52 [m] . Con estos valores tenemos una disminución en la velocidad de hundimiento de 0.13 [cm/año] , así como una compactación de 2.12 [m] .

Con los resultados obtenidos de comparar el registro mas antiguo con el mas reciente se observa que existe una disminución en la velocidad de hundimiento así como en el espesor de la capa compresible, esto se debe a que existe también una disminución en el periodo característico del suelo, por lo que podemos decir que el suelo se ha consolidado.

Los valores obtenidos de velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible para los sismos ocurridos en septiembre de 2017, muestran para el primero una velocidad de hundimiento de 0.72 [cm/año] con espesor compresible de 9.10 [m] , para el segundo ocurrido en dicho mes la velocidad de hundimiento calculada fue de 0.65 [cm/año] y espesor compresible de 7.38 [m] . Analizando los resultados obtenidos con los registros de septiembre, se tiene que la velocidad de hundimiento en ambos casos es semejante, la diferencia la encontramos en el espesor de la capa compresible, si comparamos dichos valores tenemos que en 12 días la capa se compacto 1.72 [m] , lo cual es difícil de creer para el lapso de tiempo transcurrido entre los eventos sísmicos ocurridos.

Procesamiento Parte Intensa de la Señal

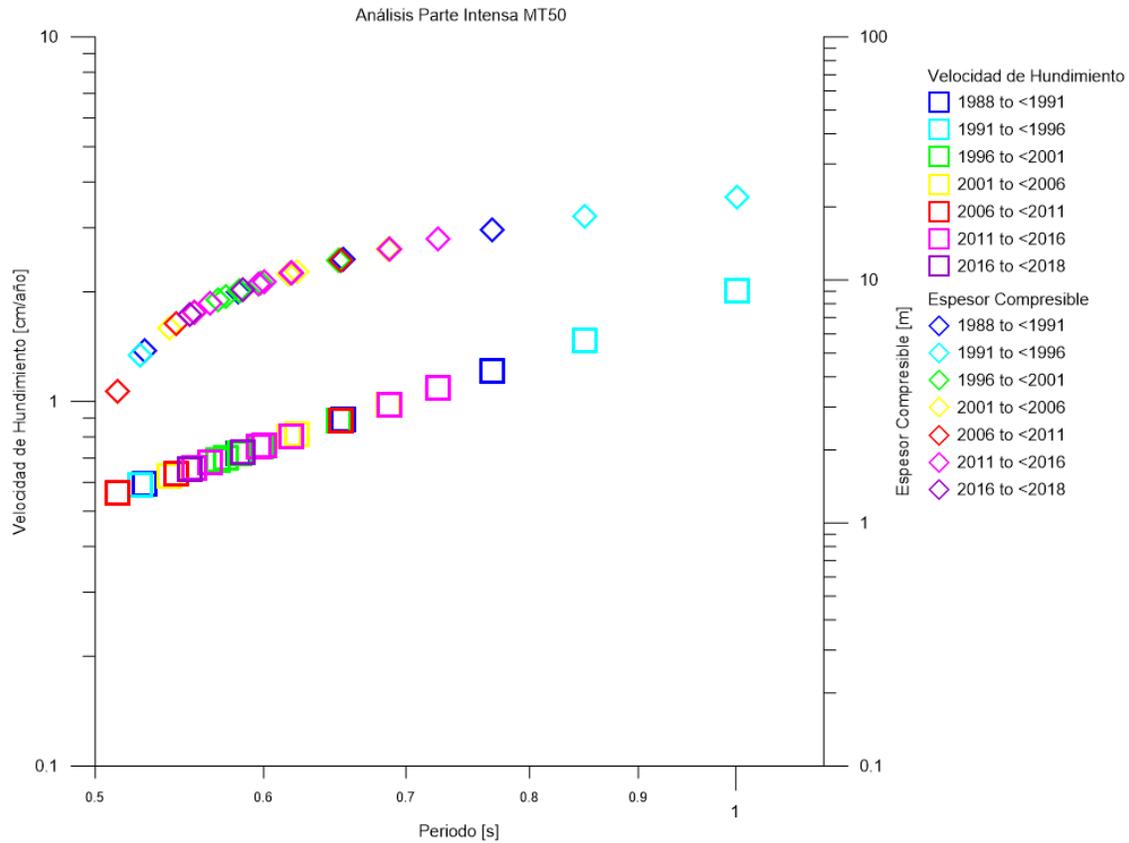


Figura 3.13. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, considerando la parte intensa de los sismos registrados en la estación MT50.

En la *Figura 3.13* se muestran los valores de velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible obtenidos con los valores del periodo característico, los cuales fueron obtenidos con los cocientes espectrales de la parte intensa de los acelerogramas registrados por la estación acelerométrica MT50. Los resultados se muestran en intervalos de tiempo de 5 años.

Considerando los valores de periodo característico obtenidos anteriormente tenemos que la velocidad de hundimiento en la estación MT50 se encuentra en un rango de 0.56 a 2 [$cm/año$]. El espesor de la capa compresible está en un intervalo de 3.46 a 21.95 [m]. En la gráfica se observa que la disminución de la capa compresible no ha sido constante con respecto del tiempo, dado que cada evento sísmico tiene efectos diferentes en la zona de estudio, debido a las características de este.

Considerando los sismos registrados en 1988 y en 2015, se tiene que para el primero se tiene una velocidad de hundimiento de 0.89 [cm/año] y espesor de la capa compresible de 12.17 [m] . Para el segundo sismo la velocidad de hundimiento calculada tuvo un valor de 0.80 [cm/año] y el espesor compresible de 10.67 [m] . Comparando los resultados obtenidos de ambos sismos se tiene disminución en la velocidad de hundimiento de 0.09 [cm/año] , así como disminución en la capa compresible de 1.5 [m] en su espesor.

Existe una relación lineal de la velocidad de hundimiento y el espesor de la capa compresible con respecto al periodo de vibración del suelo, si este ultimo disminuye los dos primeros también lo harán. Al existir disminución en el periodo característico del suelo se tendrá consolidación del suelo.

Los resultados obtenidos para los sismos ocurridos en septiembre de 2017, indican disminución en la velocidad de hundimiento de 0.07 [cm/año] así como una disminución en el espesor de la capa compresible de 1.91 [m] . Para el sismo ocurrido el 07 de septiembre la velocidad de hundimiento obtenida fue de 0.72 [cm/año] y espesor de la capa compresible de 9.12 [m] . Para el sismo del 19 de septiembre la velocidad de hundimiento fue de 0.65 [cm/año] y espesor compresible de 7.21 [m] .

Procesamiento Parte Final de la Señal

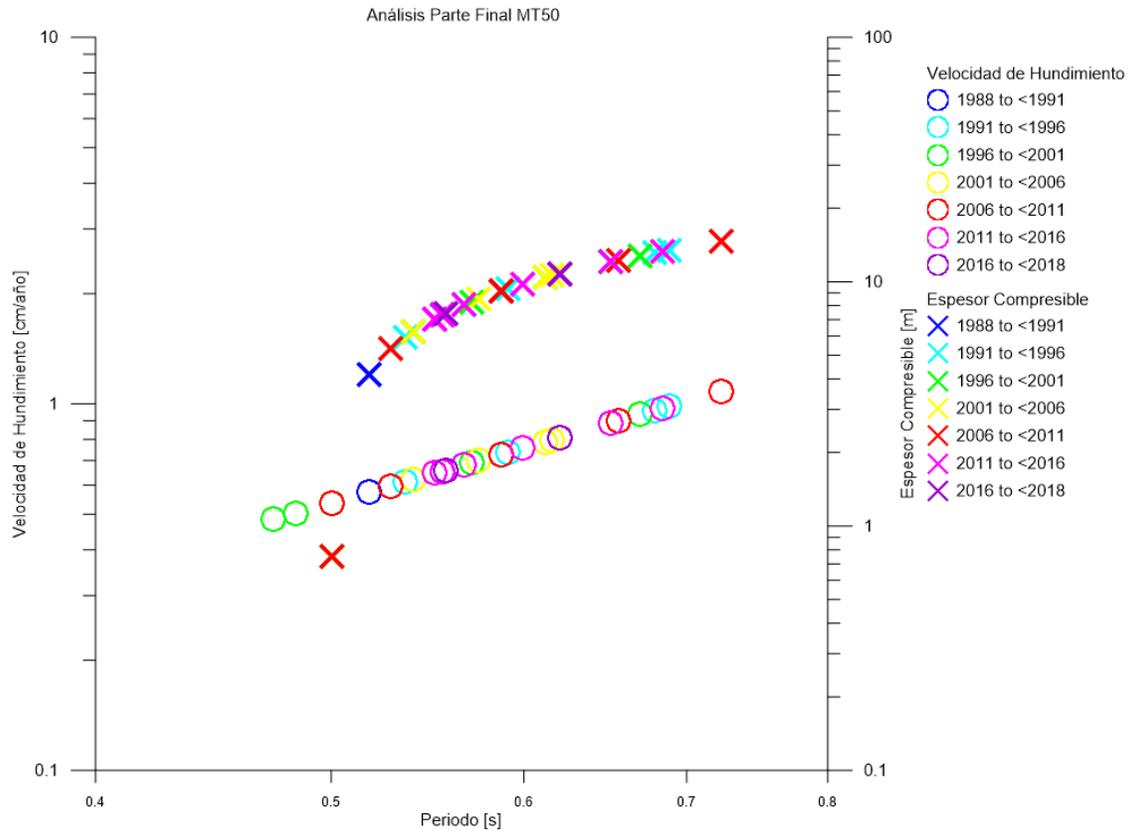


Figura 3.14. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, considerando la parte final de los sismos registrados en la estación MT50.

En la *Figura 3.14* se muestran los resultados valores obtenidos de velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible con respecto al periodo característico del sitio, este ultimo obtenido de los cocientes espectrales de la coda de los acelerogramas registrados por la estación acelerométrica MT50. El rango de la velocidad de hundimiento es de 0.48 a 1.08 [$cm/año$] y la velocidad de hundimiento es de 4.18 a 14.64 [m], estos valores son considerando los valores mínimos y máximos del periodo característico.

Los resultados obtenidos para el sismo de 1988 y 2015 muestran incremento en la velocidad de hundimiento como en el espesor de la capa compresible, para el primero es de 0.15 [cm/año] y para el segundo de 3.47 [m] . Para el primer sismo la velocidad de hundimiento obtenida fue de 0.65 [cm/año] y el espesor de la capa compresible tenía un valor de 7.30 [m] . Para el segundo registro la velocidad e hundimiento es de 0.80 [cm/año] con espesor compresible de 10.77 [m] .

Para los sismos ocurridos en septiembre se tiene el mismo comportamiento que en el análisis del acelerograma mas antiguo y el mas reciente, es decir, se presenta incremento en la velocidad de hundimiento así como en el espesor de la capa compresible. Para el sismo del 07 de septiembre la velocidad de hundimiento era de 0.67 [cm/año] con espesor compresible de 7.43 [m] . Para el sismo ocurrido el 19 de septiembre los valores fueron de 0.80 [cm/año] para la velocidad de hundimiento y de 10.77 [m] para el espesor de la capa compresible. En 12 días se tuvo un incremento en la velocidad de hundimiento de 0.15 [cm/año] y de 3.34 [m] en el espesor de la capa compresible.

3.2. Estimaciones del Periodo de Vibración del Suelo a partir de mediciones de Ruido Ambiental

En la Primera Sección del Bosque de Chapultepec se tomaron mediciones de ruido ambiental de manera continua por aproximadamente una hora en cada punto de interés a 200 muestras por segundo con sismómetros de banda ancha *CMG-6TD Guralp Systems*. Estos registros se realizaron para conocer la respuesta sísmica de la zona de estudio con la técnica de cocientes espectrales. Los puntos donde fueron ubicados los sismómetros se muestran en la *Figura 3.15* con puntos amarillos, los detalles de las mediciones realizadas se encuentran en la *Tabla B.1*.

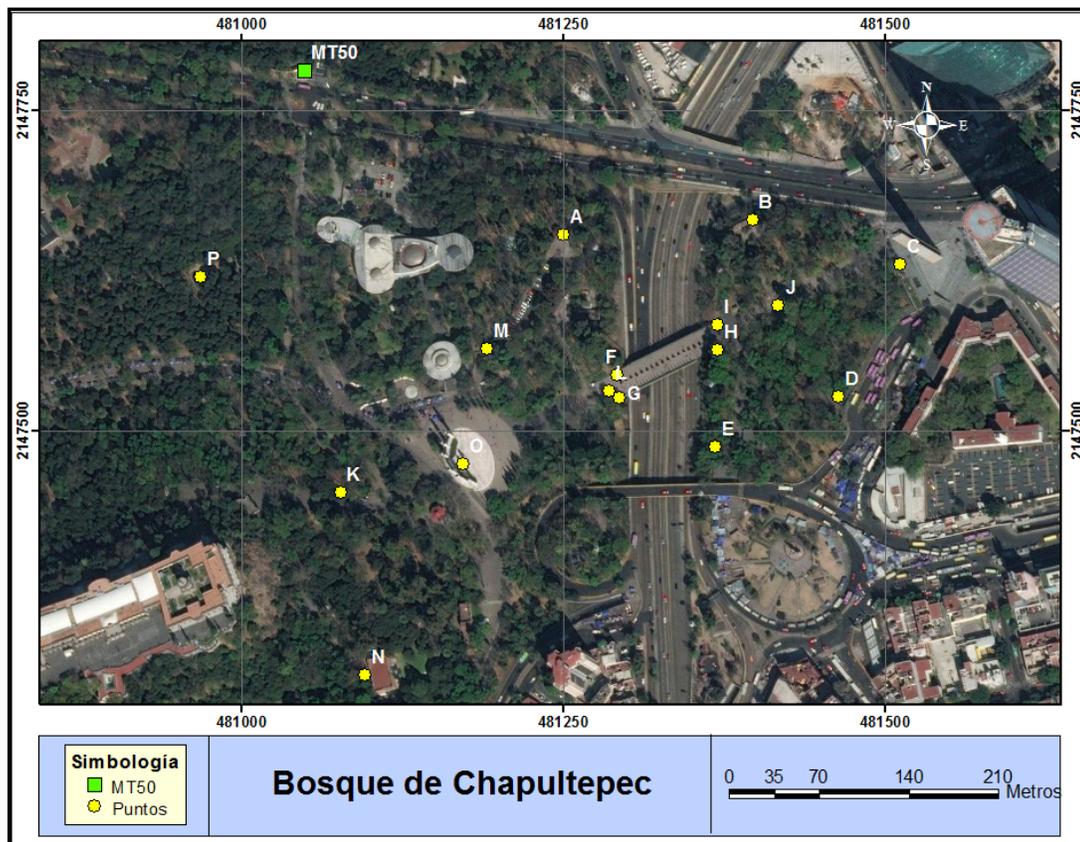


Figura 3.15. Ubicación de las mediciones de ruido ambiental dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec (círculos amarillos) y estación acelerométrica MT50 (cuadro verde).

Procesamiento de datos

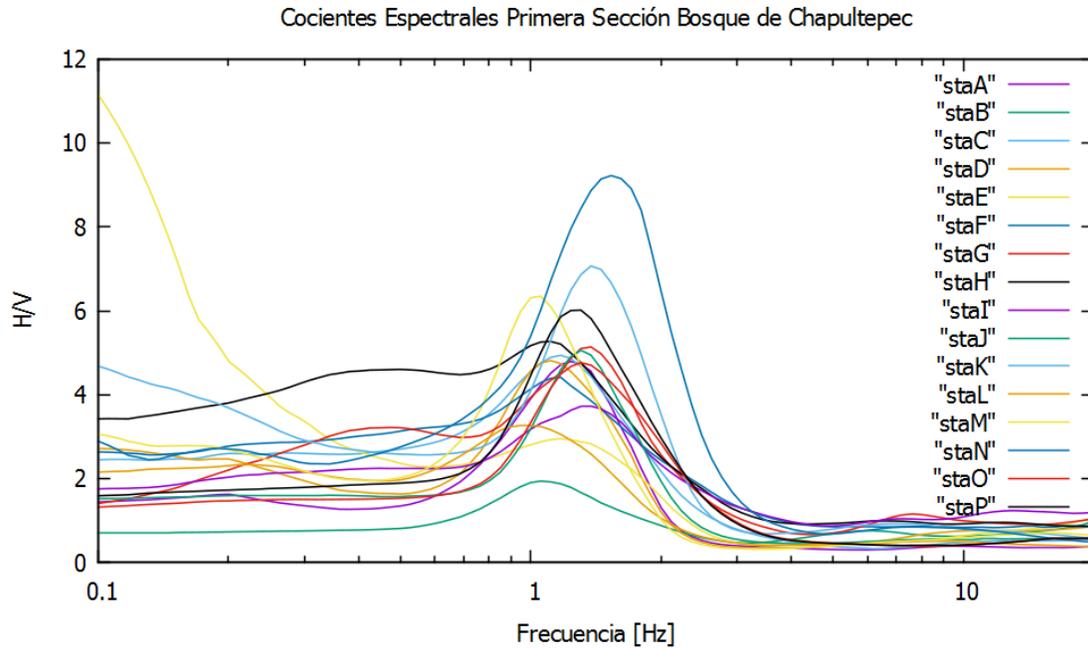


Figura 3.16. Cocientes espectrales de las mediciones de ruido ambiental realizadas en Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

En la figura de arriba se presentan los cocientes espectrales obtenidos del procesamiento de los registros de ruido ambiental, los cuales fueron tomados dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec. Este procesamiento se realizó con los parámetros utilizados para procesar los acelerogramas de la estación acelerométrica MT50, para este caso las ventanas utilizadas fueron de 60 [s] y no hubo traslape entre ella, debido a que los registros eran de una hora.

En la *Figura 3.16* se observa que la frecuencia de sitio entorno al Puente de los Leones esta en un rango de 0.99 a 1.55 [Hz], con un periodo de vibración de 0.65 a 1.01 [s].

Con el periodo característico obtenido con los cocientes espectrales de la figura anterior y las ecuaciones 3.2 y 3.3 mostradas en el apartado ecuaciones 3.1.1 se obtuvo la velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible para cada uno de los puntos medidos entorno al Puente de los Leones.

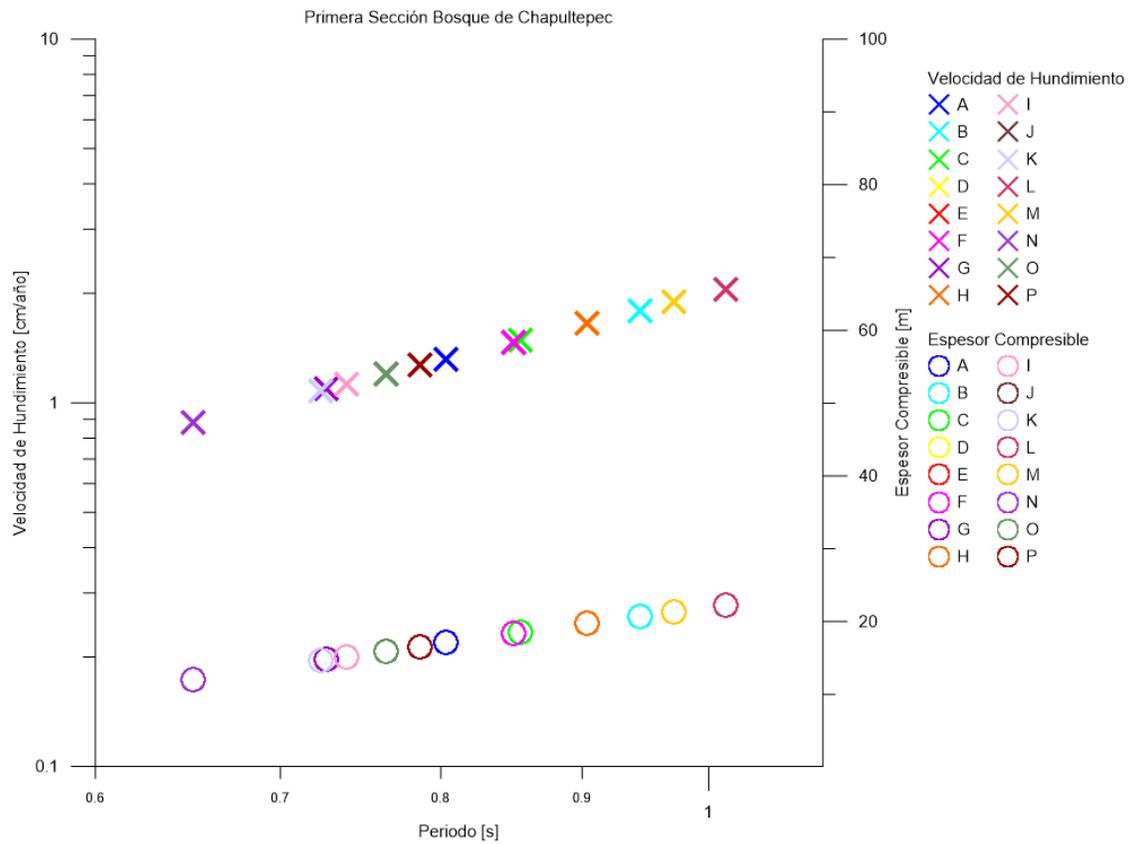


Figura 3.17. Correlación entre el periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible de las mediciones realizadas en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec

En la *Figura 3.17* se muestran los resultados de velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible respecto al periodo característico dentro de la zona de estudio. La velocidad de hundimiento dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec está en un intervalo de 0.88 a 2.06 [cm/año] y el espesor de la capa compresible se encuentra entre los 12.05 y 22.24 [m].

De las mediciones realizadas en el Puente de los Leones correspondiente a los puntos *F*, *G*, *H* e *I*, son de interés los resultados obtenidos en estos puntos debido a que la plancha del puente presenta agrietamiento y fracturamiento en los extremos de la misma, los rasgos estructurales antes mencionados los asociamos al hundimiento presente en los extremos del puente. Los puntos tomados en los extremos del puente se presentan en la *Figura 3.18*



Figura 3.18. Ubicación de las mediciones de ruido ambiental en el Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec (círculos amarillos)

El periodo característico obtenido para el estribo del lado Oeste (hacia el Monumento a los Niños Héroes) es de 0.85 [s] para el punto ubicado en la parte norte (punto F) y de 0.73 [s] para el ubicado en la parte sur (punto G).

La velocidad de hundimiento para el punto F es de 1.47 [$cm/año$] y espesor compresible de 18.34 [m]. Para el punto G la velocidad de hundimiento es de 1.09 [$cm/año$] y espesor compresible de 14.78 [m]. Comparando los valores anteriores se observa disminución en el periodo característico del sitio de 0.12 [s], la velocidad de hundimiento disminuyó 0.38 [$cm/año$] y el espesor de la capa compresible también se ve afectado ya que disminuyó 3.56 [m], la distancia entre ambos puntos medidos es de alrededor de 20 m.

El estribo ubicado en el lado Este del Puente de los Leones (hacia la Estela de Luz) tiene periodo característico de 0.74 [s] para el punto I (ubicado en la parte norte del puente) y de 0.90 [s] para el punto H (colocado en la parte sur del puente).

El punto I presenta velocidad de hundimiento de 1.13 [$cm/año$] y 15.18 [m] de espesor de la capa compresible. Para el punto H la velocidad de hundimiento es 1.65 [$cm/año$] y 19.69 [m] de espesor compresible. Considerando los valores obtenidos en el estribo Este del puente tenemos disminución de 0.16 [s] en el periodo característico, 0.52 [$cm/año$] en la velocidad de hundimiento y 4.5 [m] en el espesor compresible, estas diferencias se tienen una distancia aproximada de 20 m.

Con lo anterior se observa que el comportamiento en ambos estribos del Puente de los Leones no es el mismo, la similitud de los valores obtenidos es cruzada, es decir, el punto F (ubicado al NW del puente) concuerda con los valores del punto H (medido al SE del puente), así como el punto I (NE del puente) es similar al punto G (SW del puente).

En la pagina siguiente se presenta la *Tabla 3.1*, en ella se presentan los resultados obtenidos con el procesamiento de las mediciones de ruido ambiental, los valores corresponden a frecuencia de sitio, periodo característico, velocidad de hundimiento y espesor compresible para cada uno de los puntos medidos dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

Estación	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Velocidad de Hundimiento [$cm/año$]	Espesor Compresible [m]
A	1.24	0.80	1.32	17.09
B	1.06	0.94	1.79	20.67
C	1.17	0.85	1.48	18.46
D	1.11	0.90	1.65	19.69
E	1.18	0.85	1.47	18.34
F	1.18	0.85	1.47	18.34
G	1.37	0.73	1.09	14.78
H	1.11	0.90	1.65	19.69
I	1.35	0.74	1.13	15.18
J	1.31	0.76	1.20	15.95
K	1.38	0.72	1.08	14.66
L	0.99	1.01	2.06	22.24
M	1.03	0.97	1.89	21.28
N	1.54	0.65	0.88	12.05
O	1.31	0.76	1.20	15.95
P	1.27	0.79	1.27	16.59

Tabla 3.1. Resultados obtenidos de frecuencia del sitio, periodo característico del sitio, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible de los puntos de medidos dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

Capítulo 4

Análisis de Resultados

Para complementar las mediciones de Ruido Ambiental dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec se realizaron levantamientos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (*TRE*) 2D, estos métodos se realizaron en ambos lados del Puente de los Leones. En este apartado también se muestra el análisis de los resultados obtenidos con los procesamientos realizados a los acelerogramas registrados por la estación acelerométrica MT50, así como el de las mediciones de ruido ambiental realizadas dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

4.1. Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D

Los Tomografías de Resistividad Eléctrica (*TRE*) 2D realizadas en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec, se colocaron en los extremos del Puente de los Leones, una en el lado Este y otra en el lado Oeste como se muestra en la *Figura 4.1*. Para realizar estas mediciones se utilizó un resistivímetro *Syscal Pro de Iris Instruments*, propiedad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En ambas *TRE* se utilizaron 48 electrodos metálicos de una aleación de Cobre, Bronce y Zinc. La línea ubicada en el lado Este del Puente de los Leones tuvo una distancia entre electrodos de 2 m, cubriendo una longitud de 96 m, con orientación NW-SE. La línea ubicada al Oeste del Puente de los Leones tuvo distancia eléctrica de 4 m, cubriendo una longitud de 192 m, la orientación de esta fue SE-NW.

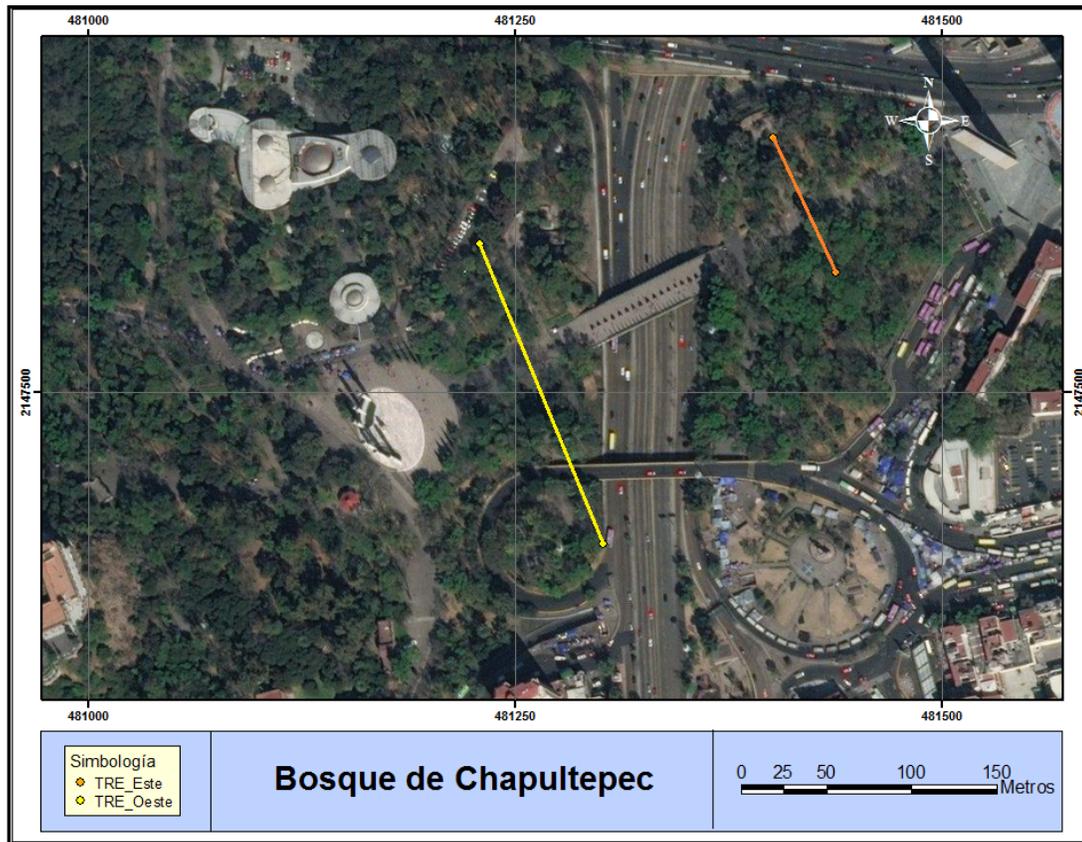


Figura 4.1. Ubicación de las líneas de TRE 2D, línea naranja lado Este y línea amarilla lado Oeste del Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

La inversión de los datos de las Tomografía de Resistividad Eléctrica se realizó con el Software *Earthimager 2D: Inversion and Modeling Software* de la empresa AGI (*Advanced Geosciences, Inc*).

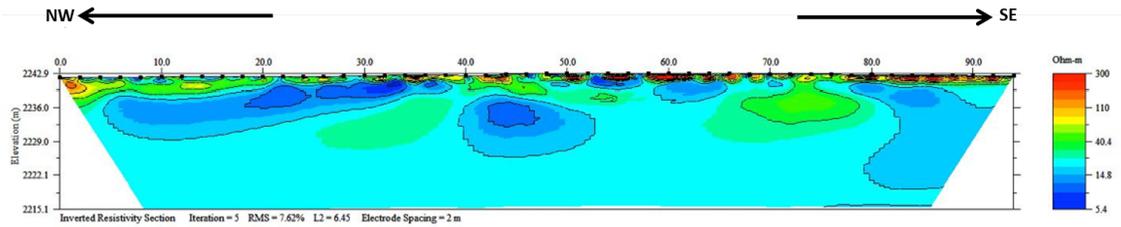


Figura 4.2. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D, lado Este del Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec

En la *Figura 4.2* se observan los resultados de la inversión de la TRE 2D realizada en el lado Este del Puente de los Leones, en esta imagen se observa que no existe variación significativa de la resistividad en función de la profundidad, por lo que se puede hablar de un solo estrato geoelectrico con resistividades entre 20 y 40 $[\Omega \cdot m]$. En este estrato, la profundidad de penetración no fue mayor a 13 m, destacan valores de resistividad altos, mayores a 300 $[\Omega \cdot m]$ en la parte central del arreglo, es decir, por debajo del camino Juventud Heroica y en el extremo oriente de éste. Estos altos resistivos se asocian a registros de alcantarillado y presencia de tuberías (Cárdenas, 2014).

Hacia la parte poniente y a una profundidad promedio de 5 metros se encuentra una zona de material saturado que sigue la pendiente del terreno hacia la Av. Circuito Interior. Otra zona de resistividad baja de aproximadamente 5 $[\Omega \cdot m]$ se encuentra por debajo de la plancha del camino Juventud Heroica que está delimitada entre 38 y 66 m.

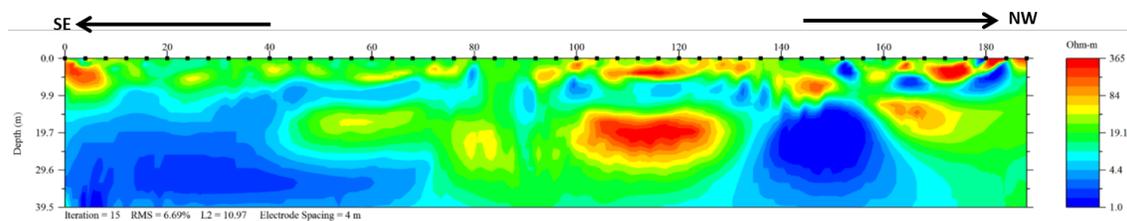


Figura 4.3. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D, lado Oeste del Puente de los Leones dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec

En la *Figura 4.3*. Se observan dos horizontes geoelectricos el somero con una resistividad de 20 $[\Omega \cdot m]$ y un espesor de 18 m; el horizonte profundo presenta una resistividad baja menor a 5 $[\Omega \cdot m]$. Entre los metros 60 y 132 se observa que el horizonte somero se acuña dentro del horizonte profundo. A partir del metro 100 hasta el 124 se observa una zona alto resistivo correspondiente al área donde se ubica la base del puente.

4.2. Cocientes Espectrales H/V

4.2.1. Estación Acelerométrica MT50

En la *Tabla 4.1* se presentan los resultados obtenidos de los procesamientos realizados a los acelerogramas de los sismos ocurridos en 1988 y 2015, con la finalidad de estimar los cambios ocurridos en la estación MT50 a lo largo de 27 años.

Señal	Sismo 1988		Sismo 2015		Comparación	
	Frecuencia	Periodo	Frecuencia	Periodo	Frecuencia	Periodo
Completa	1.50	0.67	1.63	0.62	0.13 (+)	0.05 (-)
Parte Intensa	1.53	0.65	1.62	0.62	0.09 (+)	0.03 (-)
Parte Final	1.80	0.56	1.61	0.62	0.19 (-)	0.06 (+)

Tabla 4.1. Tabla comparativa de los resultados obtenidos de cada uno de los procesamientos realizados a los acelerogramas de los sismos registrados en 1988 y 2015.

Analizando los resultados mostrados en la tabla anterior, en los dos primeros procesamientos se tiene incremento en la frecuencia del sitio de aproximadamente 0.1 [Hz], lo cual implica disminución en el periodo característico de aproximadamente 0.05 [s], con esto decimos que la estación MT50 ha sufrido compactación. Los resultados obtenidos del procesamiento de la parte final de los acelerogramas muestran valores diferentes a los dos primeros, es decir, en este procesamiento se obtuvo aumento en la frecuencia del sitio de aproximadamente 0.2 [Hz] e incremento en el periodo característico del sitio.

Señal	Frecuencia		Periodo	
	Media	Desviación Estándar	Media	Desviación Estándar
Completa	1.63	0.14	0.62	0.05
Parte Intensa	1.62	0.18	0.63	0.09
Parte Final	1.72	0.17	0.59	0.06

Tabla 4.2. Análisis estadístico de la frecuencia del sitio y periodo característico de los procesamientos realizados a los acelerogramas registrados por la estación acelerométrica MT50.

En la *Tabla 4.2* se muestra un análisis estadístico realizado a los valores obtenidos de cada uno de los procesamientos realizados a los acelerogramas registrados por la estación MT50. El procesamiento mas confiable es el realizado a la señal completa, los resultados obtenidos con este procesamiento presentan menor desviación estándar en la frecuencia del sitio así como en el periodo característico con valores de 0.14 y 0.05 respectivamente.

El siguiente procesamiento confiable es el realizado a la parte final de los acelerogramas tuvo desviación estándar de 0.17 para la frecuencia del sitio y 0.06 para el periodo. El procesamiento menos confiable es el realizado a la parte intensa de los registros analizados.

Señal	Sismo 1988		Sismo 2015		Comparación	
	Velocidad	Espesor	Velocidad	Espesor	Velocidad	Espesor
Completa	0.92	12.64	0.79	10.53	0.13 (-)	2.11 (-)
Parte Intensa	0.89	12.17	0.80	10.67	0.09 (-)	1.50 (-)
Parte Final	0.65	7.30	0.81	10.77	0.16 (+)	3.47 (+)

Tabla 4.3. Tabla comparativa de los valores obtenidos de la velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible con los diferentes procesamientos realizados a los registros de 1988 y 2015.

En la *Tabla 4.3* se muestran los valores de velocidad de hundimiento y espesor compresible del acelerograma de 1988 y 2015, considerando los tres procesamientos realizados a los datos. La velocidad de hundimiento era de aproximadamente 0.90 [cm/año] en 1988, esto considerando el procesamiento de la señal completa y parte intensa para la misma. Para el sismo registrado 27 años después tenemos una disminución de 0.1 [cm/año] , para el 2015 la velocidad de hundimiento es de 0.80 [cm/año] considerando ambos procesamientos.

Los valores del espesor de la capa compresible también se vieron afectados, en 1988 este era superior a los 12 [m]. Para el 2015 los valores obtenidos muestran una disminución en este valor de aproximadamente 2 [m],

El procesamiento de la coda de los acelerogramas muestra que en 27 años la velocidad de hundimiento aumento cerca de 0.16 [cm/año] , ya que pasó de 0.65 a 0.81 [cm/año] en 27 años. Los valores de espesor compresible con este procesamiento muestran aumento en el mismo de aproximadamente 3.5 [m] en el mismo lapso de tiempo, ya que de 7.30 [m] en 1988 se tiene 10.77 [m] en 2015.

Lo resultados mostrados en la *Tabla 4.3* se pueden confirmar con ayuda de la *Tabla 4.4* en la cual se presenta el incremento del Crecimiento Poblacional y Crecimiento Urbano en la CDMX de 1990 a 2015. Para el primero el aumento fue de 0.68 millones de habitantes, mientras que para el segundo fue de 0.81 millones de viviendas en un periodo de 15 años. Esto aunado a la demanda del consumo de agua mostrado en la *Figura 2.6*, por lo que podríamos asumir que a mayor población; mayor es la demanda de agua en la CDMX, teniendo como consecuencia la compactación del suelo .

	1990	2015	Comparación
Crecimiento Poblacional	8.23	8.91	0.68 (+)
Crecimiento Urbano	1.79	2.60	0.81 (+)

Tabla 4.4. Tabla comparativa del Crecimiento Poblacional y Crecimiento Urbano en la CDMX de 1990 a 2015.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos con los procesamientos realizados a los acelerogramas de los sismos ocurridos en Septiembre de 2017, con la finalidad de comparar el comportamiento del subsuelo de la zona de estudio con registros de sismos interplaca e intraplaca en un lapso de tiempo pequeño.

Señal	07/Septiembre		19/Septiembre		Comparación	
	Frecuencia	Periodo	Frecuencia	Periodo	Frecuencia	Periodo
Completa	1.71	0.59	1.80	0.56	0.09(+)	0.03(-)
Parte Intensa	1.70	0.59	1.80	0.55	0.10 (+)	0.04 (-)
Parte Final	1.79	0.56	1.61	0.62	0.18 (-)	0.06 (+)

Tabla 4.5. Tabla comparativa de los resultados obtenidos al realizar los tres diferentes procesamientos con los registros del 07 y 19 de Septiembre de 2017.

Los resultados mostrados en la *Tabla 4.5* indican disminución en el periodo característico del suelo entre 0.03 y 0.04 [s], así como aumento en la frecuencia del sitio de aproximadamente 0.1 [Hz]. Como se ha mencionado antes la disminución en el periodo del suelo indica compactación en el suelo, estos valores son resultado del procesamiento de la señal completa y parte intensa de los acelerogramas registrados por la estación MT50..

Con el procesamiento de la coda de los sismos ocurridos en Septiembre de 2017 los resultados indican aumento en el periodo característico de 0.06 [s], con esto tenemos que el suelo se esta descomprimiendo.

Señal	07/Septiembre		19/Septiembre		Comparación	
	Velocidad	Espesor	Velocidad	Espesor	Velocidad	Espesor
Completa	0.73	9.11	0.66	7.38	0.07 (-)	1.73 (-)
Parte Intensa	0.73	9.12	0.65	7.21	0.08 (-)	1.91 (-)
Parte Final	0.66	7.43	0.81	10.77	0.15 (+)	3.34 (+)

Tabla 4.6. Tabla comparativa de la velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible obtenidos con los procesamientos realizados a los registros de los sismos del 07 y 19 de Septiembre de 2017.

En la *Tabla 4.6* se presentan los resultados de velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, obtenidos al realizar el procesamiento a los sismos ocurridos en septiembre de 2017. Para el sismo ocurrido el 07 de septiembre se tiene disminución en la velocidad de hundimiento y espesor compresible de entre 0.07 y 0.08 [$cm/año$] para el primero y de entre 1.7 y 1.9 [m] para el segundo, estos valores fueron resultados de considerar la señal completa y parte intensa de los acelerogramas analizados.

Con el procesamiento de la parte final de los acelerogramas se observa aumento en la velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible, para el primero de 0.15 [$cm/año$] y para el segundo de 3.34 [m] en 12 días. Este aumento podría deberse a tiempo que tarda la señal en alcanzar su nivel original, también a la duración del sismo; ya que la coda es proporcional al tamaño del mismo.

Los resultados son similares de las comparaciones realizadas entre el registro de 1988 y el de 2015, con respecto a los sismos ocurridos en Septiembre de 2017, con el procesamiento de la señal completa y parte intensa de la misma en ambos casos se tiene que el suelo esta en proceso de compactación. Es decir, se tiene disminución en el periodo característico del suelo, así como disminución en el espesor de la capa compresible.

También es importante mencionar que la diferencia del espesor compresible en tan poco tiempo no es factible, ya que en 12 días es imposible que el suelo se compacte alrededor de 2 [m], así como que el espesor aumente poco mas de 3 [m]. Dichas diferencias podrían atribuirse a que el primer sismo ocurrido en Setiembre de 2017 fue interplaca y el segundo intraplaca.

4.2.2. Puente de los Leones

Los cocientes espectrales obtenidos en el Puente de los Leones (*Figura 3.15*), indican que la respuesta de sitio no es la misma en cada uno de los estribos del mismo. En la siguiente *Tabla 4.7* se muestran los resultados de los puntos medidos en los extremos del Puente.

Punto	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Velocidad [$cm/año$]	Espesor [m]
F	1.18	0.85	1.47	18.34
G	1.37	0.73	1.09	14.78
H	1.11	0.90	1.65	19.69
I	1.35	0.74	1.13	15.18

Tabla 4.7. Tabla comparativa de los valores obtenidos de frecuencia de sitio, periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible obtenidos en los extremos del Puente de los Leones en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec

De la tabla anterior se tiene que el par de mediciones realizadas por lado del Puente muestra diferencias entre sí, es decir, para el lado Este del Puente (hacia la Estela de Luz) correspondiente a los puntos *I* y *H* existe un aumento en el periodo característico del primer al segundo punto, con lo que podemos decir que para el estribo de este lado del puente el espesor disminuye de S-N, la diferencia en el espesor es de alrededor de 4.5 [m]. Para las mediciones en el estribo Oeste (hacia el Monumento a los Niños Héroes) puntos *F* y *G*, el periodo característico disminuye del primero al segundo, con esto tenemos que para este lado del puente el espesor disminuye de N-S, esta diferencia es de aproximadamente 3.5 [m].

Los puntos que tienen similitud en el periodo característico son los puntos *F* ubicado en la parte NW del puente con el punto *H* medido en el SE del puente, así como el punto *I* al NE del puente con el *G* al SW.

Punto	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Velocidad [$cm/año$]	Espesor [m]
A	1.24	0.80	1.32	17.09
K	1.38	0.72	1.08	14.66
L	0.99	1.01	2.06	22.24
M	1.03	0.97	1.89	21.28
N	1.54	0.65	0.88	12.05
O	1.31	0.76	1.20	15.95
P	1.27	0.79	1.27	16.59

Tabla 4.8. Tabla comparativa de los valores obtenidos de frecuencia de sitio, periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible de los puntos medidos en el lado Oeste del Puente de los Leones en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec

Considerando las mediciones realizadas en torno al Puente de los Leones tenemos que el lado Oeste del puente correspondiente a los puntos *A*, *K*, *L*, *M*, *N*, *O* y *P* mostradas en la *Tabla 4.8* es mas estable, en dicho lado se tiene disminución del periodo característico en las partes N-S y E-W, lo que significa que el espesor compresible disminuye en esas partes.

Punto	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Velocidad [$cm/año$]	Espesor [m]
B	1.06	0.94	1.79	20.67
C	1.17	0.85	1.48	18.46
D	1.11	0.90	1.65	19.69
E	1.18	0.85	1.47	18.34
J	1.31	0.76	1.20	15.95

Tabla 4.9. Tabla comparativa de los valores obtenidos de frecuencia de sitio, periodo de vibración del suelo, velocidad de hundimiento y espesor de la capa compresible de los puntos medidos en el lado Este del Puente de los Leones en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec

En la *Tabla 4.9* se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de ruido ambiental realizadas en el lado Este del Puente de los Leones corresponden a los puntos *B*, *C*, *D*, *E* y *J*, en dicho lado del puente se tiene disminución en el periodo característico en la parte E-W. En general se observa que en los puntos medidos en los estribos, el periodo característico disminuye de SE a NE.

Capítulo 5

Conclusiones

El incremento en la población de la CDMX ha tenido como consecuencia un incremento en la demanda de agua, lo que significa aumento en la explotación del acuífero de la Ciudad de México. Con el paso del tiempo la recarga del acuífero ha ido disminuyendo debido al crecimiento urbano, el cual ha propiciado que las zonas de recarga disminuyan en la Ciudad de México. La población en la CDMX se incrementó de 1990 a 2015 en 0.68 millones de habitantes correspondiente a 8.26 % de su población. El crecimiento urbano en el mismo lapso de tiempo fue del 45.45 %, es decir 0.81 millones de viviendas. Mientras que el incremento en la demanda en el servicio del vital líquido fue de $18.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

El impacto de las estadísticas mencionadas fue confrontada con los resultados de la evaluación de respuesta sísmica de la estación acelerométrica *MT50*. Los resultados de este estudio muestran que en 27 años la capa compresible disminuyó de espesor (de 12.64 a 10.53 [m], es decir 2.11 [m]) y como consecuencia se observa un ligero disminución en el periodo característico del sitio (de 0.67 a 0.62 [s]).

En el puente de los Leones, los resultados de los cocientes espectrales de ruido ambiental muestran que los estribos se ubican en capas compresibles de diferente espesor. El estribo Este (hacia la Estela de Luz) presenta un periodo característico de 0.8 [s] y espesor de la capa compresible de 18.6 [m]. El lado Oeste (hacia el Monumento a los Niños Héroe) de la tiene periodo característico de 0.7 [s] y espesor de la capa compresible de 15.2 [m].

Finalmente, las metodologías utilizadas en este trabajo pueden ser aplicadas en otras estaciones acelerométricas con el fin de analizar el comportamiento de la capa compresible lo largo del tiempo. Se recomienda realizar un monitoreo geológico-geofísico de forma periódica en los alrededores del Puente de los Leones en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec. Monitoreo que permita comprender los efectos de la subsidencia local y adelantar decisiones que salvaguarden las estructuras civiles del sitio.

Bibliografía

- [1] AGUAYO, J. E. & MARÍN, S. (1989). Evolución Geológica de la Cuenca de México. *Boletín Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, 25-41.
- [2] AGUILAR, H. R., GALICIA, M., PÉREZ-ROCHA, L. E., AVILÉS, J., VIEITEZ, L., SALAZAR, M. (2003). Ground surface subsidence effect in soil dynamics properties. *XII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones*.
- [3] AGUILAR, H. R., GALICIA, M., SALAZAR, M., AVILÉS, J. (2004). Changes in Mexico's Valley seismic design spectra by ground surface subsidence. *X Congreso Colombiano de Geotecnia. Paipa: Sociedad Colombiana de Geotecnia*.
- [4] BRAJA, M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. (4^a ed.). México: Cengage Learning.
- [5] CÁRDENAS, M. (2014). *Informe Técnico 6. Estudio Geofísico del Talud Puerta de los Leones 1^a Sección del Bosque de Chapultepec*.
- [6] CARRILLO, N. (1969). *El Hundimiento de la Ciudad de México y Proyecto Texcoco*. México: Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- [7] CENTRO DE INSTRUMENTACIÓN Y REGISTRO SÍSMICO (CIRES). *Red Acelerográfica de la Ciudad de México [en línea]*. Recuperado el 05 de Agosto de 2016 de <http://www.cires.org.mx/racm-es.php>
- [8] CONAGUA (2002). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, México
- [9] CONAGUA (2014). *Estadísticas del Agua en México*, México
- [10] DEL ÁNGEL, J., MÁRQUEZ, J. R., ARAIZA, C. (2010). *Columna de la Independencia*, México: INAH.
- [11] DÍAZ, J. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 6(2).

- [12] ENRÍQUEZ, C. A. (2012). *El Bosque de Chapultepec y la Transformación de su Entorno*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [13] GAYOL, R. (1929). Breves apuntes relativos a las obras de Saneamiento y Desagüe de la Capital de la República y de las que, del mismo género, necesita con grande urgencia. *Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura*, Vol. VII.
- [14] GONZÁLEZ, L., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO C., (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educacion
- [15] GONZÁLEZ, C. (2014). *Condiciones Geológico-Estructurales del Bosque de Chapultepec y su entorno al Poniente de la Ciudad de México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [16] INEGI (2016). *Población*. Recuperado el 26 de octubre de 2016 de la base de datos <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/default.html> Tabulados
- [17] INEGI (2017). *Uso del Suelo y Vegetación*. Recuperado el 27 de noviembre de 2017 de la base de datos http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4.asp?proy=usv_usosueloveg
- [18] JUÁREZ, E. (1974). *Mecánica de Suelos*. (3^a ed.) México: Limusa.
- [19] KRAMER, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, University of Washington: Prentice Hall.
- [20] KIMMELMAN, M. (2017, 17 de Febrero). *Mexico City, Parched and Sinking, Faces a Water Crisis [en línea]*. The New York Times. Recuperado el 02 de Octubre de 2017 de https://www.nytimes.com/interactive/2017/02/17/world/americas/mexico-city-sinking.html?emc=edit_ta_20170217&nl=top-stories&lid=99520ref=cta
- [21] LUGO, H. J., CORDERO, E. M., ZAMORANO, O. J. (1995). Relieve, Litología y Riesgos en la Zona Urbana de la Delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. XII (I). Instituto de Geología, UNAM.
- [22] MARSAL, R. (1959). *El Subsuelo de la Ciudad de México*, México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [23] MIGUELES, R. (2015, 08 de Octubre). *Población de México es de 119.5 millones de habitantes [en línea]*. El Universal. Recuperado el 05 de Septiembre de 2017 de <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/cartera/economia/2015/12/8/poblacion-de-mexico-es-de-1195-millones-de-habitantes>
- [24] MOOSER, F. (1978). Cap. 2 Geología del Relleno Cuaternario de la Cuenca de México. En *El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México* (pp. 9-13), México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

- [25] MOOSER, F., MONTIEL, A., ZUÑIGA, A.,(1992). Nuevo Mapa Geológico del SurPoniente del Valle de México *Simposio Experiencias Geotécnicas en la Zona Poniente del Valle de México*, México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas.
- [26] MURILLO, R. (1990). Sobreexplotación del Acuífero de la Cuenca del Valle de México: Efectos y Alternativas. En *El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su Relación con la Ingeniería de Cimentaciones a Cinco Años del Sismo* (pp. 109-118), México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- [27] NAKAMURA, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Reserch Institute*. 30-I.
- [28] RCDF. (2004). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, México.
- [29] SACMEX. (2012). *El Gran Reto del Agua en la Ciudad de México*, México:
- [30] SÁNCHEZ, G. (1996). El Crecimiento Urbano del Distrito Federal (Ciudad de México) y su Legislación Urbanística. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 1(85). Recuperado el 25 de Noviembre de 2017, de <https://revistas.juridicas.unam.mx/index.php/derecho-comparado/article/view/3413/3988>
- [31] SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL (SSN) (2017, 22 de Marzo). *Catálogo de sismos [en línea]*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2017 de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- [32] TAMEZ, E. (1992). *Undécima Conferencia Nabor Carrillo. Hundimientos diferenciales en edificios coloniales en el centro histórico de la Ciudad de México.*, México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos
- [33] WATHELET, M., D. JONGMANS, M. OHRNBERGER, AND S. BONNEFOY-CLAUDET (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion. *Journal of Seismology*, 12, 1-19

Apéndice A

Datos Sismos Registrados por la Estación MT50

Evento	Fecha	Magnitud	Epicentro	Profundidad [km]	Aceleración [gal]
1	08/02/1988	5	14Q 270967 1935501	19.2	3.92
2	25/04/1989	6.5	14Q 457333 1835680	19.2	16.29
3	11/05/1990	5.3	14Q 304164 1885565	11.7	2.91
4	31/05/1990	5.5	14Q 298586 1892260	15.8	4.25
5	14/01/1991	5.1	14Q 197491 1974571	24.7	2.92
6	01/04/1991	5.3	14Q 565572 1773899	25.6	2.39
7	24/10/1993	6.5	14Q 502133 1828668	< 5	6.66
8	23/02/1994	5	14Q 680169 1971089	5	2.3
9	23/05/1994	5.6	14Q 333806 1994209	23	5.13
10	09/10/1995	6.5	13Q 534786 2072091	5	3.39
11	27/03/1996	4.9	14Q 585509 1791225	7	1.79
12	15/07/1996	6.5	14Q 276907 1925028	20	1.75
13	22/05/1997	6	14Q 204165 2036723	59	3.36
14	03/02/1998	6.4	14P 781902 1736395	33	2.95
15	20/04/1998	5	14Q 266489 2032541	66	3.08
16	15/06/1999	5.4	14Q 657588 2010739	69	33.1
17	21/06/1999	5.8	14Q 211949 1991192	54	5.99
18	30/09/1999	5.2	14P 710861 1764401	16	11.32
19	29/12/1999	5.2	14Q 216235 1994452	82	2.77
20	21/07/2000	6	14Q 503174 2000143	48	12.5
21	09/08/2000	7	13Q 747788 1990642	16	4.1
22	08/10/2001	5.5	14Q 378609 1873269	4	5.08
23	27/09/2002	4.9	14Q 330881 1897947	37	2.02
24	22/01/2003	7.6	13Q 582291 2056747	9	5.61

Sigue en la Página Siguiente

Evento	Fecha	Magnitud	Epicentro	Profundidad [km]	Aceleración [gal]
25	01/01/2004	5	14Q 242771 1915466	10	3.17
26	14/06/2004	5.8	14Q 624098 1772600	10	2.5
27	07/04/2007	5.4	14Q 364786 1876673	10	1.92
28	13/04/2007	6.3	14Q 346781 1890077	41	1.92
29	12/02/2008	6.6	15Q 335372 1790569	90	1.75
30	28/04/2008	5.6	14Q 393104 1996009	52	4.11
31	27/04/2009	5.7	14Q 438229 1868583	7	4.66
32	30/06/2010	6	14Q 603671 1793515	8	3.6
33	11/12/2011	6.5	14Q 396157 1972755	58	10.95
34	20/03/2012	7.4	14Q 551292 1796649	16	19.09
35	02/04/2012	6	14Q 556629 1798875	10	3.85
36	11/04/2012	6.4	13Q 705521 1980191	16	3.23
37	01/05/2012	5.6	14Q 287421 2013477	51	3.39
38	12/04/2013	5.2	14Q 226462 1967727	35	1.3
39	22/04/2013	5.8	13Q 797788 1978045	10	2.84
40	18/04/2014	7.2	14Q 267065 1900783	10	20.26
41	08/05/2014	6.4	14Q 301038 1892679	17	12.69
42	20/03/2015	5.4	14Q 544472 1985810	61	4.13
43	07/09/2017	8.2	14Q 380577 1642031	58	12.49
44	19/09/2017	7.1	14Q 529574 2034463	57	58.27

Tabla A.1. Datos de los sismos registrados en la estación MT50

Apéndice B

Mediciones de Ruido Ambiental

Fecha	Estación	No. Instrumento	Ubicación
06/06/2013	A	6630	14Q 481250 2147653
06/06/2013	B	6631	14Q 481397 2147664
06/06/2013	C	6632	14Q 481512 2147630
06/06/2013	D	6952	14Q 481464 2147527
06/06/2013	E	6686	14Q 481368 2147488
08/09/2014	F	6632	14Q 481292 2147544
08/09/2014	G	6925	14Q 481294 2147526
08/09/2014	H	6686	14Q 481370 2147563
08/09/2014	I	6631	14Q 481370 2147583
22/09/2014	J	6952	14Q 481417 2147598
22/09/2014	K	6686	14Q 481077 2147452
22/09/2014	L	6686	14Q 481286 2147531
29/09/2014	M	6632	14Q 481191 2147564
29/09/2014	N	6686	14Q 481096 2147311
16/02/2015	O	6630	14Q 481172 2147475
16/02/2015	P	6630	14Q 480968 2147620

Tabla B.1. Puntos de medición de Ruido Ambiental ubicados dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec.

Apéndice C

Señal Completa

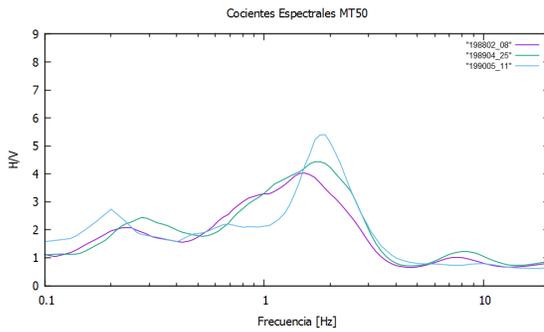


Figura C.1. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1988 a 1990.

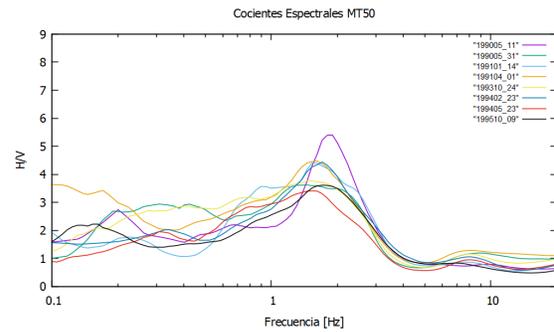


Figura C.2. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1990 a 1995.

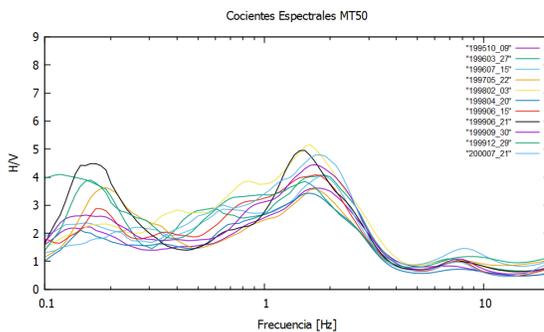


Figura C.3. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1995 a 2000.

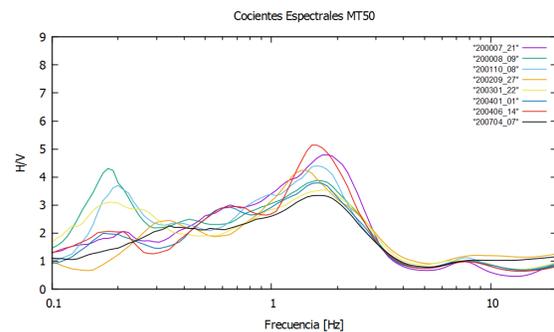


Figura C.4. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2000 a 2005.

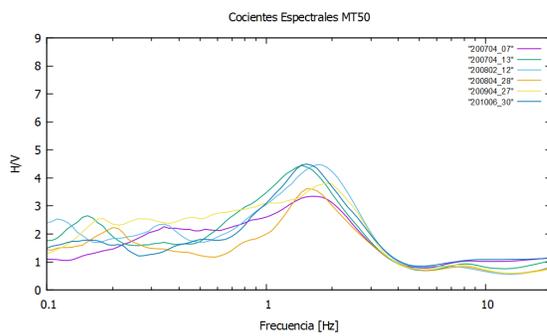


Figura C.5. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2005 a 2010.

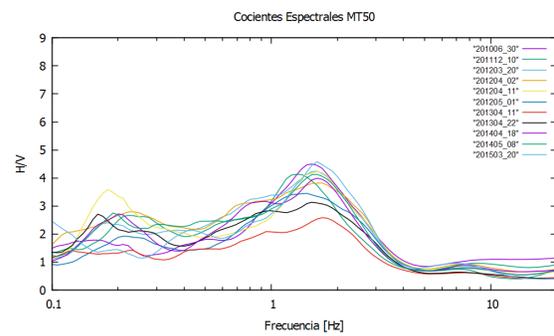


Figura C.6. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2010 a 2015.

Apéndice D

Parte Intensa de la Señal

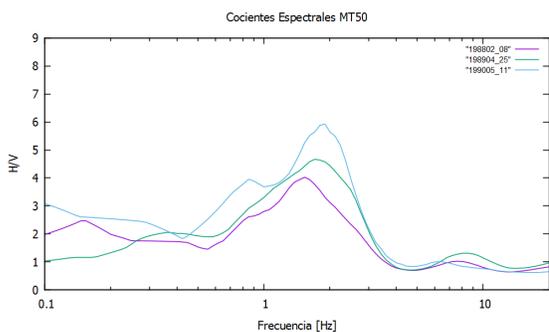


Figura D.1. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1988 a 1990.

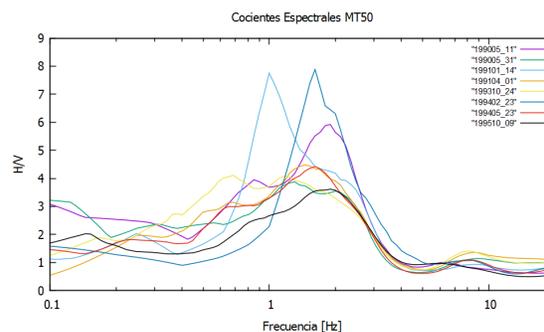


Figura D.2. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1990 a 1995.

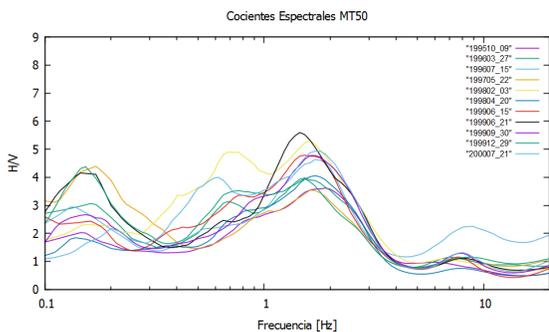


Figura D.3. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1995 a 2000.

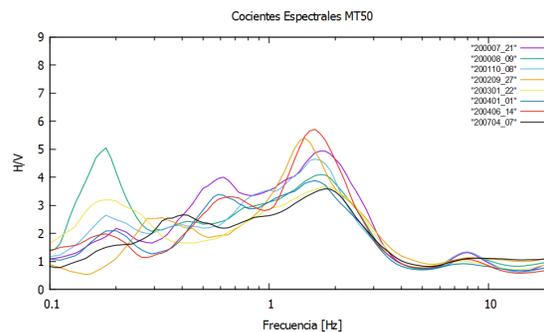


Figura D.4. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2000 a 2005.

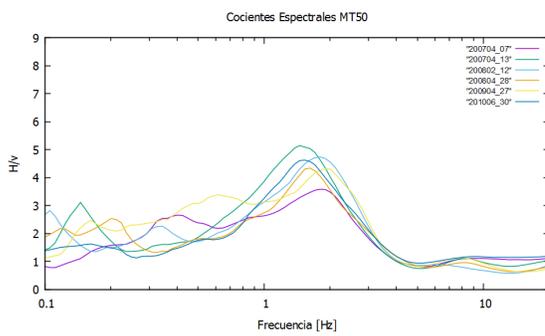


Figura D.5. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2005 a 2010.

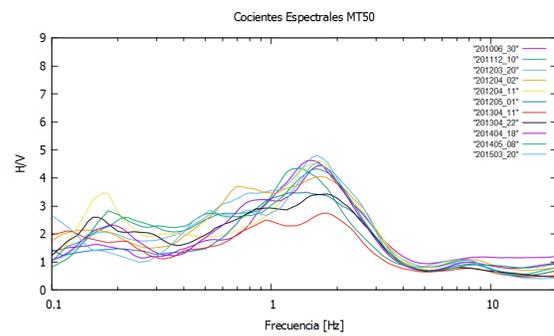


Figura D.6. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2010 a 2015.

Apéndice E

Parte Final de la Señal

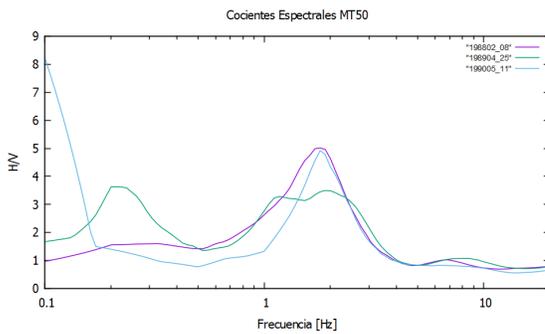


Figura E.1. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1988 a 1990.

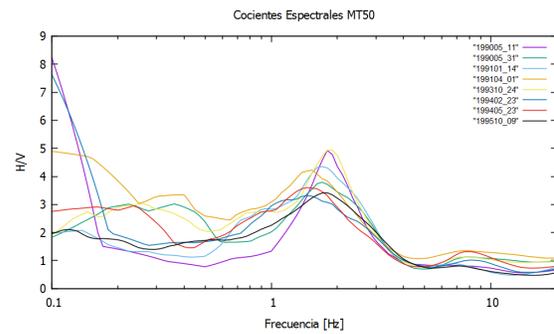


Figura E.2. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1990 a 1995.

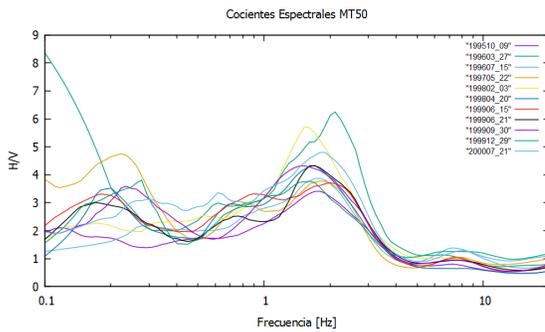


Figura E.3. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 1995 a 2000.

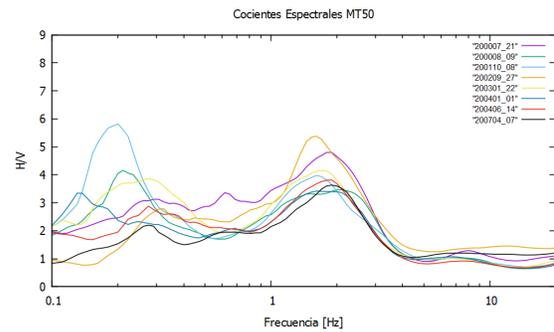


Figura E.4. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2000 a 2005.

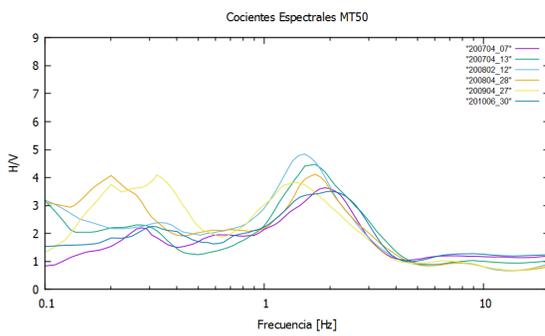


Figura E.5. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2005 a 2010.

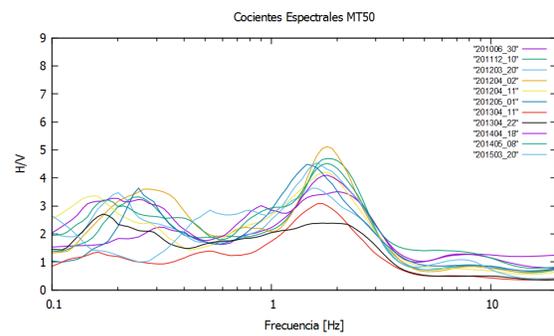


Figura E.6. Cocientes espectrales de los acelerogramas de la estación MT50 de 2010 a 2015.

Apéndice F

Velocidad de Hundimiento

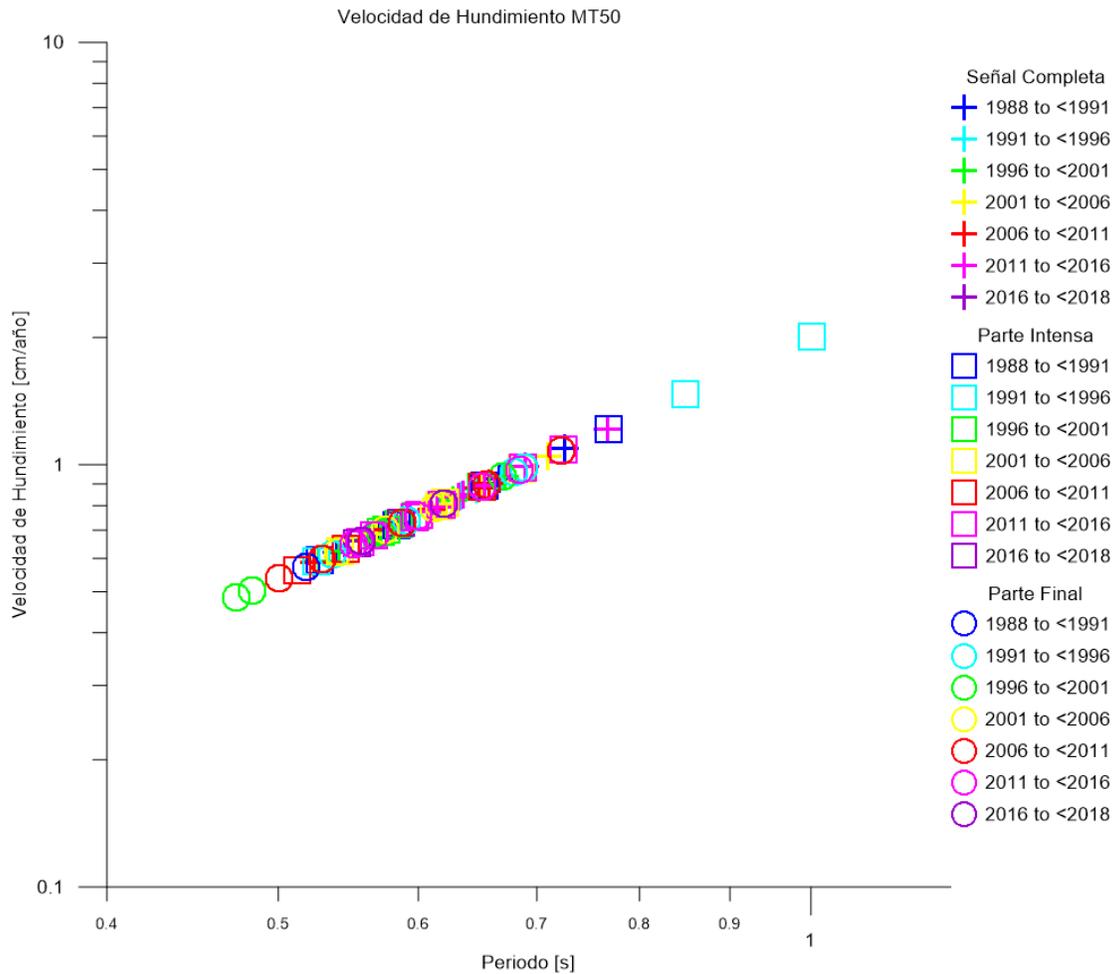


Figura F.1. Velocidad de Hundimiento en la estación MT50, considerando el procesamiento de la señal completa, parte intensa y final de los acelerogramas registrados

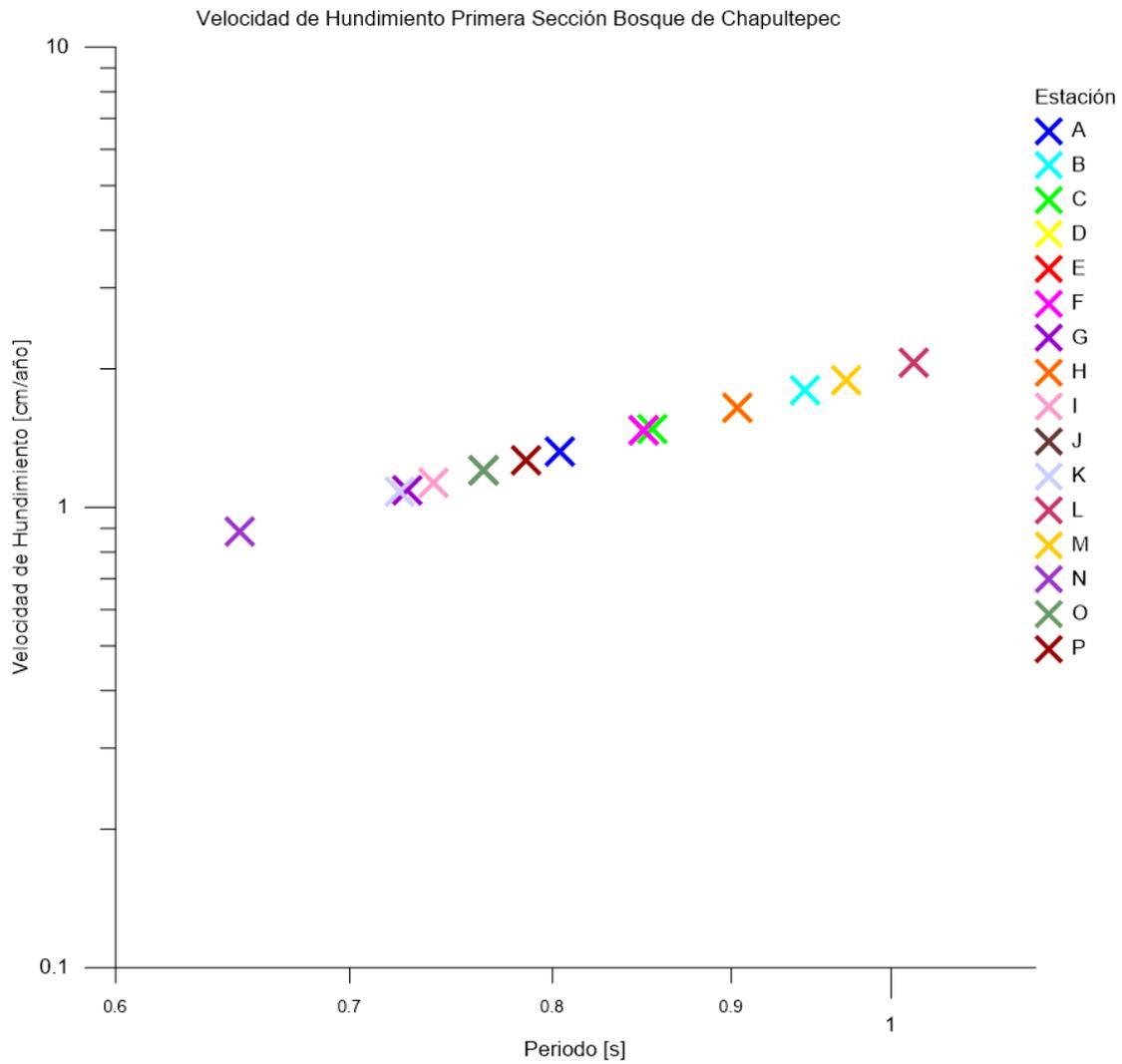


Figura F.2. Velocidad de Hundimiento en los puntos medidos dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec

Apéndice G

Espesor Compresible

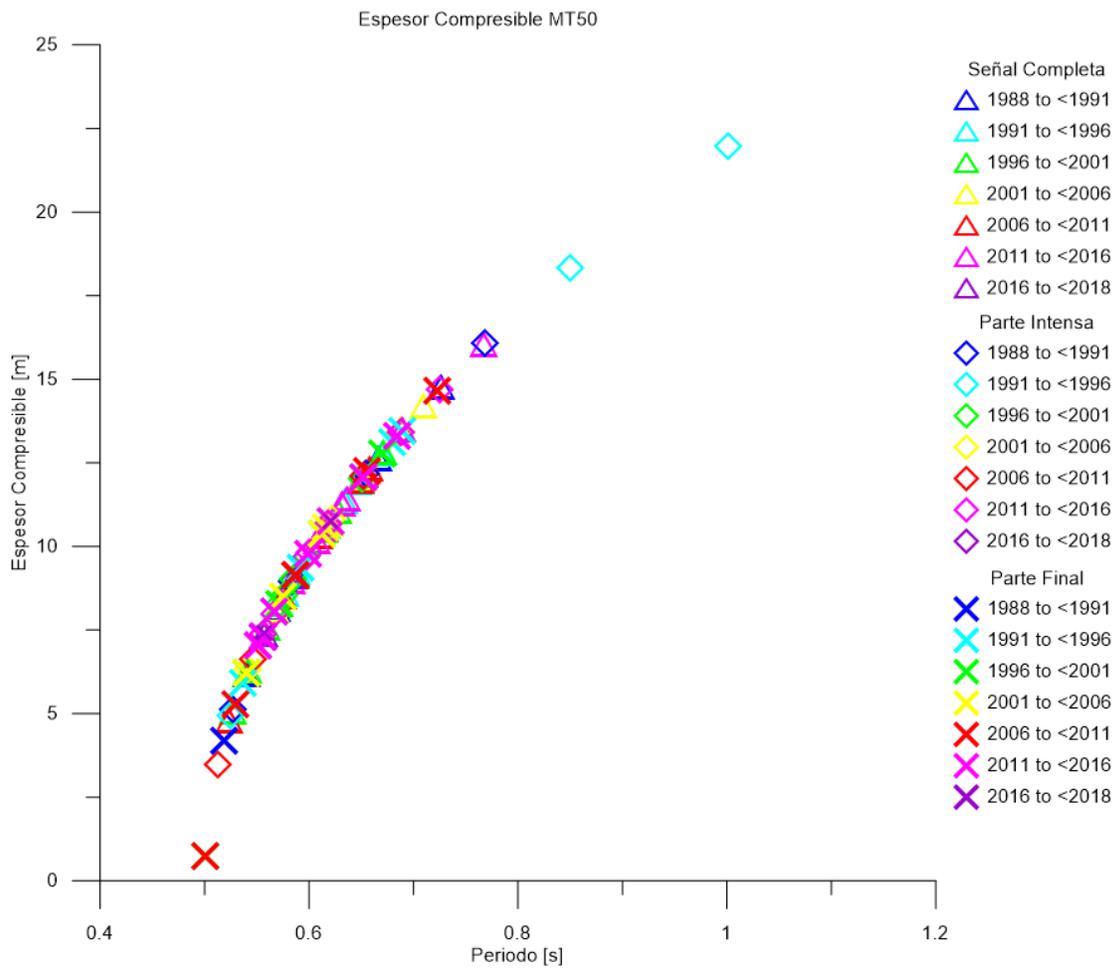


Figura G.1. Espesor de la capa compresible en la estación MT50, considerando el procesamiento de la señal completa, parte intensa y final de los acelerogramas registrados

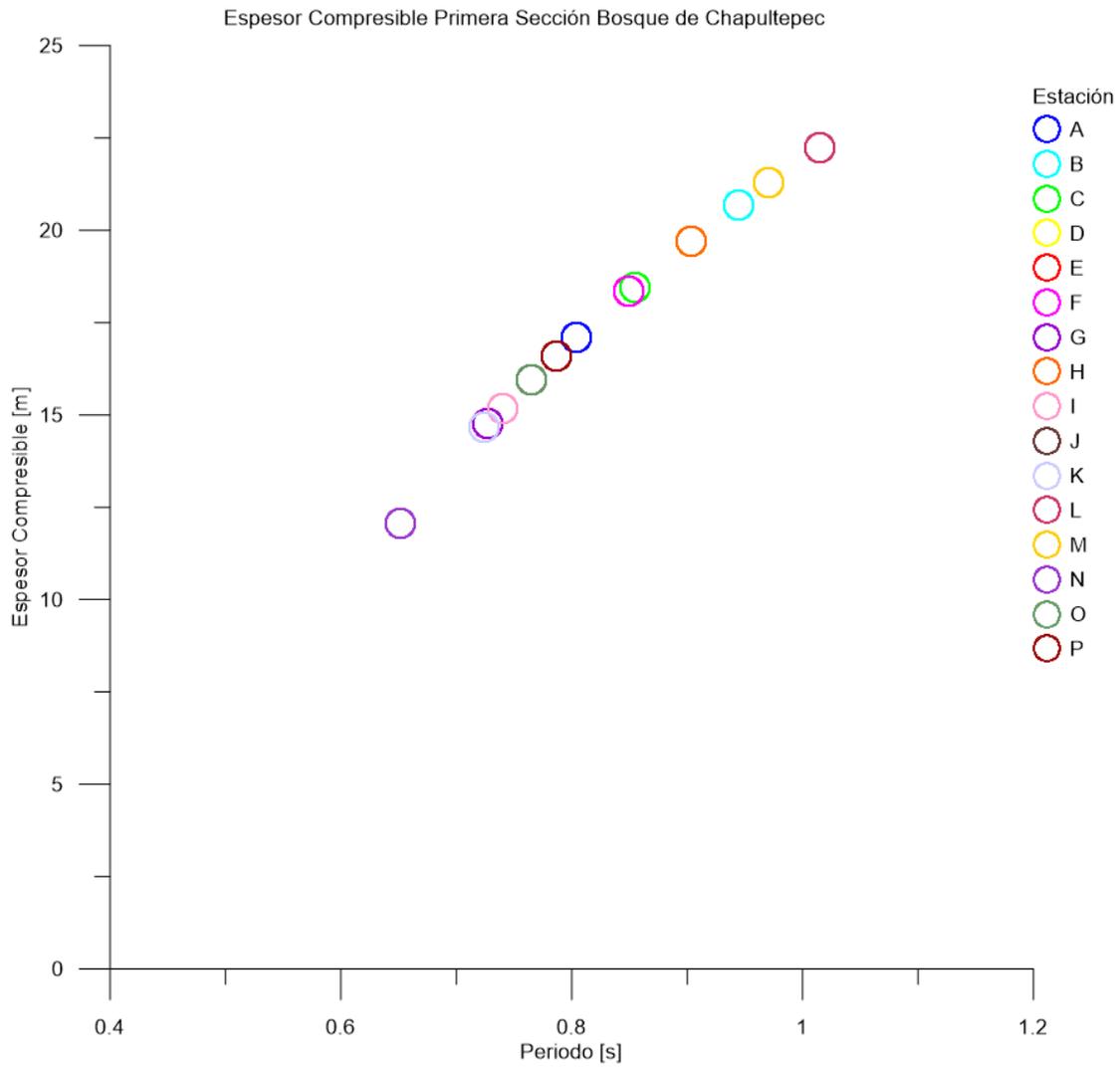


Figura G.2. *Espesor de la capa compresible en los puntos medidos dentro de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec*