



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO –UNAM–



*PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL - GEOTECNIA*

# **EVOLUCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Tesis para optar por el grado de:  
Maestra en Ingeniería

Presenta:

Ysamar Libertad Pino

Tutor:

Dr. Raúl Aguilar Becerril

Septiembre, 2018



## ÍNDICE

## CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN .....	7
--------------------	---

## CAPÍTULO 2

SUELOS DEL VALLE DE MÉXICO .....	10
2.1 Características geológicas .....	10
2.2 Zonificación geotécnica.....	13
2.3 Hundimiento regional.....	15

## CAPÍTULO 3

PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS .....	17
3.1 Espesor de los depósitos compresibles.....	19
3.2 Periodo dominante de vibración del suelo .....	19
3.3 Fenómeno de resonancia.....	21

## CAPÍTULO 4

EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CONSOLIDACIÓN .....	23
4.1 Análisis del hundimiento regional.....	23
4.1.1 Base de datos.....	23
4.1.2 Análisis de la información.....	26
4.1.3 Construcción de curvas de comportamiento y velocidad de hundimiento .....	30
4.2 Estimación del hundimiento regional a futuro .....	33
4.3 Obtención de la velocidad de onda de corte, del periodo dominante de vibración y el espesor de los depósitos compresibles iniciales.....	40
4.3 Evolución del periodo dominante de vibración y del espesor de los depósitos compresibles con el tiempo.....	47

## CAPÍTULO 5

EVOLUCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LOS SUELOS.....	49
3.6 Respuesta sísmica .....	49
3.6.1 Espectro de respuesta.....	49



3.6.2 Espectro de diseño .....	50
CAPÍTULO 6	
SEHEDIS (SISTEMA DE EVOLUCIÓN DEL HUNDIMIENTO Y ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO) .....	57
CAPÍTULO 7	
CONCLUSIONES .....	66
CAPÍTULO 8	
REFERENCIAS.....	69



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Geología y geomorfología de la cuenca del Valle de México (Mooser, 2000).....	12
Figura 2. Ubicación de la Ciudad de México en la cuenca.....	13
Figura 3. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México.....	14
Figura 4. Banco de nivel Atzacualco.....	16
Figura 5. Hundimiento estimado de una sección de la Ciudad de México.....	16
Figura 6. Mapa con curvas de igual espesor de los depósitos compresibles.....	20
Figura 7. Esquema del periodo fundamental de vibración.....	20
Figura 8. Mapa con curvas de igual periodo dominante de vibración del suelo.....	21
Figura 9. División en cuadrantes de la red de bancos.....	24
Figura 10. Retícula numerada de la nomenclatura de los bancos.....	24
Figura 11. Nomenclatura de los bancos de nivel.....	25
Figura 12. Bancos de nivel.....	26
Figura 13. Bancos de terreno firme, zona de transición y lago.....	27
Figura 14. Ejemplo de bancos descartados.....	28
Figura 15. Histograma del inicio del año de monitoreo y número de los bancos de nivel.....	29
Figura 16. Distribución de los 735 bancos de nivel superficial.....	30
Figura 17. Comportamiento del banco 1-B(N01E01)01.....	31
Figura 18. Comportamiento del banco 697-P(S04E07)01.....	32
Figura 19. Distribución de la velocidad de hundimiento promedio.....	33
Figura 20. Funciones lineal y racional.....	34
Figura 21. Tipos de funciones matemáticas para representar el hundimiento regional.....	35
Figura 22. Ajustes lineal y racional para el banco 1-B(N01E01)01.....	36
Figura 23. Modelo racional y lineal para el banco 66-B(N03E02)02.....	37
Figura 24. Proceso de estimación del hundimiento futuro para el banco 1-B(N01E01)01.....	38
Figura 25. Curva promedio de comportamiento a futuro para el banco 1-B(N01E01)01.....	39
Figura 26. Estimaciones a futuro para el banco 596-M(S05E03)03.....	40
Figura 27. Bancos de nivel y curvas de igual espesor compresible.....	41
Figura 28. Bancos de nivel y curvas de igual periodo dominante de vibración.....	42
Figura 29. Interpolación IDW (vecindad de puntos conocidos).....	43
Figura 30. Relación estadística entre todos los puntos (interpolación Kriging).....	44



Figura 31. Modelo de interpolación Kriging del espesor de los depósitos .....	45
Figura 32. Modelo de interpolación Kriging del periodo dominante de vibración del suelo.....	46
Figura 33. Evolución del periodo fundamental de vibración para el banco 1-B(N01E01)01 ...	48
Figura 34. Espectro de respuesta.....	49
Figura 35. Espectro de diseño sísmico.....	50
Figura 36. Parámetros de un espectro de diseño .....	51
Figura 37. Valor del coeficiente c, como función del periodo, $T_s$ .....	53
Figura 38. Espectro de diseño sísmico para el banco 354-B(S15E12)01 .....	54
Figura 39. Espectro de diseño sísmico para el banco 68-B(N03E04)01 .....	55
Figura 40. Interfase del sistema SEHEDIS.....	58
Figura 41. Búsqueda de un punto de interés .....	59
Figura 42. Comportamiento medido del banco 514-M(N01E01)05 .....	60
Figura 43. Comportamiento a futuro estimado del banco 514-M(N01E01)05 .....	61
Figura 44. Evolución del periodo dominante de vibración del banco 514-M(N01E01)05.....	62
Figura 45. Espectros de diseño evolutivos del banco 514-M(N01E01)05 .....	63
Figura 46. Parámetros de construcción del espectro del banco 514-M(N01E01)05.....	64



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Inicio del monitoreo de los bancos de nivel.....	29
Tabla 2. Evolución del espesor compresible H (m).....	47
Tabla 3. Evolución del periodo fundamental de vibración $T_s$ (s).....	48
Tabla 4. Parámetros de construcción del espectro de diseño 354-B(S15E12)01 .....	54
Tabla 5. Parámetros de construcción del espectro de diseño 68-B(N03E04)01.....	56



## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

---

El fenómeno de consolidación al que están sujetos los depósitos de suelo compresibles de la Ciudad de México, por la extracción de agua que se realiza con fines de abastecimiento, produce cambios en sus propiedades y modifican su comportamiento.

Los cambios en las propiedades dinámicas de los suelos por efecto de la consolidación se manifiestan por un incremento en las velocidades de propagación de ondas, cambios en el amortiguamiento y aumento en los módulos elastodinámicos. A su vez, el depósito compresible aumenta su rigidez y produce una reducción en el periodo dominante de vibración del suelo.

El resultado de los cambios en las diferentes propiedades dinámicas y geométricas de los suelos produce una modificación en su comportamiento ante la ocurrencia de sismos asociados a las diferentes fuentes sismogénicas que afectan al Valle de México, generando respuestas en términos de aceleraciones espectrales que pueden ser menores o mayores, en función de la combinación de todos los parámetros involucrados.

Con el objetivo de conocer el posible comportamiento dinámico de los suelos de la Ciudad de México a partir del cambio en sus propiedades por efecto del proceso de consolidación, se han estudiado en este trabajo los parámetros más importantes que controlan la respuesta sísmica.

Estos parámetros se concentran en los cambios que se producen en la velocidad de propagación de ondas de corte, el espesor compresible y el periodo dominante de vibración del suelo asociado.

Son principalmente la reducción del espesor de los depósitos compresibles y su relación directa con el periodo dominante de vibración del suelo, los que contribuyen con la mayor parte de la modificación en términos de respuesta sísmica. Por ello, se han estudiado los cambios en estos parámetros a través de sus mediciones históricas y su estimación a futuro.



Para la realización de esta investigación se ha estudiado el hundimiento regional inducido por la consolidación de los suelos, a través del monitoreo que sistemáticamente ha realizado el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). Actualmente se cuenta con una valiosa red de bancos de nivel que registra las elevaciones de más de 1700 bancos superficial distribuidos en la ciudad y monitoreados desde el año 1983 hasta el 2016-2017. De ellos, cerca de 1000 bancos se localizan en las zonas geotécnicas de lago y transición, y reflejan el comportamiento de la superficie del terreno en los últimos 35 años.

A partir del análisis del comportamiento observado en los bancos de nivel, se han construido curvas de hundimiento medido y se ha estimado su evolución a partir de la selección de ecuaciones racionales que se ajustan al comportamiento registrado. Se destaca que, en la gran mayoría de los bancos analizados, las curvas de ajuste han dejado de ser lineales, como se había considerado en el pasado.

Con base en la información existente sobre el espesor de los depósitos compresibles y el periodo dominante de vibración del suelo, se han utilizado técnicas de interpolación espacial para establecer en cada banco de nivel los correspondientes parámetros mencionados. Con ellos se ha definido también la velocidad de propagación de ondas de corte que caracteriza el suelo donde se ubica cada banco. La determinación de estos tres parámetros han sido el punto de partida para estudiar la evolución de la respuesta sísmica del terreno.

Se sabe que los efectos de sitio que caracterizan al Valle de México se pueden representar a través del periodo dominante de vibración del suelo. Con esta propiedad se han propuesto ecuaciones que permiten construir espectros de diseño sísmico para la Ciudad de México, con un periodo de retorno  $T_r=250$  años, como lo establece la normatividad vigente.

El resultado de esta investigación se ha sintetizado en un sistema de información geográfica que concentra toda la información obtenida para cada banco de nivel y la muestra en el siguiente orden:

- Hundimiento medido
- Hundimiento estimado hasta el año 2070
- Velocidad de hundimiento promedio



- Última velocidad de hundimiento medida
- Cambio estimado del periodo dominante de vibración del suelo hasta el año 2070
- Evolución de los espectros de diseño sísmico a cada 10 años hasta el 2070 y
- Los parámetros para la construcción de los espectros de diseño.

El resultado de este trabajo está disponible para consulta a través de un sitio Web en Internet.



## CAPÍTULO 2

### SUELOS DEL VALLE DE MÉXICO

---

#### 2.1 Características geológicas

La cuenca del Valle de México se localiza en el borde meridional de la Mesa Central del Sur, sobre la que se formó un tramo de la Zona Neovolcánica Transmexicana, esencialmente durante el Plioceno-Holoceno. La cuenca es alargada en dirección NNE-SSW con un área aproximada de 9,600 km<sup>2</sup> y una elevación promedio de 2,240 msnm.

Está delimitada en el norte por la Sierra de Pachuca, Tepotzotlán y Tezontlalpan, en el oriente por la Sierra de Río Frío y por la Sierra Nevada, en el sur por la Sierra del Chichinautzin y en el poniente por el Volcán Ajusco, la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo. La zona central y suroccidental de la cuenca ocupan el área urbana de la Ciudad de México. (Auvinet & Juárez, 2011).

La cuenca es endorreica, de desagüe artificial y pertenece a las planicies escalonadas (Lugo-Hubp, 1984) que forman parte del Arco Volcánico Transmexicano (AVT, Damon, et al, 1981). Se formó al cerrarse el antiguo Valle de México como resultado de la obstrucción por la actividad andesítico-basáltica que edificó la Sierra del Chichinautzin al sur de la ciudad. El drenaje natural interrumpido, desde la región de la Sierra de Pachuca hacia la cuenca hidrográfica del Río Amacuzac en el sur, propició la formación de un lago al norte de la Sierra del Chichinautzin y su azolvamiento paulatino, acompañado por eventos volcánicos cortos locales.

El azolve o relleno cubrió discordantemente el terreno de topografía severamente disectada, por lo que tiene una variación notable en su espesor en sentido lateral; no obstante, en términos generales, los espesores aumentan desde el norte hacia el sur, alcanzando en la parte central de la cuenca unos 200 m, mientras que en el sur unos 500 a 600 m. El relleno está formado por material volcánico retrabajado, interestratificado con tobas que se interdigitan con depósitos netamente lacustres hacia las partes centrales de la cuenca. La



mayor parte de la zona urbana de la ciudad de México está edificada sobre los depósitos lacustres.

Las rocas más antiguas de la cuenca son anhidritas que subyacen a calizas marinas del Cretácico Inferior que, a su vez, están cubiertas por calizas, lutitas y areniscas del Cretácico Superior (De Cserna et al, 1988). Las rocas terciarias, formadas por depósitos clásticos continentales, cubren discordantemente a las rocas cretácicas.

La acumulación de estos depósitos ocurrió durante el Paleoceno-Eoceno en condiciones de drenaje obstruido por fallamiento en bloques. Sobreyacen discordantemente a los depósitos clásticos continentales, rocas volcánicas predominantemente andesíticas a dacíticas acumuladas durante el Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano.

Al final del Mioceno ocurrió un nuevo periodo de magmatismo después del rearrreglo geodinámico de la región del Pacífico Oriental a raíz de la convergencia general NE-SW que hoy en día está activa (De Cserna et al, 1988). Asociado a este magmatismo se conformaron las sierras que constituyen los límites oriental, septentrional y occidental de la cuenca, así como la masa principal de la Sierra de Guadalupe, además de depósitos volcánicos epiclásticos que se acumularon durante el Plio-Cuaternario. En la Figura 1 se muestra la configuración geológica y geomorfológica de la cuenca del Valle de México.

Las manifestaciones volcánicas más recientes, constituyeron conos monogenéticos de andesita basáltica, que se presentan principalmente en los campos volcánicos Chichinautzin y Tezontepec. Estas manifestaciones reflejan la orientación NE-SW del esfuerzo tectónico en la región, estrechamente relacionado con el marco geodinámico del sur de México.

En épocas de lluvia, los afluentes de los cuerpos de agua convergían, formando un gran lago de unos 2000 km<sup>2</sup> de superficie. En la Figura 2 se muestra la configuración de los lagos y la ubicación de la Ciudad de México dentro de la cuenca.





*Figura 2. Ubicación de la Ciudad de México en la cuenca*

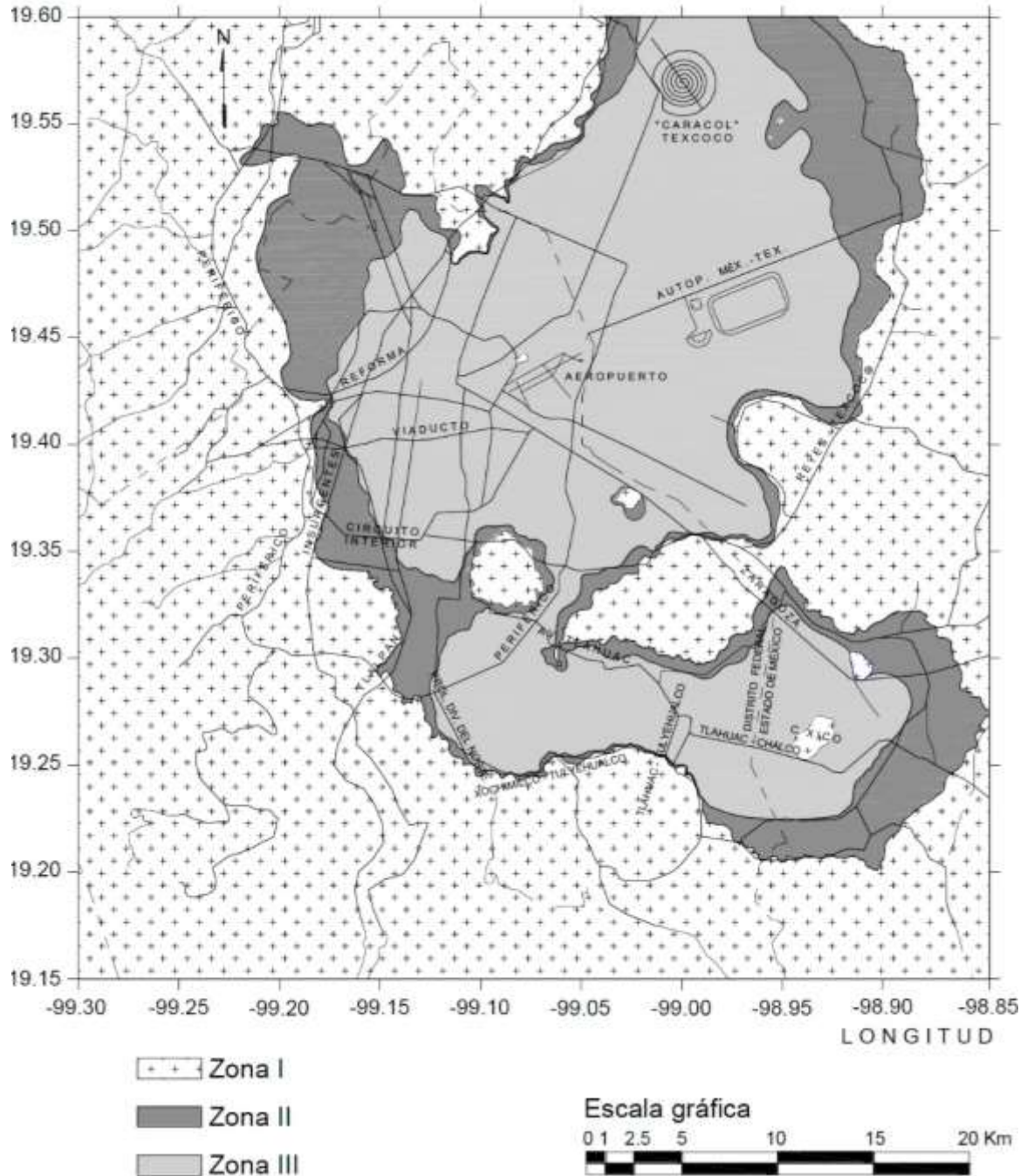
## 2.2 Zonificación geotécnica

La Ciudad de México se divide geotécnicamente en tres zonas establecidas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTC-DCC, 2017) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2016) vigentes, como se muestra en la Figura 3.

- Zona I: Lomas, formadas por rocas o suelos 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. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos artificiales no controlados.
- Zona II: Transición, en la que los depósitos resistentes se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.
- Zona III: Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar



cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.



**Figura 3. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México**



### 2.3 Hundimiento regional

El bombeo con fines de abastecimiento de agua en el Valle de México genera la pérdida de la presión de agua del subsuelo, induciendo el fenómeno de la consolidación y produciendo la reducción gradual del espesor de los depósitos de origen lacustre que caracterizan al valle, lo que se refleja en el hundimiento de la superficie del terreno.

El fenómeno de hundimiento regional se ha identificado en la cuenca del Valle de México desde hace años. Antes del siglo XVII, los cronistas e historiadores carecían de datos topográficos precisos y solo podían comparar el nivel del piso de las calles con el de algunos puntos de los edificios de la ciudad o de los lagos, en particular el de Texcoco.

En 1607, Enrico Martínez ejecutó una nivelación para las obras del Desagüe Real por Huehuetoca, la que arrojó 1.1 m de diferencia entre la Plaza Mayor de la ciudad y el nivel medio de las aguas del Lago de Texcoco. (Auvinet, *et al*, 2015).

Por cientos de años las nivelaciones se hicieron con la misma referencia, hasta que en 1856 la primera Comisión Hidrológica del Valle de México bajo la dirección de Díaz Covarrubias, tuvo el mérito de establecer la manera de relacionar las nivelaciones realizadas en la ciudad y en el Valle de México. Se acordó que el banco de partida para los circuitos de nivelación fuera la tangente inferior horizontal al monolito de roca (Piedra del Sol o Calendario Azteca), colocado en aquel entonces en una base adosada a la torre poniente de la Catedral Metropolitana (banco TICA). Sin embargo, para evitar que la mayoría de los sitios de la ciudad quedaran con elevaciones negativas, se adoptó como referencia para las cotas el plano horizontal imaginario ubicado 10 m abajo del banco TICA. (Auvinet, *et al*, 2015).

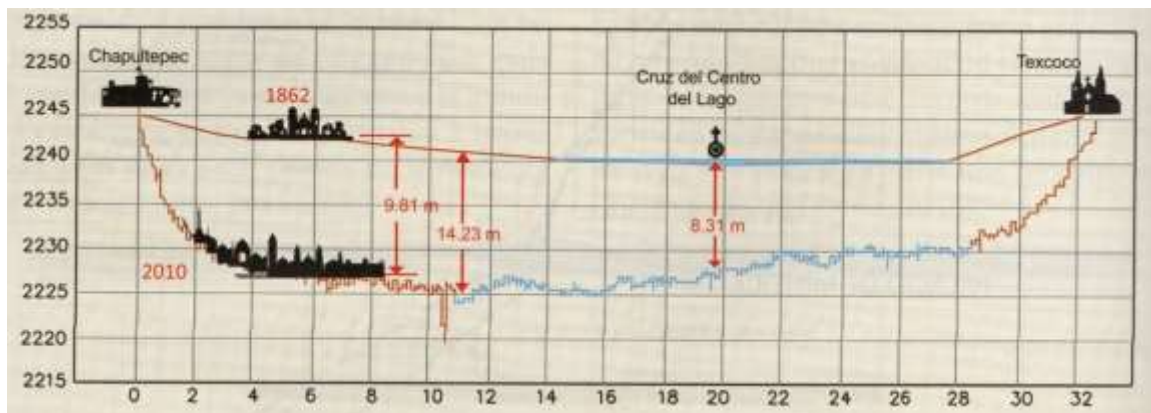
En 1860 se colocan las primeras placas de porcelana en las fachadas de los edificios, referidas al banco TICA. En los años posteriores se colocaron más placas, hasta que en 1913 se realiza el levantamiento desde Veracruz hasta México, permitiendo referir los bancos al nivel medio del mar con la creación del Banco Atzacolco. (Auvinet, *et al*, 2015). Este banco maestro sigue siendo la referencia principal de toda la red de nivelación (Figura 4).



*Figura 4. Banco de nivel Atzacolco*

La red de bancos de nivel superficial creció y desde 1983 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) tomó a su cargo la ejecución de nivelaciones periódicas con 1726 bancos ubicados en la Ciudad de México. La última nivelación con la que se cuenta es la de 2016-2017.

Con toda la información disponible se ha estimado que el hundimiento desde 1862 hasta 2010 podría haber acumulado en algunos puntos del valle más de 14 metros. En la Figura 5 se muestra el hundimiento en un eje transversal de la ciudad con dirección Este-Oeste. (Auvinet, *et al*, 2015).



*Figura 5. Hundimiento estimado de una sección de la Ciudad de México*



## CAPÍTULO 3

### PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS

---

Como es sabido el movimiento del suelo compuesto por unidades estratigráficas de materiales blandos, o sueltos, genera amplificaciones dinámicas producto de los efectos locales asociados a sus propiedades. Los suelos lacustres del Valle de México presentan capas de suelo que se asocian con este tipo de terrenos y produce amplificación de las ondas sísmicas que en él se propagan. Las ondas inducen un efecto de difracción múltiple al encontrarse con las fronteras entre estratos, generan interferencias destructivas y constructivas que se traducen en atenuaciones y amplificaciones, respectivamente.

Para determinar la respuesta dinámica del terreno y establecer los efectos de amplificación, es fundamental conocer sus propiedades dinámicas, como:

- Velocidad de propagación de ondas compresionales ( $V_p$ )
- Velocidad de propagación de ondas de cortante ( $V_s$ )
- Módulos elastodinámicos ( $E$  y  $G$ )

Las ondas sísmicas se propagan a una velocidad que depende de las características del medio que atraviesen. Las ondas internas se propagan desde el origen de la perturbación hasta la superficie del medio y se dividen en ondas primarias o longitudinales ( $V_p$ ) y en ondas secundarias o de corte ( $V_s$ ).

Las ondas primarias son longitudinales, es decir, que generan desplazamientos compresionales en la misma dirección en la que se propaga la onda. Las ondas secundarias o de corte son transversales, es decir, provocan desplazamientos en la dirección perpendicular a la propagación de la onda. Las ondas primarias son más rápidas que las secundarias. La velocidad de onda en el suelo se mide comúnmente en m/s.

Los depósitos de suelo compresibles de la cuenca del Valle de México se caracterizan por tener velocidades de onda  $V_s$  particularmente bajas. Se han llegado a medir valores incluso inferiores a  $V_s = 30$  m/s.



El paso de las ondas sísmicas produce esfuerzos y deformaciones en el medio en el que se propagan. La relación entre estos parámetros se define a través de los módulos elastodinámicos  $E$  y  $G$ , los que se asocian con las ondas de compresión y de cortante, respectivamente. Se pueden obtener mediante las siguientes expresiones:

$$G = V_s^2 \rho$$

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

Adicionalmente, a partir de las velocidades de propagación de ondas, es posible obtener la relación de Poisson ( $\nu$ ) a partir de,

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

A estas propiedades dinámicas se suman las de tipo geométrico, principalmente, el espesor compresible del depósito ( $H$ ) por el que viajan las ondas.

En función del espesor del depósito y la velocidad con que viajan las ondas de cortante, se determina el periodo dominante de vibración del suelo. La expresión que asocia estos parámetros queda definida por:

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

Por otra parte, el amortiguamiento es otra de las propiedades dinámicas de los suelos que influye en su comportamiento y está relacionado con la capacidad de disipar energía. Entre más alta es la relación de amortiguamiento, mayor es su capacidad de disipar energía.

Las amplificaciones dinámicas que presentan los suelos del Valle de México se han caracterizado a través del periodo dominante de vibración del suelo. Por ello, las fronteras entre las zonas sísmicas establecidas en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo (NTC-DS, 2004) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004) coinciden con curvas de igual periodo dominante de vibración del suelo.



Se considera que la velocidad de propagación de onda de corte y el amortiguamiento del suelo son propiedades que cambian poco con el paso del tiempo, mientras que el espesor del depósito compresible y el periodo dominante de vibración asociado, controlan los mayores cambios en la respuesta sísmica de los suelos del valle de México.

### **3.1 Espesor de los depósitos compresibles**

El espesor compresible de un depósito de suelo es un parámetro geométrico determinante en la respuesta dinámica. El cambio del espesor del depósito se refleja directamente en una respuesta dinámica distinta.

El espesor de un depósito compresible se reduce por el proceso de consolidación bajo una carga sostenida. Sin embargo, este proceso se puede generar o acelerar cuando la consolidación es inducida por la extracción de agua a través los materiales permeables profundos.

En la Figura 6 se muestra el mapa con curvas de igual espesor para la Ciudad de México que aparece en las anteriores Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS, 2004) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004).

### **3.2 Periodo dominante de vibración del suelo**

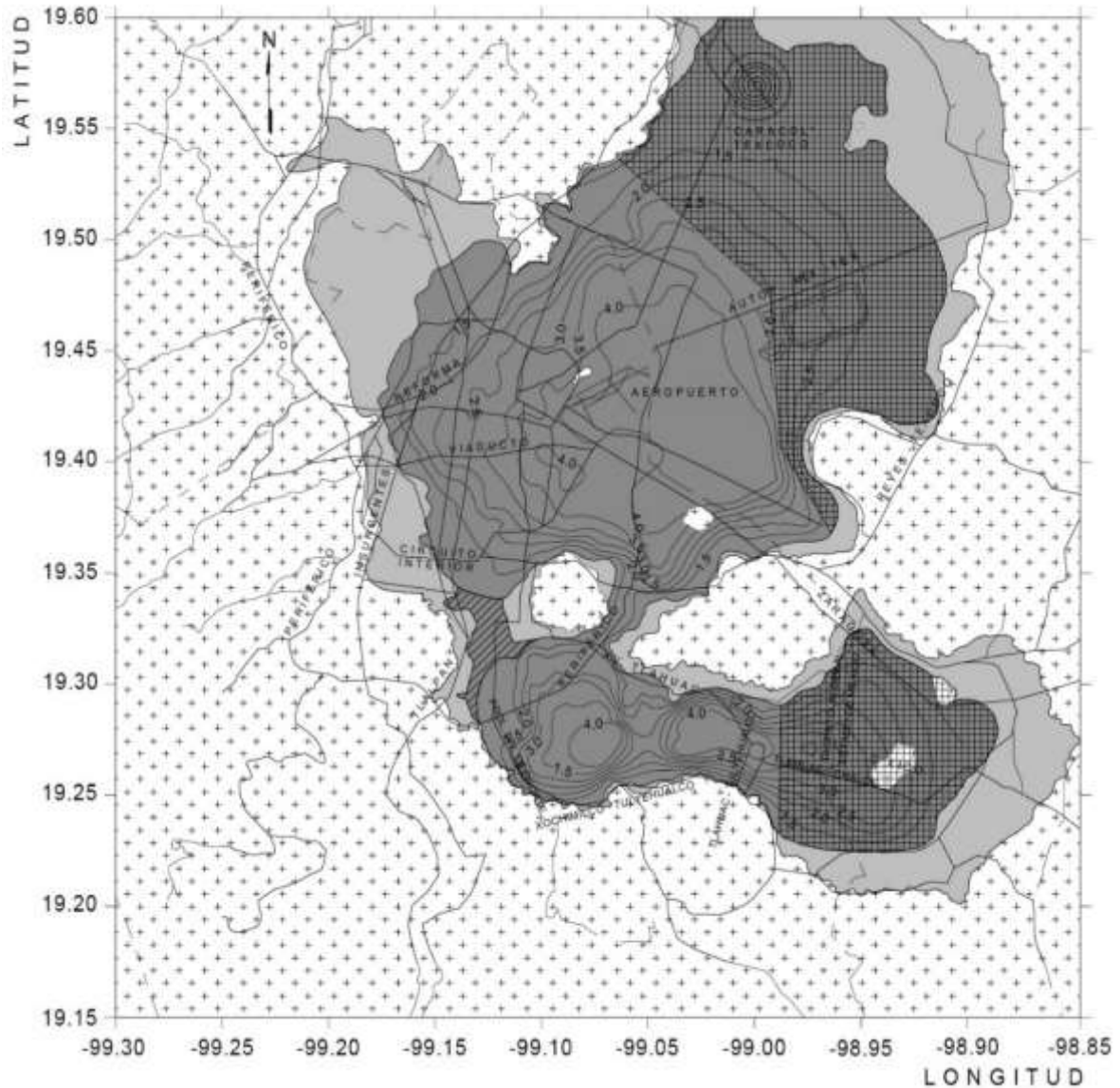
Cualquier cuerpo sometido a una vibración requiere de tiempo para completar un ciclo, o una longitud de onda, es decir, que tras el paso de la onda y el movimiento que está impone, el cuerpo regresa a la misma posición de la que partió. Ese tiempo se conoce como periodo de vibración (T) y comúnmente se mide en segundos (s).

El comportamiento de una columna de suelo con un periodo dominante de vibración  $T_s=2.5$  s se puede representar esquemáticamente como se muestra en la Figura 7. Tras el paso de las ondas sísmicas, la columna de suelo tomará 2.5 segundos en desplazarse hasta un extremo del movimiento, regresar al punto inicial, ir al extremo opuesto y volver al punto de partida.





En la Figura 8 se muestra el mapa con curvas de igual periodo dominante de vibración para la Ciudad de México que aparece en las NTC-DS, 2004 del RCDF, 2004.



**Figura 8. Mapa con curvas de igual periodo dominante de vibración del suelo**

### 3.3 Fenómeno de resonancia

Cada cuerpo tiene un modo específico de vibrar, es decir, una frecuencia particular, de acuerdo con su forma y materiales que lo componen. Cuando un cuerpo recibe la influencia de



una fuerza periódica con una frecuencia similar a la del cuerpo mismo, la amplitud del sistema oscilante se hace mayor.

La frecuencia ( $f$ ) se define como la magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno periódico, es decir, se mide en ciclos por segundo y su unidad es el Hertz (Hz). La frecuencia y el periodo dominante de vibración se relacionan a través de la siguiente ecuación:

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

Dos sistemas entran en fase, o en resonancia, cuando sus frecuencias o periodos se igualan.

Los suelos del Valle de México son altamente vulnerables a los sismos de origen subductivo que ocurren frente a las costas del Pacífico ya que son ricos en frecuencias cercanas a  $f=0.5$  Hz (relacionadas con un  $T_s= 2$  s). Los sitios más afectados ante la ocurrencia de un sismo de subducción son aquellos depósitos de suelo con periodo dominante de vibración cercano a los 2 s que pueden entrar en resonancia con las frecuencias propias del sismo. Por esta razón es que las Normas de Diseño por Sismo de la Ciudad de México (NTC-DS, 2004, 2017) consideran los coeficientes sísmicos más altos para los suelos con periodo dominante de vibración cercano a los 2 s.



## CAPÍTULO 4

### EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CONSOLIDACIÓN

---

Los parámetros que controlan la respuesta sísmica de los suelos compresibles están directamente influenciados por la variación de su espesor, cuando este disminuye por efectos del proceso de consolidación natural o inducido, también lo hace el periodo dominante de vibración y la velocidad de ondas de corte.

El periodo dominante de vibración  $T_s$  disminuye a medida que lo hace el espesor compresible, mientras que la velocidad de onda de corte  $V_s$  aumenta.

En análisis de la evolución de estos parámetros dinámicos se realizó observando el cambio en el espesor de los suelos compresibles a través del análisis del hundimiento regional.

#### 4.1 Análisis del hundimiento regional

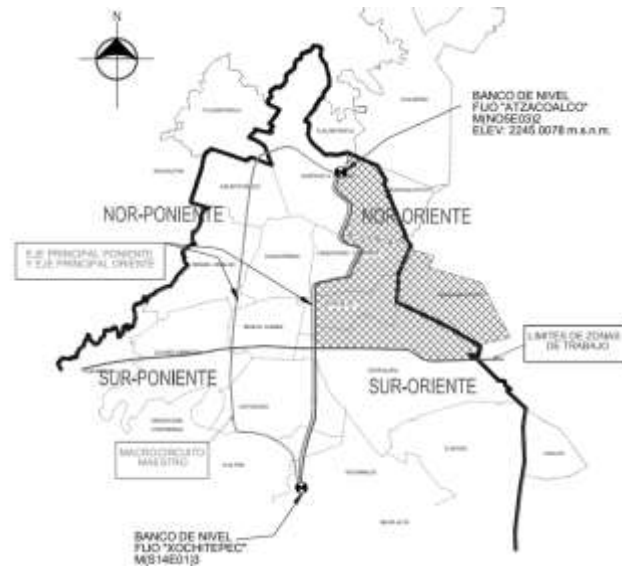
##### 4.1.1 Base de datos

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) cuenta con red de 1726 bancos de nivel, monitoreados desde el año 1983. La última medición disponible es la de 2016-2017.

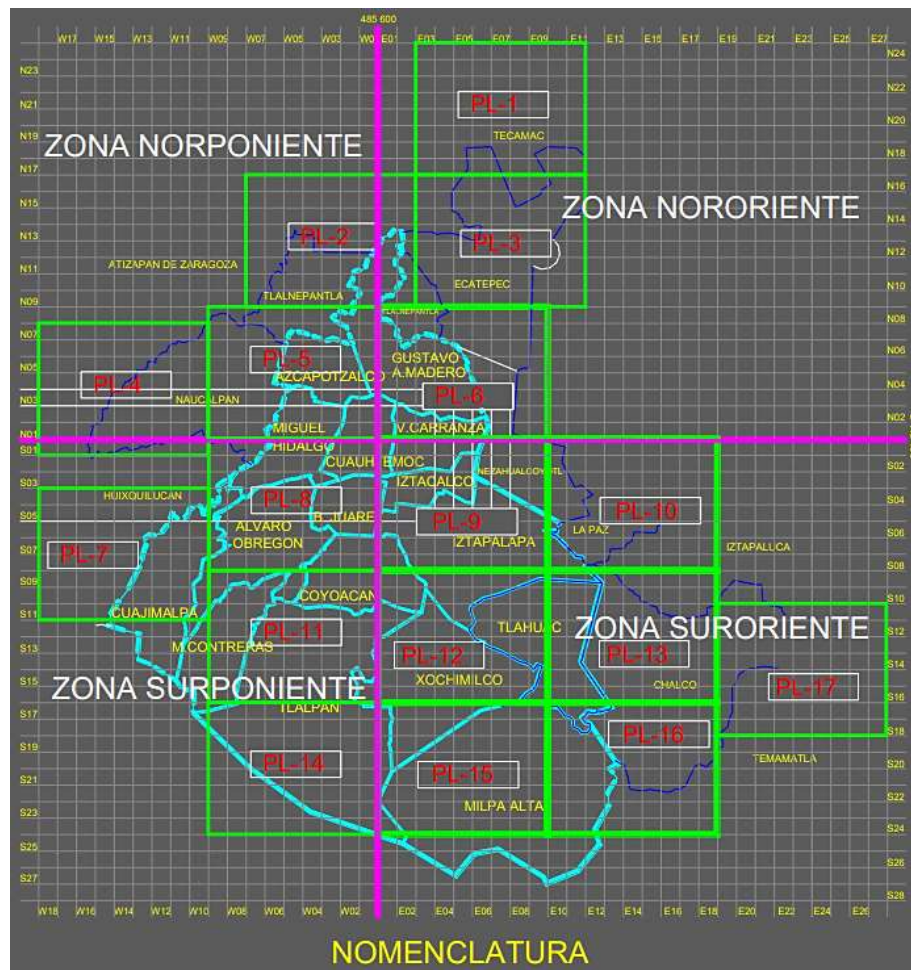
El acceso a la información se obtuvo a través de una solicitud dirigida a la Gerencia Técnica del SACMEX. Los datos proporcionados son: el nombre, las coordenadas UTM, y las nivelaciones en msnm de cada uno de los 1726 bancos. Los años monitoreados son: 1983, 1987, 1989, 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2007 y 2016.

Los bancos se distribuyen en una red dividida en cuatro cuadrantes como se muestra en la Figura 9. La nomenclatura o código de identificación, se deriva de una cuadrícula numerada (Figura 10) a partir del centro hacia los cuadrantes N, S, E y W.

De acuerdo con esta ubicación dentro de la cuadrícula, cada banco de nivel adquiere una clave, con un número y posición definida.



**Figura 9. División en cuadrantes de la red de bancos**



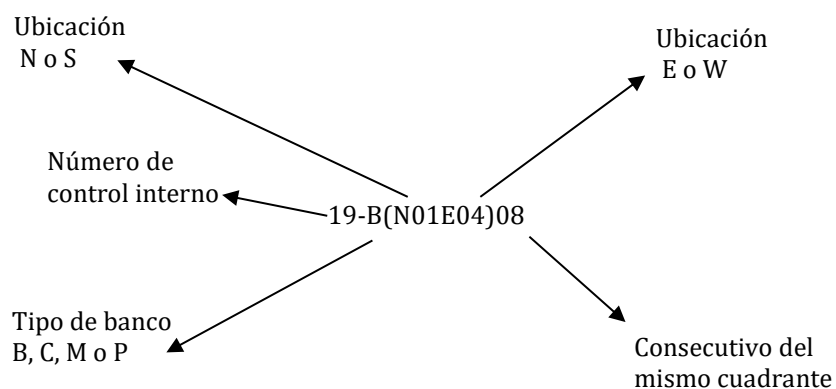
**Figura 10. Retícula numerada de la nomenclatura de los bancos**



Además de la posición de la retícula, la nomenclatura se identifica de acuerdo con el tipo de banco. Existen cuatro clasificaciones:

- Bancos Maestros (M). Los hay fijos y superficiales; los fijos se ubican en zonas de terreno firme y los superficiales, se instalan generalmente en banquetas o camellones de la ciudad. Estos bancos son referencias para el inicio y el final de los circuitos de nivelación.
- Bancos de CNA (C). Son bancos superficiales colocados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) encargada de la nivelación hasta el año 1996.
- Bancos en Pozos (P). Son bancos superficiales pero colocados en instalaciones de pozos de extracción de agua.
- Bancos Ordinarios (B). Son bancos superficiales colocados o empotrados en las banquetas o camellones. La mayoría de los bancos son de este tipo.

Para fines práctico de este trabajo, y considerando la gran cantidad de información que se maneja, se ha asignado un número consecutivo que se antepone al código de cada banco. Este número es una referencia válida sólo en este documento. En la Figura 11 se muestra la configuración del código de identificación de los bancos.



**Figura 11. Nomenclatura de los bancos de nivel**

En la Figura 12 se muestran imágenes de bancos de nivel superficial, estos pueden ser placas de bronce o de aluminio.



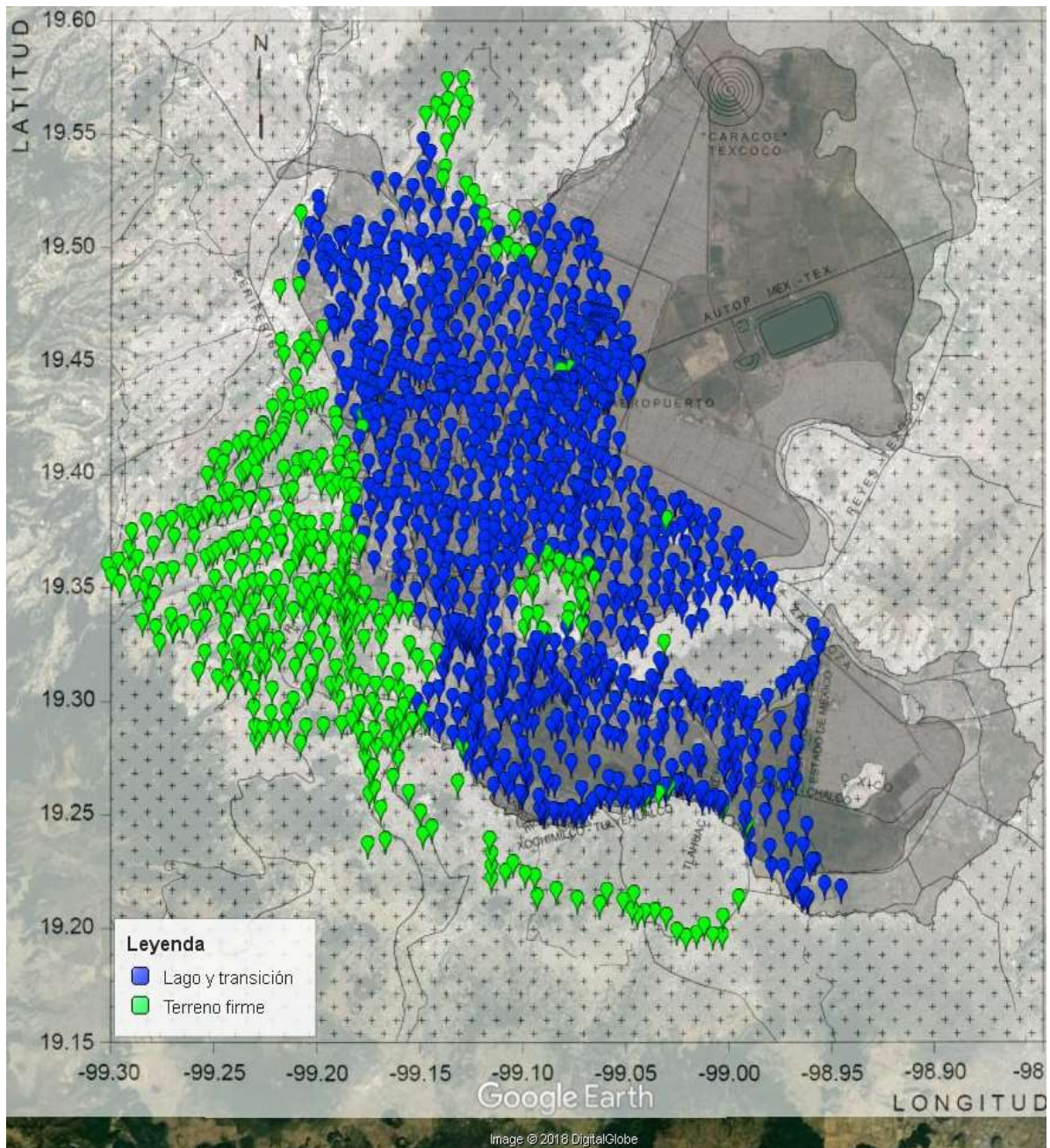
*Figura 12. Bancos de nivel*

#### **4.1.2 Análisis de la información**

Con la ayuda del Software Google Earth® y la herramienta de superposición de imágenes, se ubicaron los 1726 bancos que incluyen los de terreno firme, de lago y de transición, tal como se muestran en la Figura 13.

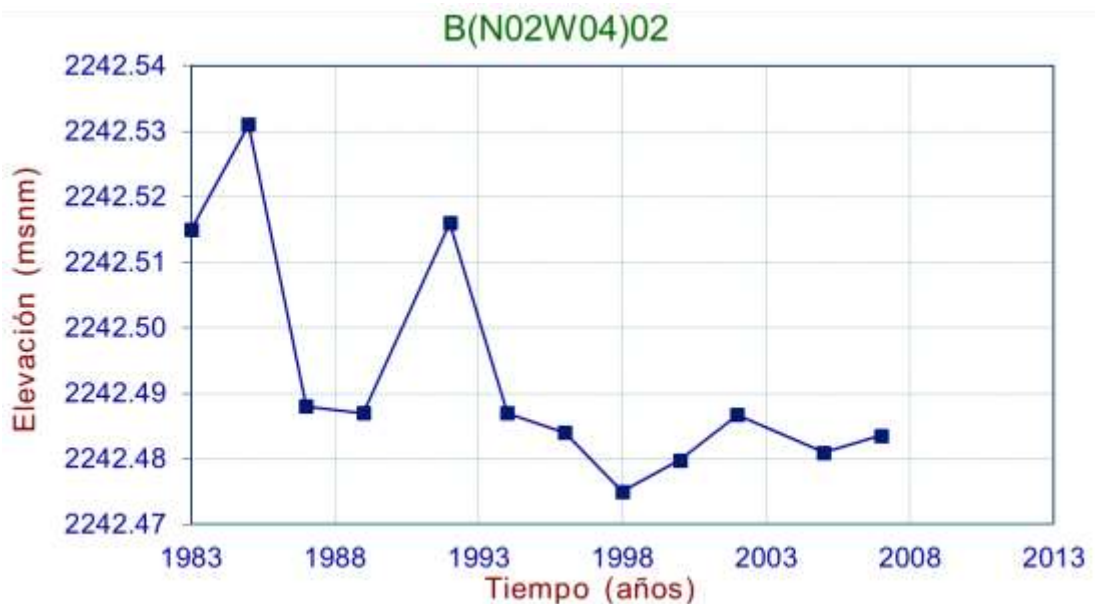
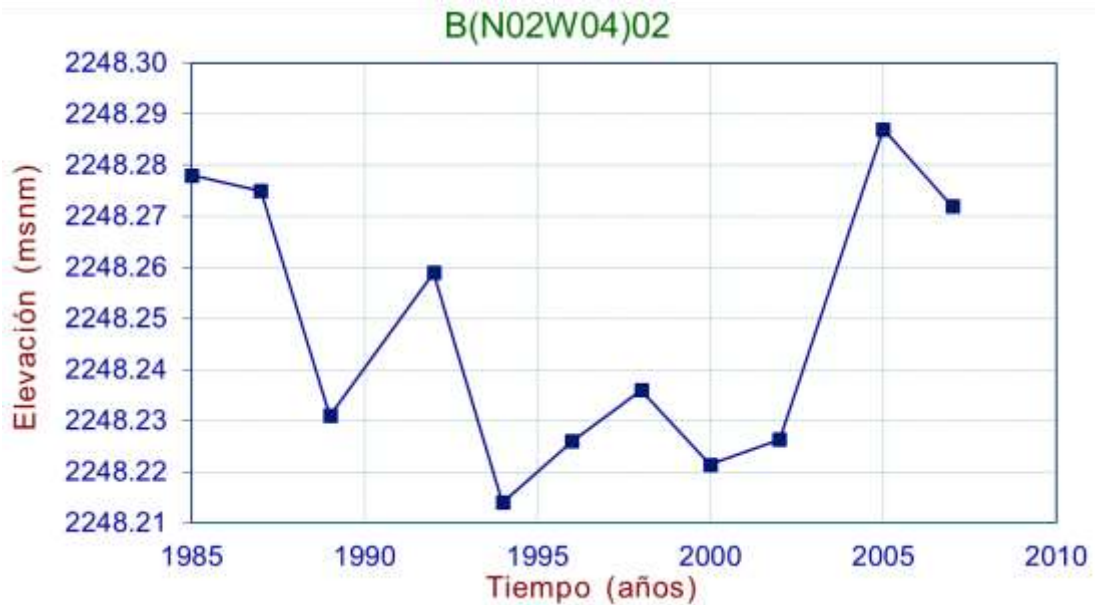
El primer filtrado de datos se realizó descartando los aproximadamente 600 ubicados en terreno firme, pues no están sujetos al proceso de consolidación y la elevación no varía con el tiempo.

Con los bancos ubicados en las zonas de transición y de lago, se construyeron curvas de comportamiento para cada uno, y se descartaron aquellos que presentaron anomalías en los registros de nivelación.



**Figura 13. Bancos de terreno firme, zona de transición y lago**

El comportamiento errático de los bancos descartados se debe a problemas en la toma de lecturas de las elevaciones y/o a la alteración física del banco. Las posibles causas son: remoción por remodelación y construcción de banquetas y camellones, reemplazo de las placas o incluso el robo de estas. En la Figura 14 se muestran ejemplos del comportamiento de los bancos descartados.



**Figura 14. Ejemplo de bancos descartados**

Después de revisar cuidadosamente la ubicación y el comportamiento de los registros de nivelación de cada banco, se seleccionaron 735, de ellos casi el 60% tienen más de 30 años de monitoreo. Un bajo porcentaje tienen registros de nivelación menores a 20 años. En la Tabla 1 y en la Figura 15 se muestran el porcentaje de bancos y el año de inicio del monitoreo.



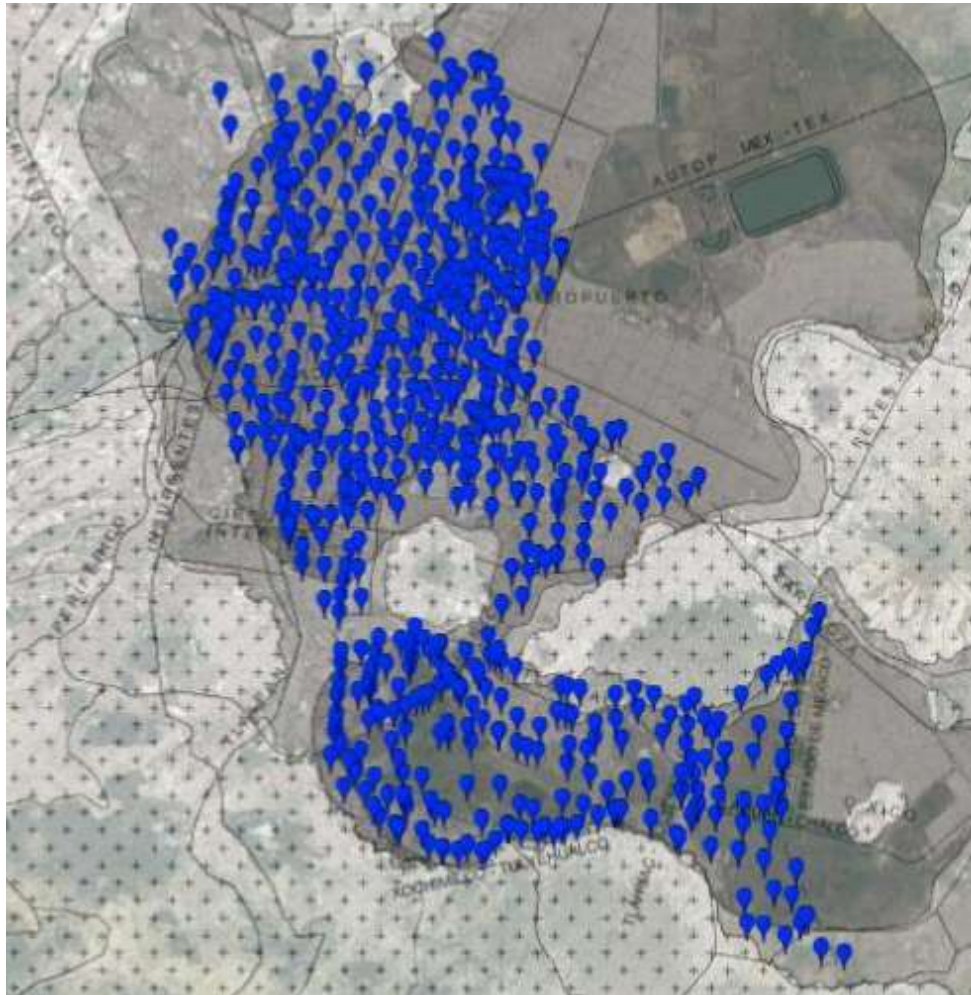
**Tabla 1. Inicio del monitoreo de los bancos de nivel**

Año de inicio del monitoreo	Número de bancos	Porcentaje que representan %
1983	294	40.0
1985	135	18.4
1987	35	4.8
1989	33	4.5
1992	48	6.5
1994	85	11.6
1996	85	11.6
1998	13	1.8
2000	6	0.8
2002	1	0.1



**Figura 15. Histograma del inicio del año de monitoreo y número de los bancos de nivel**

En la Figura 16 se muestra la distribución de los 735 bancos principalmente ubicados en la zona de lago y algunos en la zona de transición. La mayoría de los bancos descartados por presentar registros erróneos se ubicaron en la zona de transición.



*Figura 16. Distribución de los 735 bancos de nivel superficial*

Se destaca que los depósitos de suelo compresible de la zona de lago con mayor espesor son los susceptibles a sufrir los cambios más significativos en la respuesta sísmica con el paso del tiempo, mientras que los suelos de la zona de transición se ven menos afectados por presentar espesores inferiores a 20 m, velocidades de hundimiento generalmente bajas y un periodo dominante de vibración menor a 1 s.

#### **4.1.3 Construcción de curvas de comportamiento y velocidad de hundimiento**

Cada banco cuenta con un registro de elevaciones en msnm; sin embargo, el hundimiento se puede expresar en metros si se resta cada nivelación del primer registro que se tiene para cada punto. Así, el hundimiento de cada banco comienza en cero y se va acumulando con el paso del tiempo.



Conocido el hundimiento acumulado para cada año monitoreado y el tiempo transcurrido entre cada nivelación, se calculó para cada banco la velocidad de hundimiento en cada intervalo de tiempo registrado, así como el valor promedio en centímetros por año.

En las Figuras 17 y 18 se muestran ejemplos del comportamiento para los bancos 1-B(N01E01)01 y 697-P(S04E07)01 respectivamente, así como la velocidad de hundimiento que han reportado con el tiempo, la línea roja de la imagen inferior representa la velocidad de hundimiento promedio. Todas las figuras con el comportamiento de los bancos se pueden consultar en el sitio Web: [www.sismica.com.mx/sehedis](http://www.sismica.com.mx/sehedis).

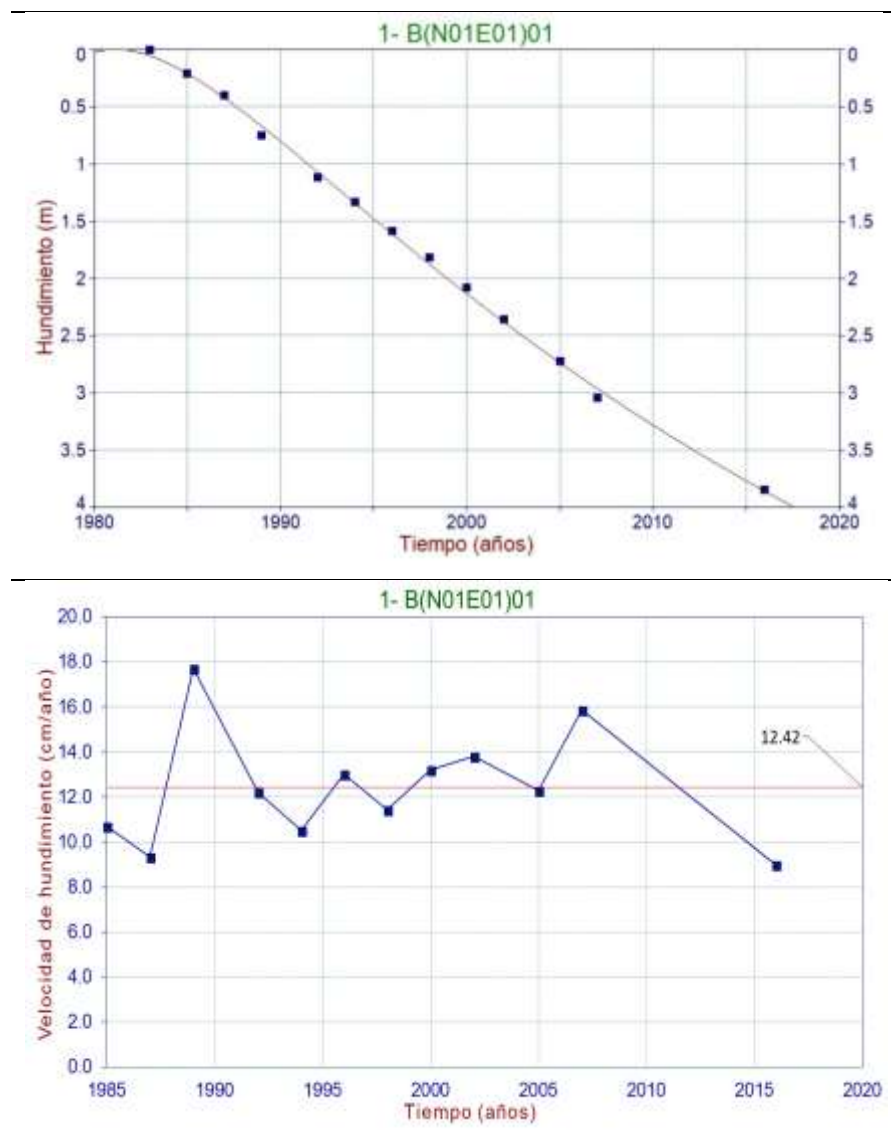
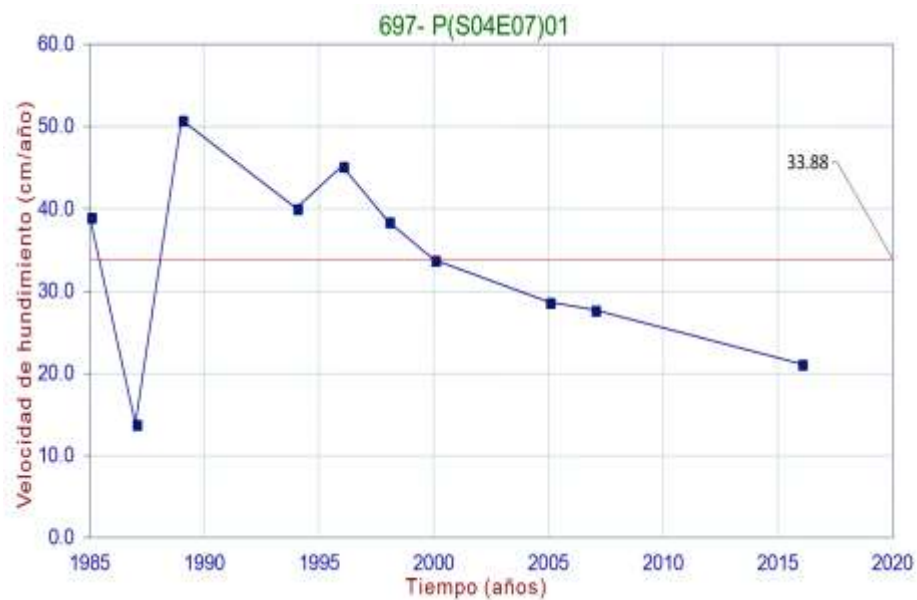
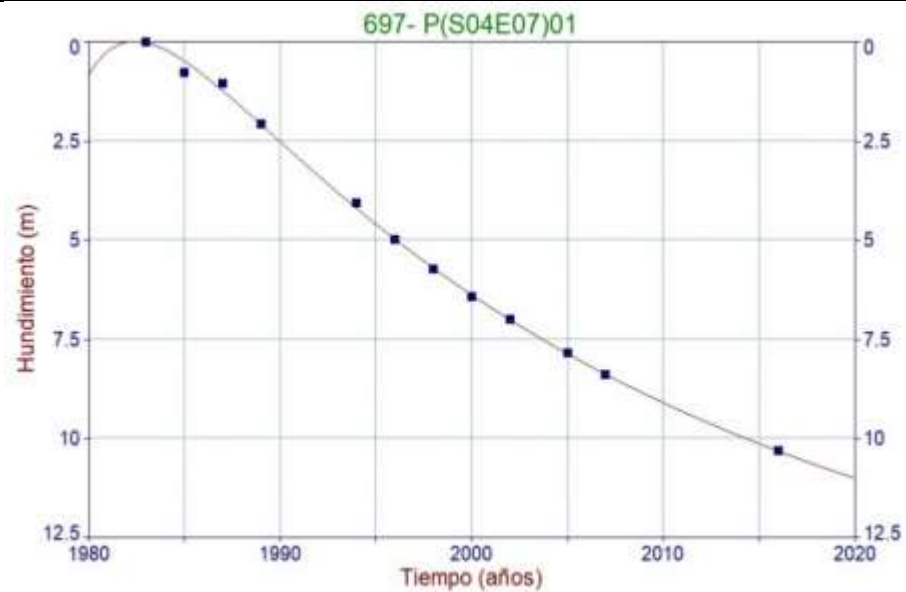


Figura 17. Comportamiento del banco 1-B(N01E01)01



**Figura 18. Comportamiento del banco 697-P(S04E07)01**

De todos los bancos analizados, la velocidad de hundimiento promedio más alta registrada fue de  $V_h = 37.5$  cm/año en un banco que se ubica en el Lago de Chalco al sureste de la ciudad.

En la Figura 19 se muestra la distribución del número de bancos por intervalos de velocidad de hundimiento promedio a cada 5 cm/año.

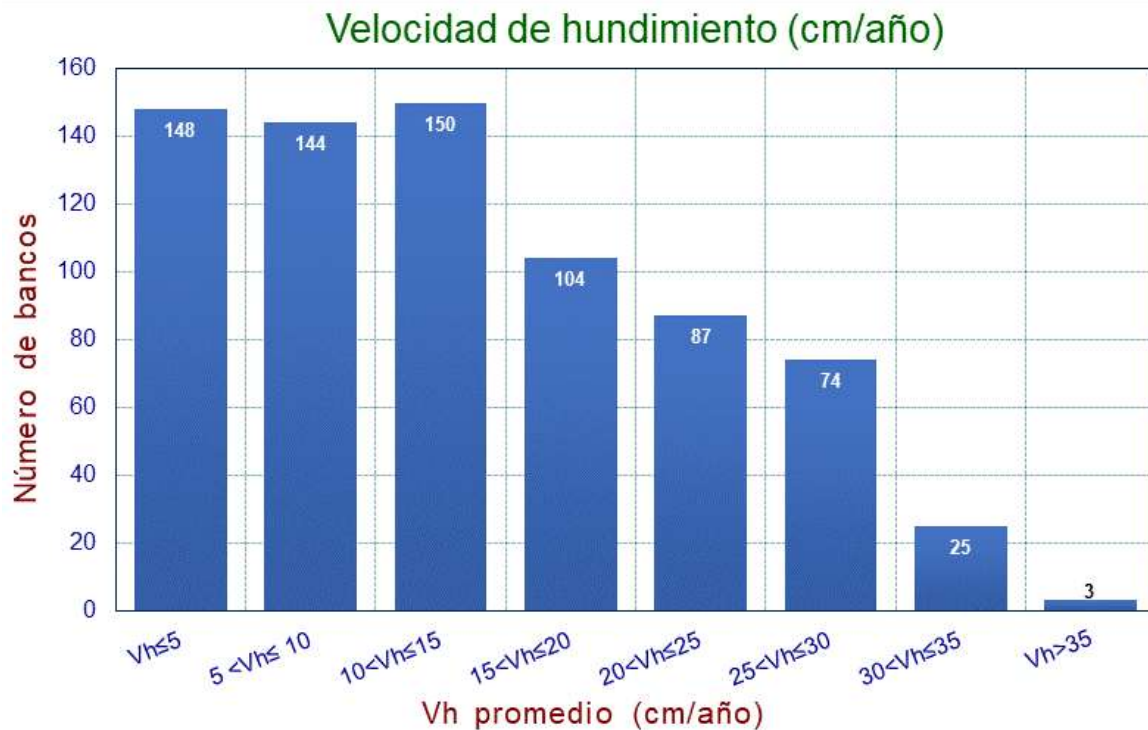


Figura 19. Distribución de la velocidad de hundimiento promedio

#### 4.2 Estimación del hundimiento regional a futuro

La predicción del comportamiento del hundimiento a futuro es dependiente de los registros medidos y del uso de una función matemática que se ajuste a los datos que permita estimar su evolución.

Hasta el año 2007, la proyección del hundimiento se había realizado comúnmente utilizando funciones matemáticas de tipo lineal, pues este comportamiento se ajustaba a los datos medidos. Sin embargo, la obtención de la nivelación del 2016, después de nueve años desde la última medición, mostró un comportamiento diferente al esperado con predicciones lineales para la gran mayoría de los bancos.

Diferentes funciones matemáticas se pueden ajustar al comportamiento medido de los datos para estimar el comportamiento a futuro con consideraciones más cercanas a la realidad del problema.



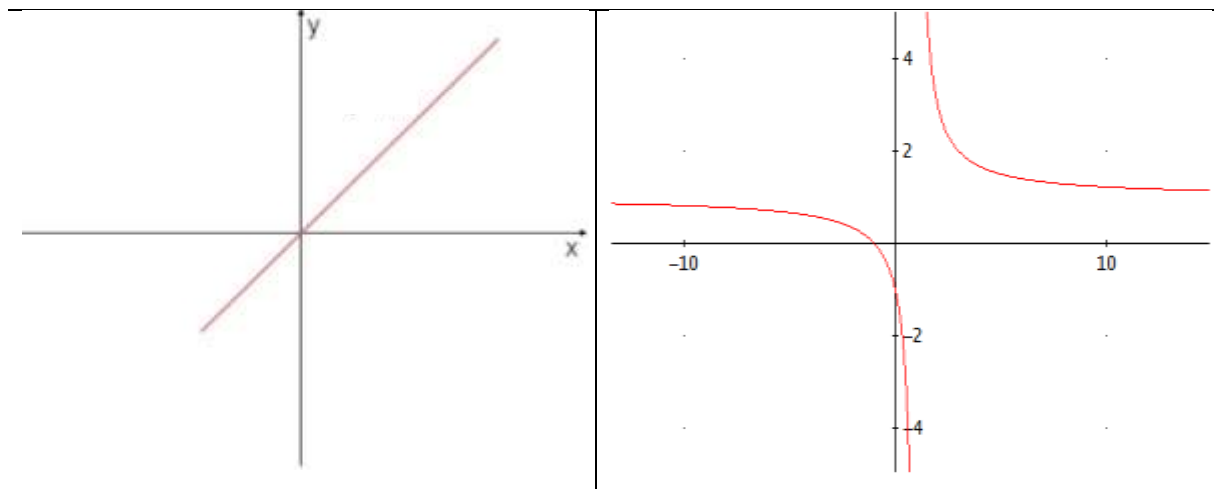
Los suelos sujetos al proceso de consolidación por extracción de agua reducen su espesor, pero la porción sólida del suelo se considera incompresible, por lo que suponer un ajuste lineal conllevaría a reducir todo el espesor del suelo a largo plazo. A continuación, se describen brevemente las funciones lineal y racional.

Función lineal: es una función polinómica de primer grado que está representada en el plano cartesiano por una línea recta (Figura 20 izquierda). Esta función depende de la pendiente de la línea ( $m$ ), de la ordenada al origen o corte con el eje  $Y$  ( $c$ ) y de la variable  $x$ .

$$f(x) = mx + c$$

Función racional: es el cociente de dos polinomios  $P$  y  $Q$  donde el denominador es diferente de cero, está representada en el plano cartesiano por hipérbolas (Figura 20 derecha). Si  $P$  y  $Q$  son polinomios de primer grado, la función es racional lineal.

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

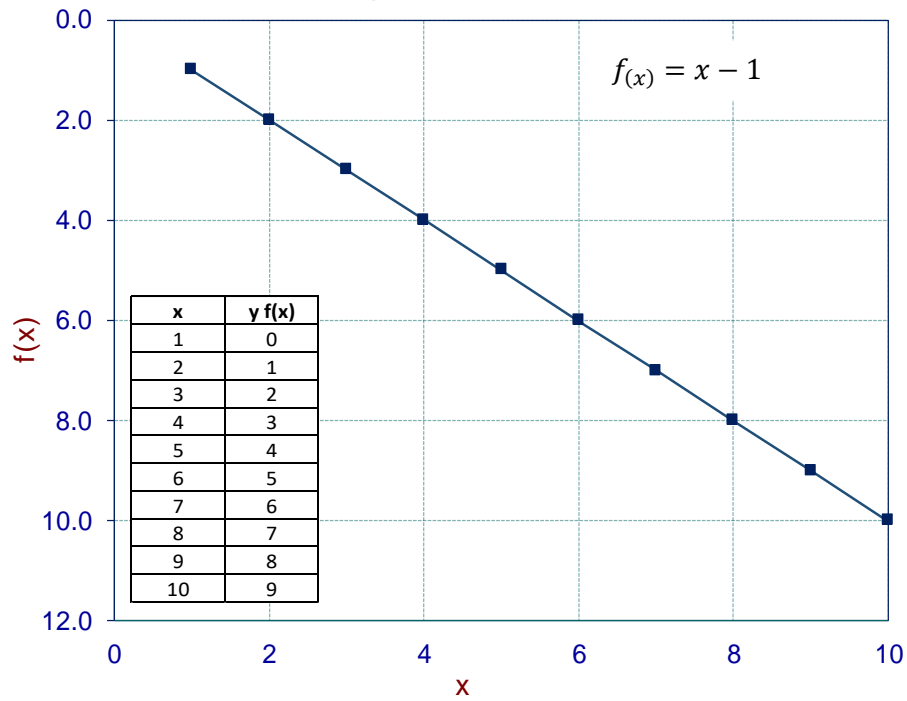


**Figura 20. Funciones lineal y racional**

En la Figura 21 se muestra esquemáticamente el comportamiento del hundimiento representado a través de una función lineal y una racional.



### Comportamiento lineal



### Comportamiento racional

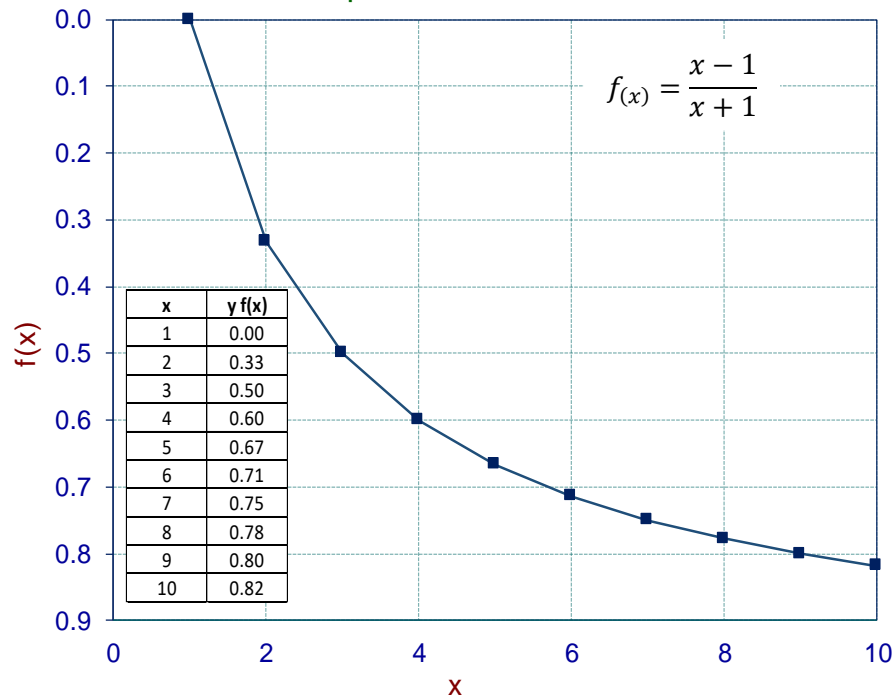


Figura 21. Tipos de funciones matemáticas para representar el hundimiento regional



Se revisaron varias funciones matemáticas, para reproducir el comportamiento del hundimiento. Las que mejor se ajustaron a los registros medidos fueron ecuaciones de tipo racional.

El cociente de dos polinomios, con denominador diferente de cero describe la trayectoria de dos ramas de hipérbolas. El comportamiento del hundimiento de la mayoría de los bancos se ajustó a la hipérbola de la rama derecha de la Figura 20. Los bancos con comportamiento a simple vista lineal se ubicaron en la parte superior de la hipérbola, mientras que los bancos con curvatura más pronunciada se ajustaron mejor a la parte central de la misma.

En la Figura 22, el banco 1-B(N01E01)01 parece tener un comportamiento lineal (en rojo los puntos medidos). Sin embargo, el ajuste racional (azul) predice un hundimiento acumulado menor a los 8 m para el año 2070, mientras que con el modelo lineal (naranja) es mayor a los 10 m y se estaría sobre estimando el hundimiento acumulado.

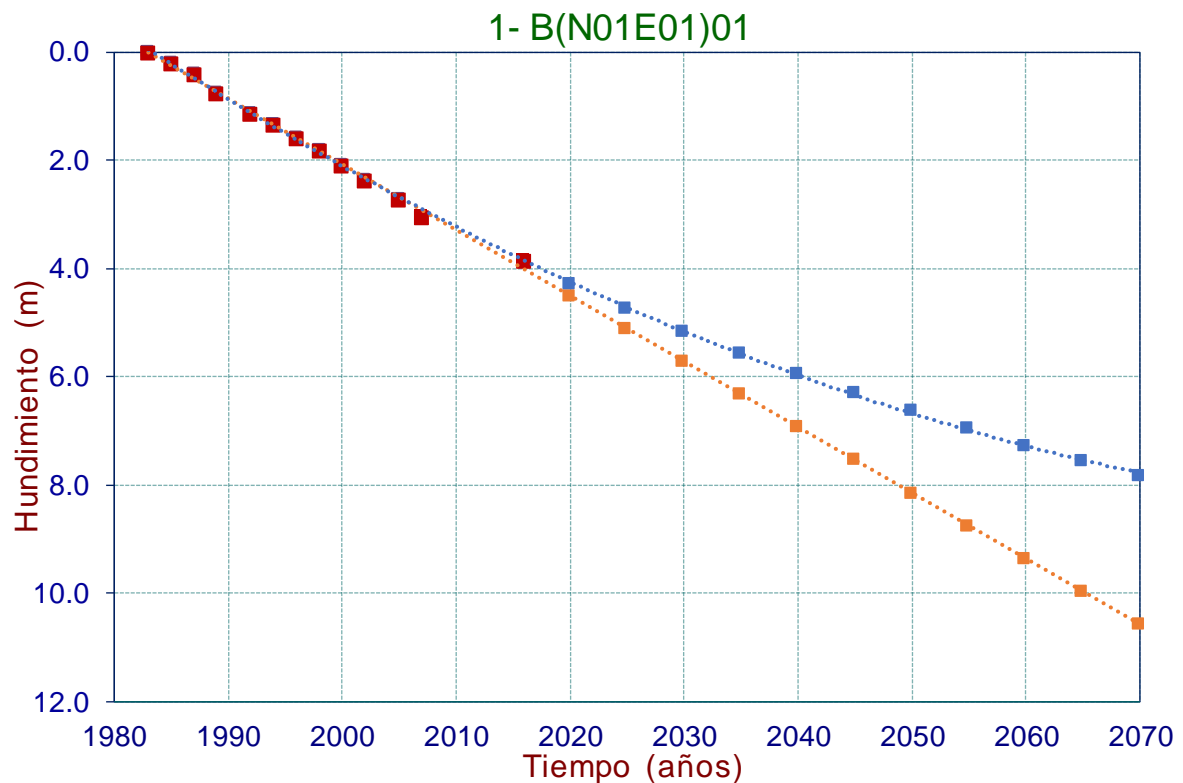
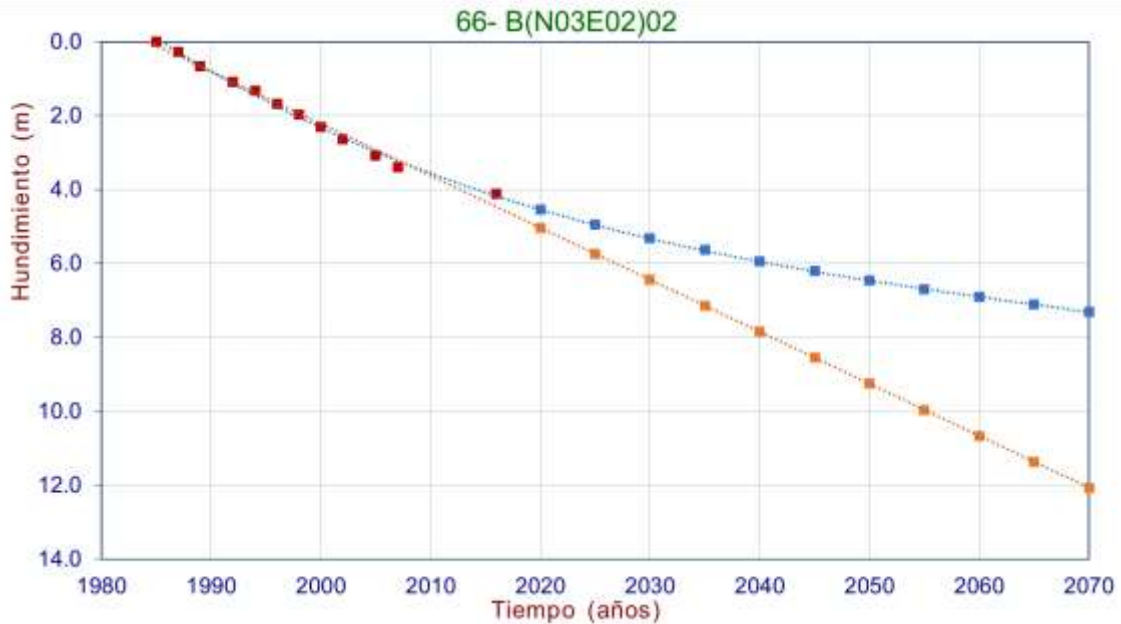


Figura 22. Ajustes lineal y racional para el banco 1-B(N01E01)01



En la Figura 23, el banco 106-B(N06E01)04 muestra un ajuste con un comportamiento hiperbólico más evidente que se describe mejor con un ajuste racional (azul), mientras que el modelo lineal (naranja) no reproduce adecuadamente el comportamiento medido.



**Figura 23. Modelo racional y lineal para el banco 66-B(N03E02)02**

Para estimar el comportamiento a futuro de cada banco, se utilizó el programa TableCurve 2D®, que es un software que automatiza el proceso de ajuste lineal y no lineal de curvas. El programa permite introducir los datos medidos y evaluar las funciones que mejor se ajustan a los registros.

En la Figura 24 se muestra el proceso de estimación del hundimiento a futuro para el banco 1-B(N01E01)01. Las curvas que aparecen en esta figura corresponden a los datos medidos. En la parte inferior derecha se observa una franja azul que resalta la ecuación de mejor ajuste y, en el módulo de evaluación (ovalado rojo) los valores estimados hasta el año 2070 en intervalos de 5 años. Con los valores obtenidos se construyó la curva de hundimiento a futuro del banco. Este proceso se realizó para cada uno de los 735 bancos.

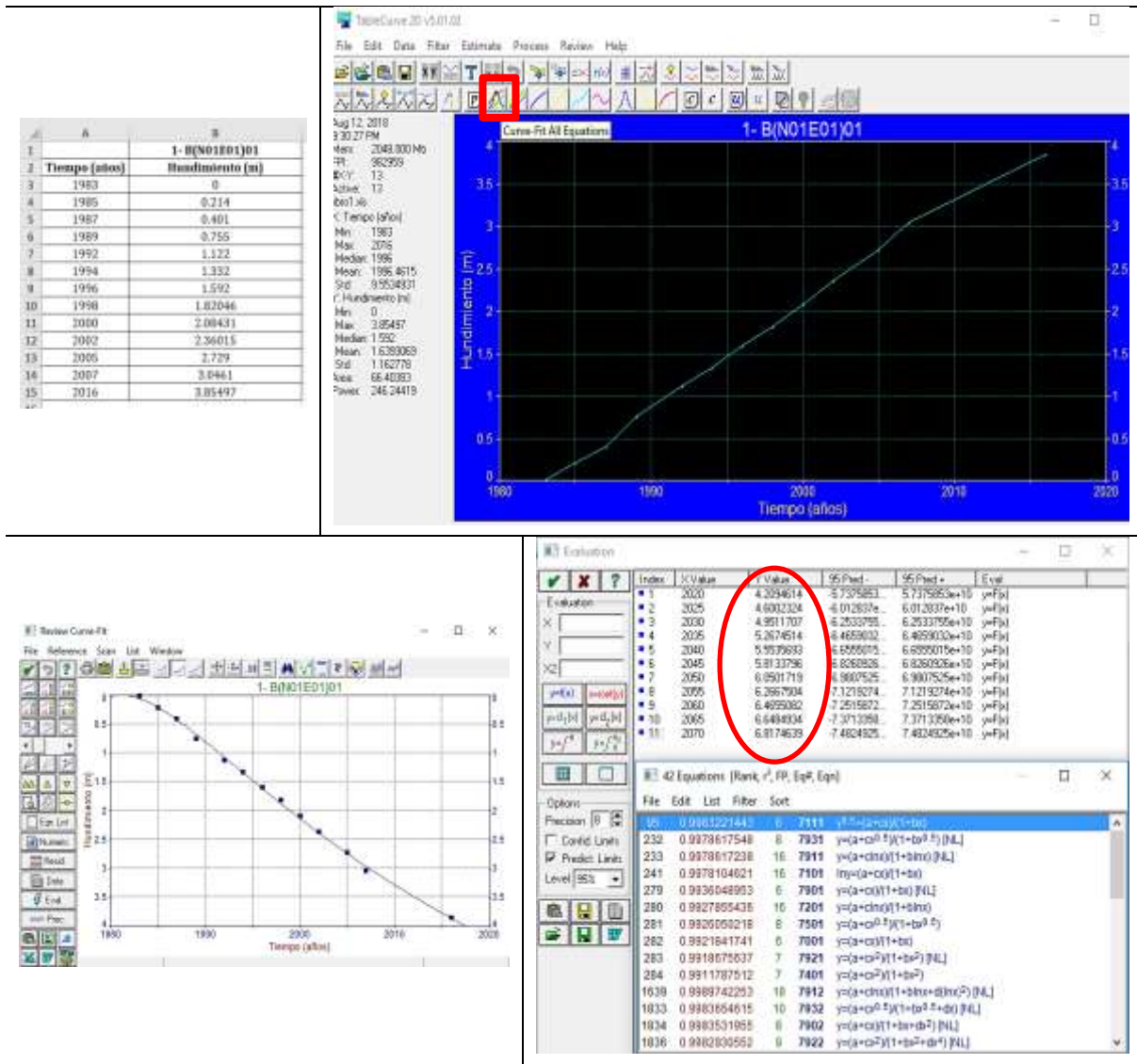
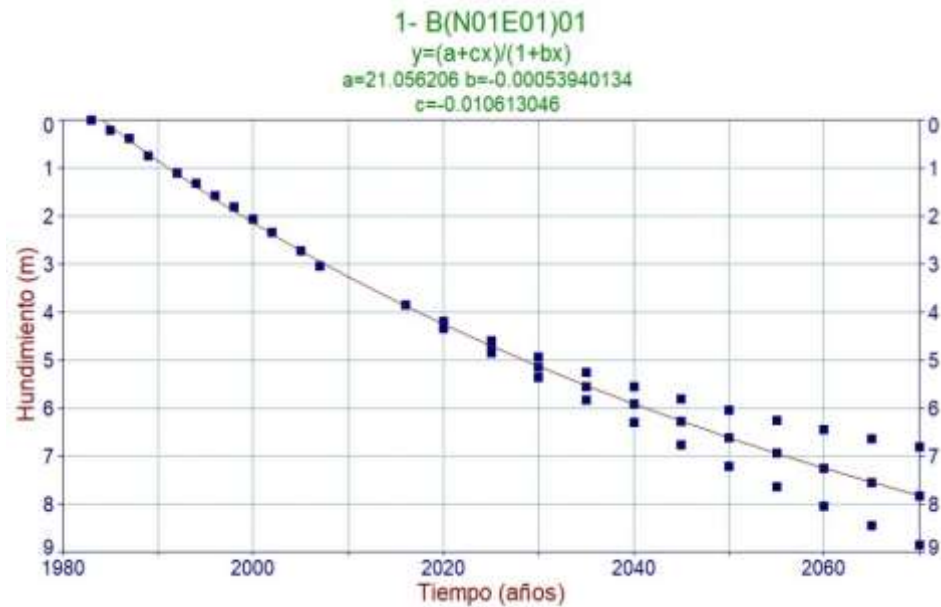


Figura 24. Proceso de estimación del hundimiento futuro para el banco 1-B(N01E01)01

Para la mayoría de los bancos, los mejores ajustes fueron con dos tipos de ecuaciones racionales. Una mostraba una tendencia de hundimiento más bajo y la otra, por el contrario, un hundimiento mayor. Por esta razón se consideraron los dos comportamientos y se tomó el promedio aritmético como referencia para los cálculos posteriores. Adicionalmente, en la figura generada para cada banco se muestra también la ecuación de la curva promedio, como se indica en la parte superior de la Figura 25.



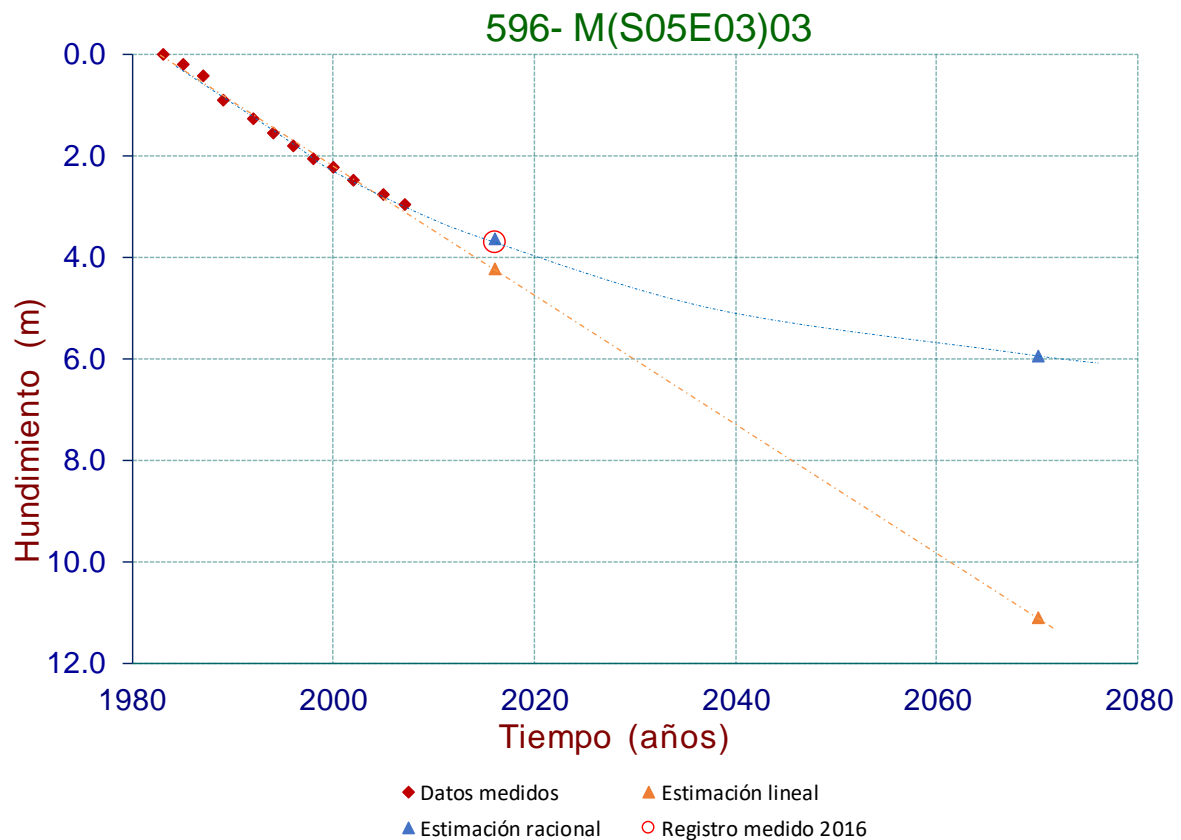
*Figura 25. Curva promedio de comportamiento a futuro para el banco 1-B(N01E01)01*

Los dos criterios que se usaron para seleccionar las ecuaciones mencionadas fueron:

- Las curvas de mejor ajuste a los datos medidos.
- Las funciones que estimaban con mejor precisión el hundimiento medido para el año 2016.

En la Figura 26 se muestra el ejemplo del registro medido del banco 596-M(S05E03)03 para el año 2016 (círculo rojo) y la estimación con ajuste lineal (naranja) y racional (azul) para el mismo año. Como se observa, el ajuste racional es el que mejor se aproxima al registro medido.

Este proceso se realizó cuidadosamente para cada uno de los 735 bancos. Las figuras de ajuste y evolución del hundimiento para cada banco se pueden consultar en el portal web [www.sismica.com.mx/sehedis](http://www.sismica.com.mx/sehedis).



**Figura 26. Estimaciones a futuro para el banco 596-M(S05E03)03**

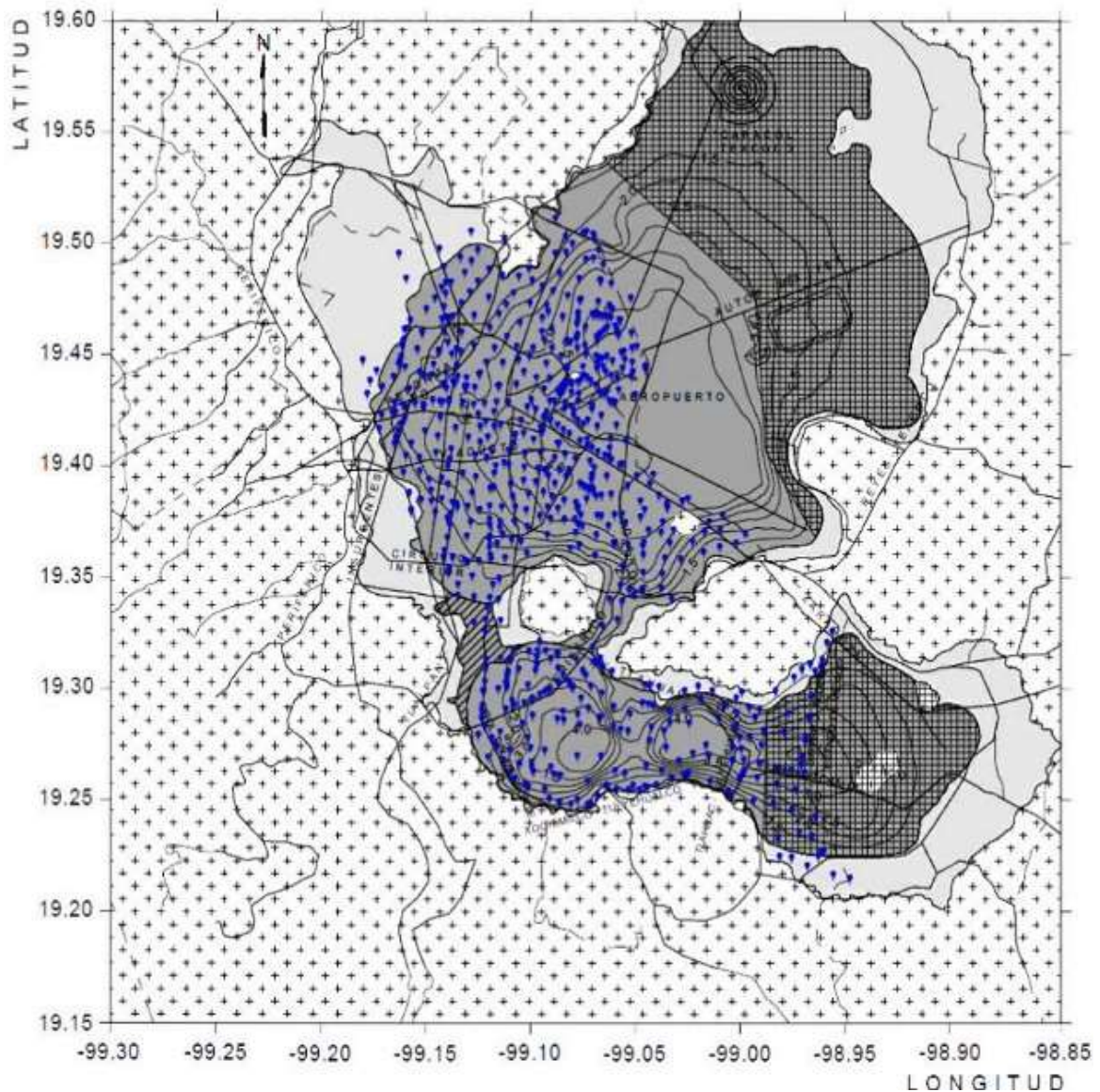
#### **4.3 Obtención de la velocidad de onda de corte, del periodo dominante de vibración y el espesor de los depósitos compresibles iniciales**

Antes de analizar la evolución de los parámetros dinámicos que controlan la respuesta sísmica de los suelos, es necesario fijar las condiciones iniciales. En este caso, se tomaron como referencia los valores de espesor compresible y periodo dominante de vibración del suelo vigentes para el momento de la publicación de las NTC-DS, 2004 del RCDF, 2004.

Con base en estos parámetros y aplicando la siguiente expresión se calculó la velocidad de onda de corte para cada banco y se consideró que su variación es despreciable para el resto de los años analizados.

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





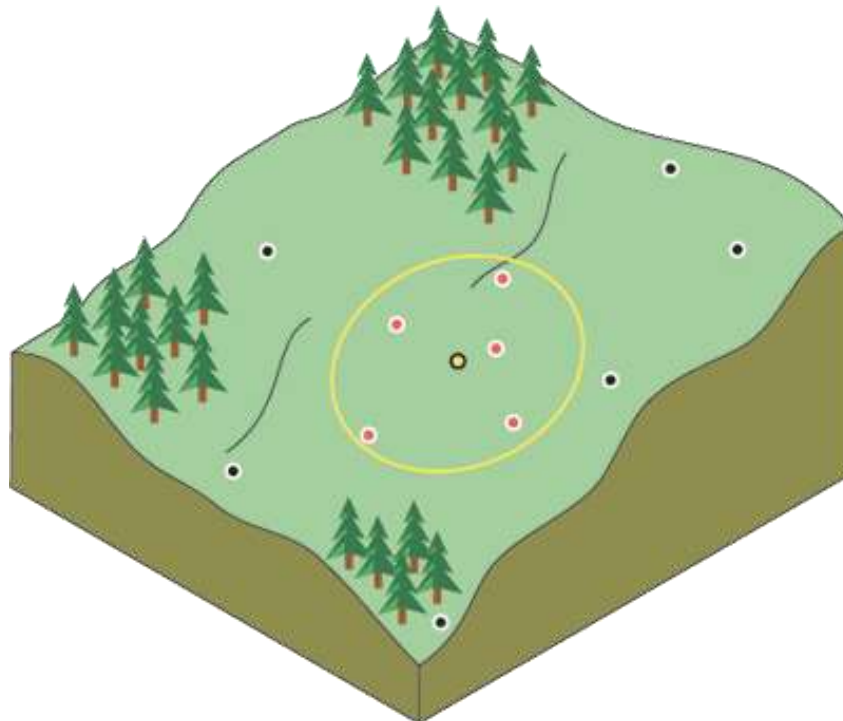
**Figura 28. Bancos de nivel y curvas de igual periodo dominante de vibración**

La interpolación es una herramienta matemática que sirve para predecir o estimar un valor a partir de datos puntuales cercanos y conocidos. Existen principalmente dos tipos de interpolación; la probabilista y la determinista (*Maune et al., 2001*).

El método de interpolación determinista más común es el IDW (Inverse Distance Weighting) o distancia inversa ponderada. Determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra.

La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación (Figura 29).

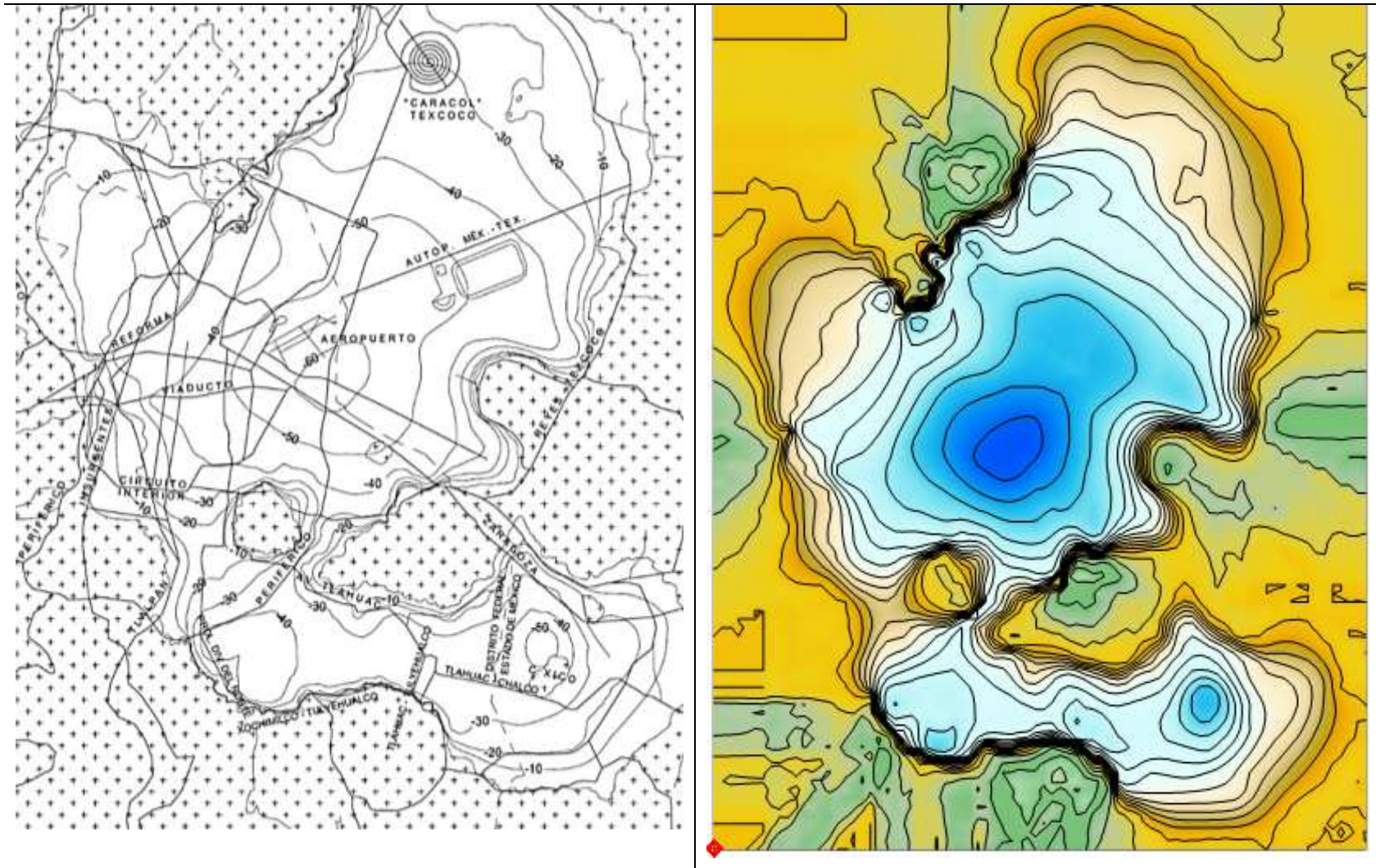
Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. (*Environmental Systems Research Institute, 2018*).



**Figura 29. Interpolación IDW (vecindad de puntos conocidos)**

Los métodos de interpolación probabilísticos más comunes son los métodos geoestadísticos derivados de la forma genérica de Kriging (*Maune et al., 2001*), y están basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos (Figura 30). Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.





*Figura 31. Modelo de interpolación Kriging del espesor de los depósitos*





### 4.3 Evolución del periodo dominante de vibración y del espesor de los depósitos compresibles con el tiempo

La reducción del espesor compresible implica directamente un cambio en el periodo dominante de vibración del suelo y en la velocidad de onda de corte. El espesor compresible  $H$  se ve afectado por el proceso de consolidación e irá disminuyendo con el tiempo como se muestra en la Tabla 2.

Por su parte, la velocidad de onda de corte se estimó a partir de los parámetros conocidos para el año 2004 y se asumió constante con el tiempo, para efectos de esta investigación.

*Tabla 2. Evolución del espesor compresible  $H$  (m)*

BANCO	H (m) 2016	H (m) 2020	H (m) 2030	H (m) 2040	H (m) 2050	H (m) 2060	H (m) 2070
1- B(N01E01)01	33.9	33.5	32.6	31.8	31.1	30.5	29.9
2- B(N01E01)03	34.6	34.2	33.8	33.4	33.1	32.8	32.6
3- B(N01E01)04	35.0	34.6	33.8	33.1	32.4	31.9	31.3
4- B(N01E01)05	34.1	33.8	33.1	32.5	32.0	31.6	31.3
5- B(N01E02)01	37.0	36.6	35.7	34.9	34.2	33.6	33.1

A partir de estas consideraciones se obtuvo para cada banco la variación del periodo dominante de vibración del suelo hasta el 2070 en intervalos de 10 años, empleando para ello la ecuación que se muestra a continuación.

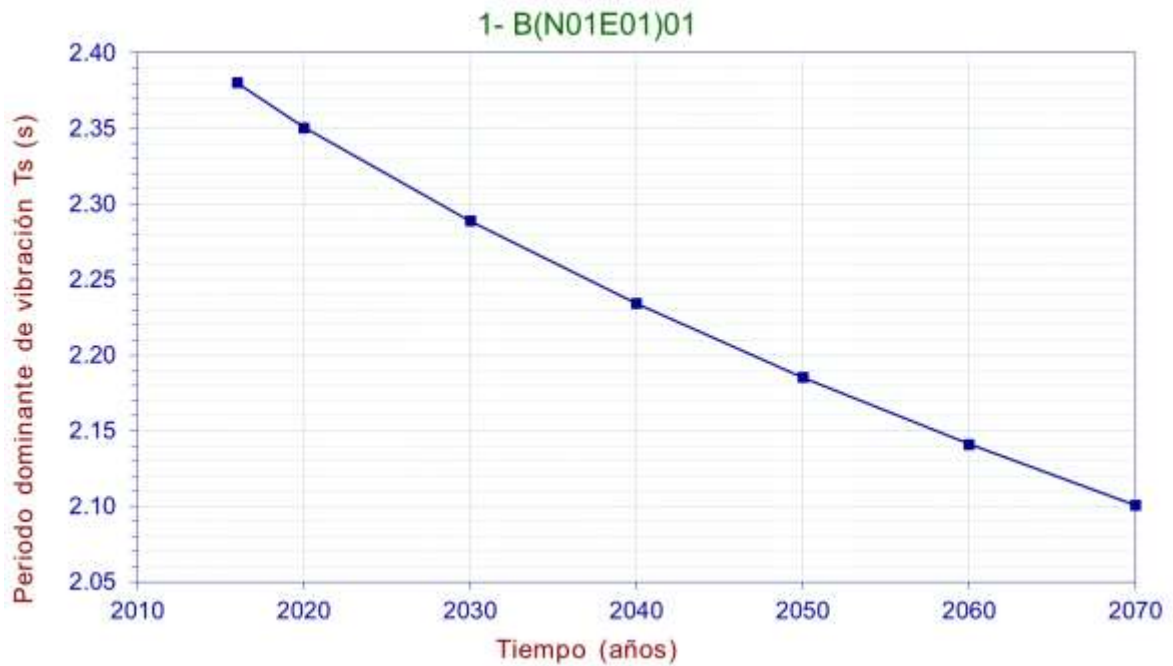
$$T_s = \frac{4H}{V_s}$$

En la Tabla 3 se muestra la variación del periodo dominante de vibración del suelo para 5 bancos. En la Figura 33 se muestra la evolución de  $T_s$  para el banco 1-B(N01E01)01. La reducción del periodo dominante de vibración del suelo en los sitios coincidentes con los bancos se puede consultar en la página Web [www.sismica.com.mx/sehedis](http://www.sismica.com.mx/sehedis), donde se concentra toda la información por cada banco de nivel superficial.



**Tabla 3. Evolución del periodo fundamental de vibración  $T_s$  (s)**

BANCO	$T_s$ (s) 2016	$T_s$ (s) 2020	$T_s$ (s) 2030	$T_s$ (s) 2040	$T_s$ (s) 2050	$T_s$ (s) 2060	$T_s$ (s) 2070
1- B(N01E01)01	2.38	2.35	2.29	2.23	2.19	2.14	2.10
2- B(N01E01)03	2.37	2.34	2.31	2.28	2.26	2.25	2.23
3- B(N01E01)04	2.39	2.36	2.31	2.26	2.21	2.17	2.14
4- B(N01E01)05	2.33	2.31	2.26	2.22	2.19	2.16	2.14
5- B(N01E02)01	2.62	2.59	2.53	2.47	2.42	2.38	2.34



**Figura 33. Evolución del periodo fundamental de vibración para el banco 1-B(N01E01)01**

## CAPÍTULO 5

### EVOLUCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LOS SUELOS

#### 3.6 Respuesta sísmica

Los depósitos de suelo responden de acuerdo con sus propiedades dinámicas ante un evento sísmico. Si los parámetros evolucionan con el tiempo, también lo hará la respuesta sísmica. Para conocer la aceleración a la que van a estar sujetas las estructuras construidas sobre los depósitos de suelo compresibles de la Ciudad de México, es necesario construir espectros de diseño sísmico que consideren los cambios en la respuesta de los suelos con el tiempo.

##### 3.6.1 Espectro de respuesta

Es la curva de máximas respuestas (desplazamiento, velocidad o aceleración) de osciladores de un grado de libertad (representativos de estructuras en su modo fundamental) sometidos a la misma excitación y para el mismo nivel de amortiguamiento. En la Figura 34 se muestran esquemáticamente espectros de respuesta.

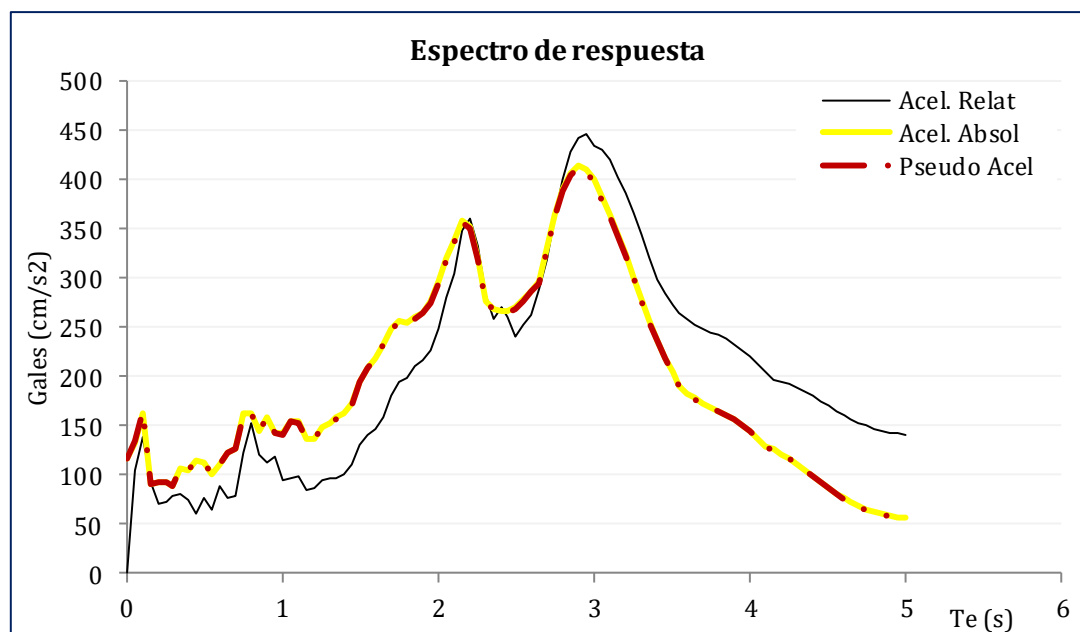
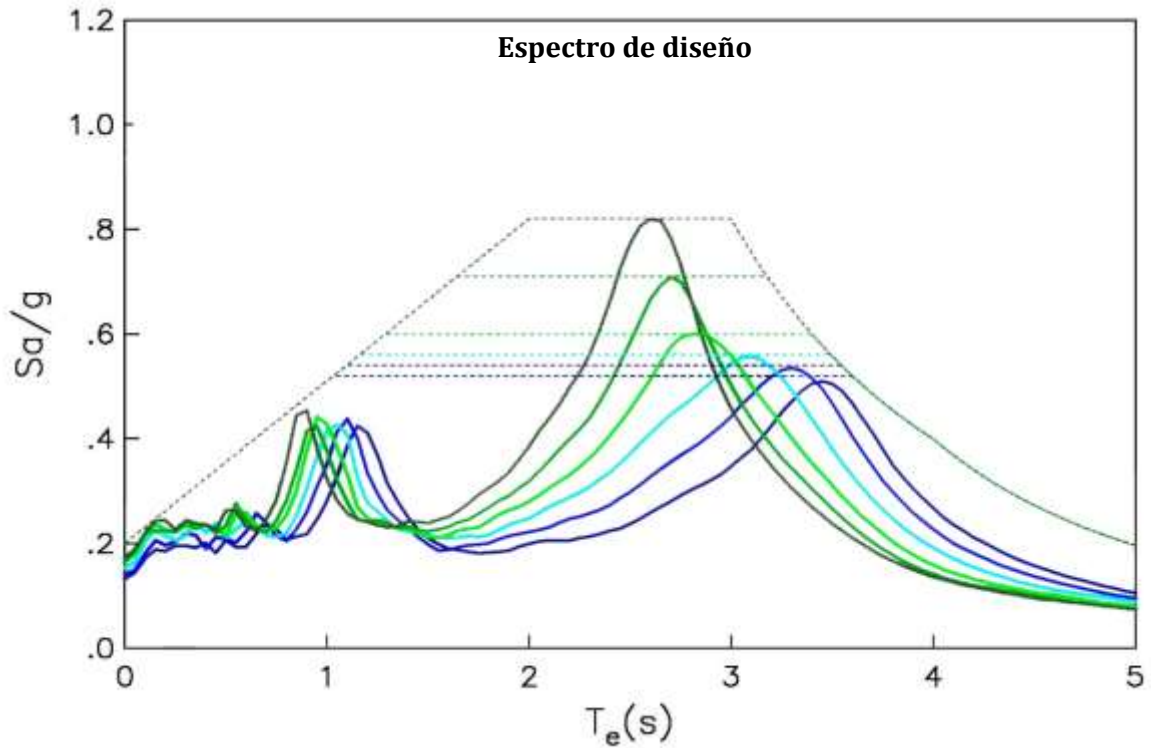


Figura 34. Espectro de respuesta

El comportamiento sísmico de un sitio se determina construyendo espectros de respuesta para cada una de las fuentes sísmicas que afecten la zona de interés.

### 3.6.2 Espectro de diseño

Es la curva que envuelve a los espectros de respuesta. En la Figura 35 se muestra un ejemplo de la envolvente de varios espectros de respuesta.



*Figura 35. Espectro de diseño sísmico*

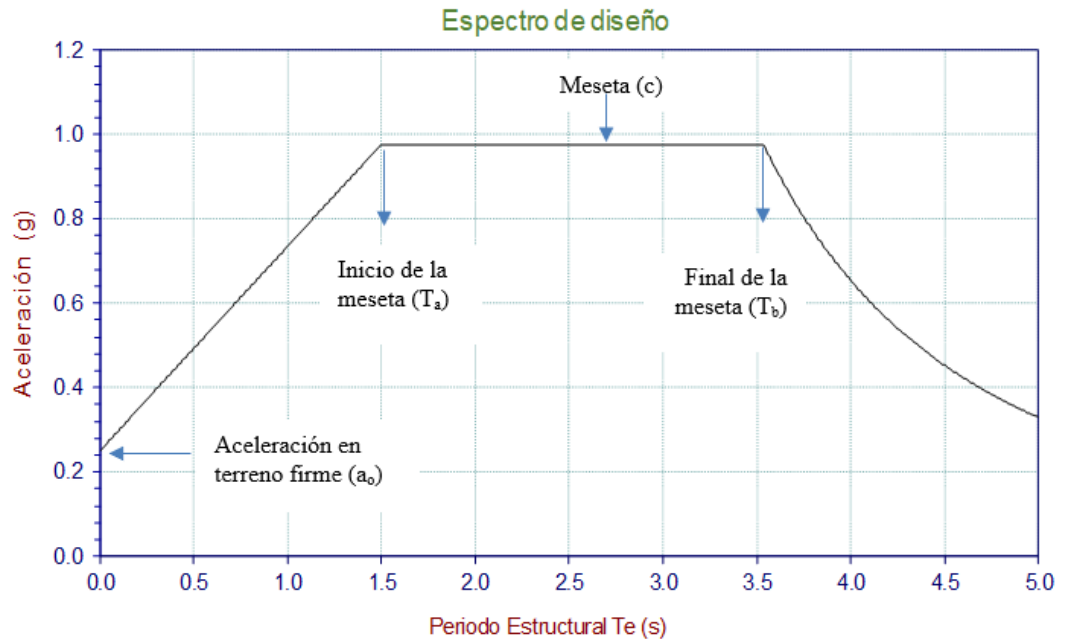
Los parámetros que definen la forma de los espectros de diseño se muestran en la Figura 36 y sus ordenadas se obtienen al aplicar las expresiones siguientes:

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

Donde:

$$P = K + (1 - K) \left( \frac{T_b}{T} \right)^2 \text{ y}$$

$\beta$  = es un factor de reducción por amortiguamiento suplementario, que es igual a uno cuando se ignora la interacción suelo-estructura.



**Figura 36. Parámetros de un espectro de diseño**

En el Apéndice A de las anteriores NTC-DS, 2004 se propuso construir espectros de diseño transparentes para un periodo de retorno  $T_R = 125$  años, a partir del periodo dominante de vibración del suelo. Con este parámetro, el coeficiente de aceleración del terreno,  $a_0$ , el coeficiente sísmico  $c$ , el coeficiente  $K$  y los periodos característicos  $T_a$  y  $T_b$  del espectro de aceleraciones se obtienen a partir de las ecuaciones siguientes:

$$a_0 = \begin{cases} 0.1 + 0.15(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 0.25 & \text{si } T_s > 1.5 \text{ s} \end{cases}$$



$$c = \begin{cases} 0.28 + 0.92(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 < T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 1.2 & \text{si } 1.5 < T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.2 - 0.5(T_s - 2.5) & \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 0.7 & \text{si } T_s > 3.5 \text{ s} \end{cases}$$

$$T_a = \begin{cases} 0.2 + 0.65(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 < T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.5 & \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.25 \text{ s} \\ 4.75 - T_s & \text{si } 3.25 < T_s \leq 3.9 \text{ s} \\ 0.85 & \text{si } T_s > 3.9 \text{ s} \end{cases}$$

$$T_b = \begin{cases} 1.35 & \text{si } T_s \leq 1.125 \text{ s} \\ 1.2T_s & \text{si } 1.125 < T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 4.2 & \text{si } T_s > 3.5 \text{ s} \end{cases}$$

$$K = \begin{cases} 2 - T_s & \text{si } 0.5 < T_s \leq 1.65 \text{ s} \\ 0.35 & \text{si } T_s > 1.65 \text{ s} \end{cases}$$

Donde:

$a_o$ : Corresponde al inicio del espectro y representa la aceleración de campo libre, es decir, en el terreno sin ninguna estructura.

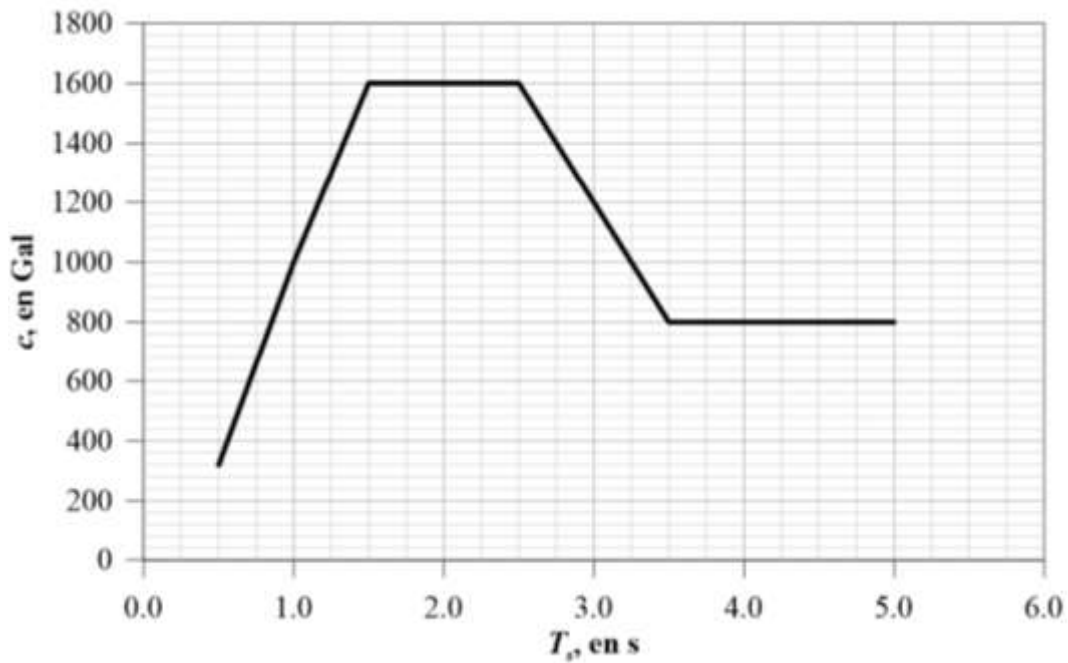
$c$ : Corresponde a la meseta de la curva y representa la aceleración máxima que alcanzan las estructuras con periodo de vibración comprendidos entre  $T_a$  y  $T_b$ .

$T_a$ : Corresponde al periodo estructural (eje de las abscisas) donde comienza la meseta.

$T_b$ : Corresponde al periodo estructural (eje de las abscisas) donde termina la meseta.

$k$ : Es el parámetro que controla la caída de la última rama del espectro.

Actualmente la Ciudad de México cuenta con una nueva normativa para diseño por sismo publicada en gaceta oficial el 15 de diciembre del 2017, donde el periodo de retorno es ahora de  $T_R = 250$  años y el valor mínimo del coeficiente  $c$  es de 1600 Gales. En la Figura 37 se muestran los valores del coeficiente  $c$  en función del periodo dominante de vibración del suelo fijados en las Normas técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2017) para la Ciudad de México.



**Figura 37. Valor del coeficiente  $c$ , como función del periodo,  $T_s$**

Considerando los ajustes al reglamento en cuanto al periodo de retorno y al incremento del coeficiente  $c$ , se han propuesto unas nuevas ecuaciones para calcular el valor de los parámetros  $c$  y  $a_0$  y construir el espectro de diseño transparente en función del periodo dominante de vibración del sitio de interés, tal como se hacía utilizando las ecuaciones del Apéndice A de las NTC-DS, 2004. Las expresiones propuestas se muestran a continuación, mientras que los parámetros  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $K$  y  $P$  se consideran sin cambios.

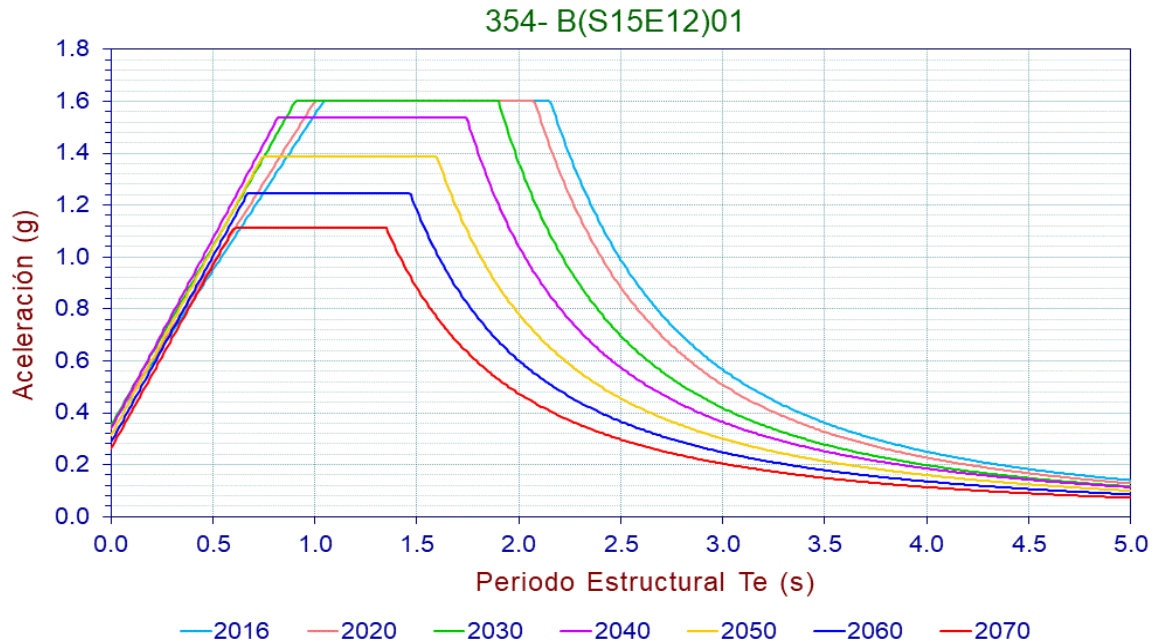
$$a_0 = \begin{cases} 0.12 + 0.23(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 0.35 & \text{si } T_s > 1.5 \text{ s} \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 0.32 + 1.28(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 1.6 & \text{si } 1.5 < T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.6 - 0.8(T_s - 2.5) & \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 0.8 & \text{si } T_s < 3.5 \text{ s} \end{cases}$$

Conociendo el periodo dominante de vibración de cada banco y su cambio estimado hasta el año 2070 en intervalos de diez años, se han construido espectros de diseño evolutivos para



cada banco. En la Figura 38 se muestran los espectros correspondientes al banco 354-B(S15E12)01.



**Figura 38. Espectro de diseño sísmico para el banco 354-B(S15E12)01**

En la Tabla 4 se presentan los parámetros utilizados para la construcción del espectro para el banco 354-B(S15E12)01, así como los datos de velocidad de hundimiento promedio y última velocidad de hundimiento medida en cm/año.

**Tabla 4. Parámetros de construcción del espectro de diseño 354-B(S15E12)01**

<b>354- B(S15E12)01</b>						
<b>Año</b>	<b><math>T_s</math></b>	<b><math>a_0</math></b>	<b>c</b>	<b><math>T_a</math></b>	<b><math>T_b</math></b>	<b>k</b>
2016	1.80	0.35	1.60	1.04	2.15	0.35
2020	1.73	0.35	1.60	1.00	2.08	0.35
2030	1.58	0.35	1.60	0.90	1.90	0.42
2040	1.45	0.34	1.54	0.82	1.74	0.55
2050	1.33	0.31	1.39	0.74	1.60	0.67
2060	1.22	0.29	1.25	0.67	1.47	0.78
2070	1.12	0.26	1.11	0.60	1.35	0.88
Velocidad de hundimiento promedio (1996-2016)				26.5		(cm/año)
Velocidad de hundimiento última (2002-2016)				26.1		(cm/año)



Para sismos de tipo subductivo provenientes de las costas del pacifico mexicano los sitios susceptibles a estar sujetos a aceleraciones más altas se ubican en suelos con  $1.5 < T_s < 2.5$  s.

El periodo dominante de vibración del suelo donde se ubica el banco de nivel 354-B(S15E12)01 era de aproximadamente 1.8 s para el año 2016, y con el paso del tiempo se estima que llegue a 1.12 s en el 2070. Este comportamiento aleja al sitio del rango de periodos peligrosos, es decir, que la respuesta a futuro será favorable para las estructuras construidas en la zona.

Por otro lado, para bancos ubicados en sitios de  $T_s$  largos, la respuesta sísmica aumenta con el tiempo. Para el suelo donde se ubica el banco 68-B(N03E04)01, el periodo dominante de vibración era de aproximadamente 3.07 s para el año 2016, y para el 2070 se estima que llegue a 2.38 s. En este caso las ordenadas espectrales se incrementan.

En la Figura 39 se muestra el espectro evolutivo para el banco 68-B(N03E04)01, así como los parámetros para su construcción y los datos de velocidad de hundimiento (Tabla 5).

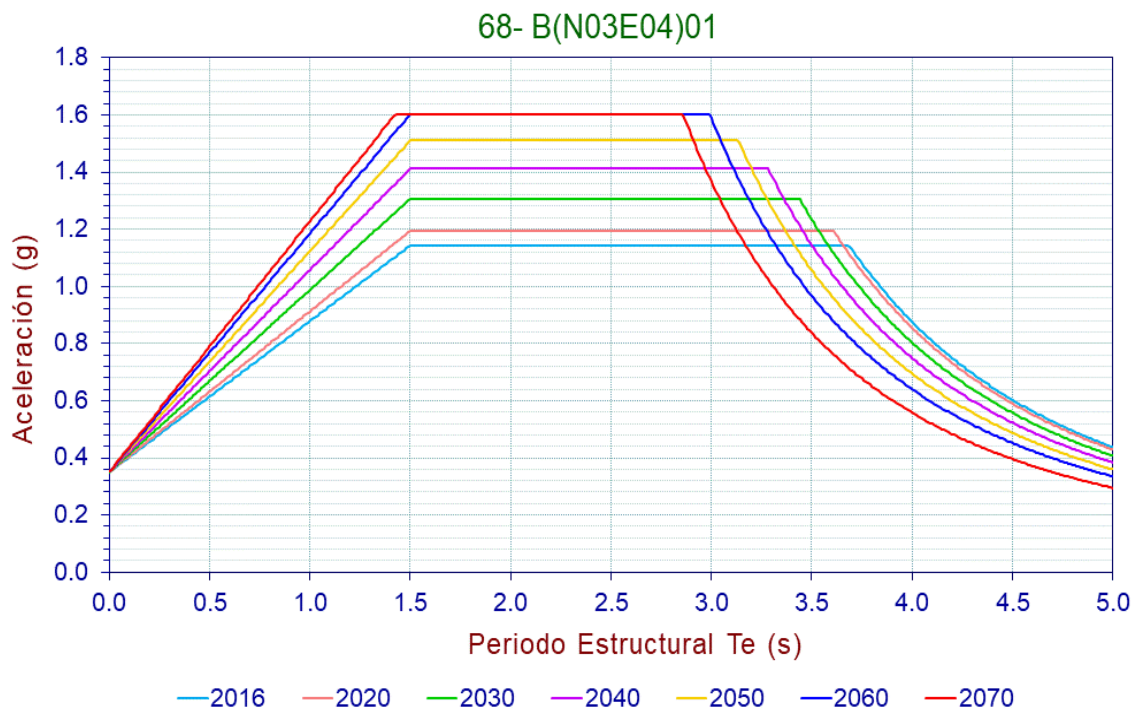


Figura 39. Espectro de diseño sísmico para el banco 68-B(N03E04)01

*Tabla 5. Parámetros de construcción del espectro de diseño 68-B(N03E04)01*

<b>68- B(N03E04)01</b>						
<b>Año</b>	<b><math>T_s</math></b>	<b><math>a_0</math></b>	<b>c</b>	<b><math>T_a</math></b>	<b><math>T_b</math></b>	<b>k</b>
2016	3.07	0.35	1.14	1.50	3.69	0.35
2020	3.01	0.35	1.19	1.50	3.61	0.35
2030	2.87	0.35	1.31	1.50	3.44	0.35
2040	2.74	0.35	1.41	1.50	3.28	0.35
2050	2.61	0.35	1.51	1.50	3.13	0.35
2060	2.50	0.35	1.60	1.50	2.99	0.35
2070	2.38	0.35	1.60	1.42	2.86	0.35
Velocidad de hundimiento promedio			(1985-2016)	20.2	(cm/año)	
Velocidad de hundimiento última			(2007-2016)	20.1	(cm/año)	



## CAPÍTULO 6

### SEHEDIS (SISTEMA DE EVOLUCIÓN DEL HUNDIMIENTO Y ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO)

---

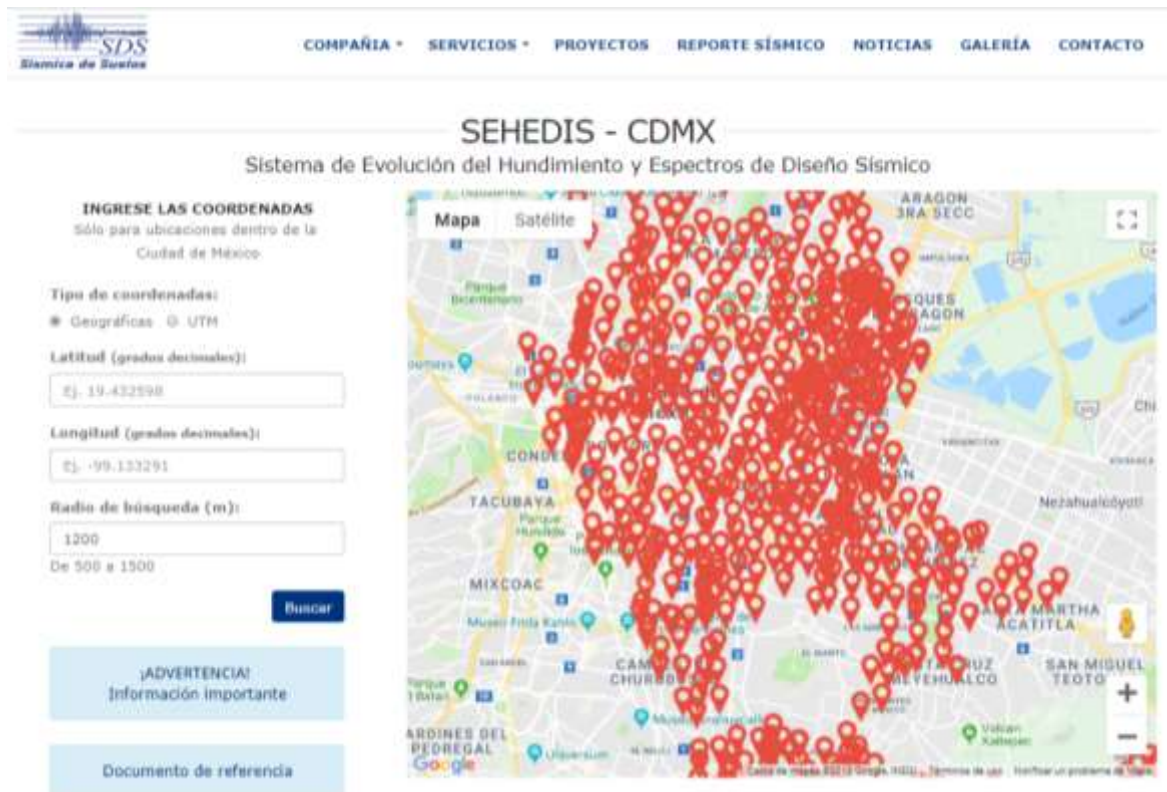
El análisis de la evolución de la respuesta sísmica, considerando el proceso de consolidación al que está sujeto la Ciudad de México, conlleva a una gran cantidad de información difícil de presentar en un documento escrito. Por esta razón surgió la necesidad de crear un mapa interactivo donde se pueda consultar toda la información generada a lo largo de este trabajo.

El Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico (SEHEDIS) es una herramienta que proporciona información sobre el hundimiento regional al que ha estado sometida la Ciudad de México en los últimos 35 años y los efectos que este fenómeno causará en la futura respuesta sísmica del terreno.

El SEHEDIS muestra para cada banco de nivel ubicado en la Ciudad de México la siguiente información:

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

En la Figura 40 se muestra la interfase que el sistema ofrece al usuario, donde es posible consultar la información de los bancos de nivel, representados por iconos sobre el mapa de la Ciudad de México.



**Figura 40. Interfase del sistema SEHEDIS**

El sistema permite realizar la búsqueda de un punto de interés, y ubica los bancos más cercanos en un radio que puede variar entre los 500 y 1500 m, de acuerdo con la necesidad del usuario. En la Figura 41 se observa la ubicación de un punto en el centro de la Ciudad de México.

El banco de nivel más cercano se ubica a 122.5 m. En la Figura 42 se muestra la galería de imágenes en la que la primera reporta el comportamiento medido del banco. La segunda imagen que se puede consultar en la galería del banco muestra la estimación del hundimiento a futuro (Figura 43), la tercera el cambio en el periodo dominante de vibración del suelo (Figura 44), la cuarta los espectros evolutivos con el tiempo (Figura 45) y la quinta imagen reporta los parámetros de construcción de los espectros y los datos de velocidad de hundimiento del banco (Figura 46).

## SEHEDIS - CDMX

Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico

**INGRESE LAS COORDENADAS**  
Sólo para ubicaciones dentro de la Ciudad de México

**Tipo de coordenadas:**  
 Geográficas  UTM

**Latitud (grados decimales):**

**Longitud (grados decimales):**

**Radio de búsqueda (m):**  
  
 De 500 a 1500

**Buscar**

Banco	Radio (m)
514 - M(N01E01)05	122.54
368 - C(N01E01)05	147
367 - C(N01E01)04	157.65
366 - C(N01E01)03	159.31

Mapa Satélite

Google Datos de mapas © 2019 Google, INEGI Términos de uso Notificar un problema de Maps

Figura 41. Búsqueda de un punto de interés

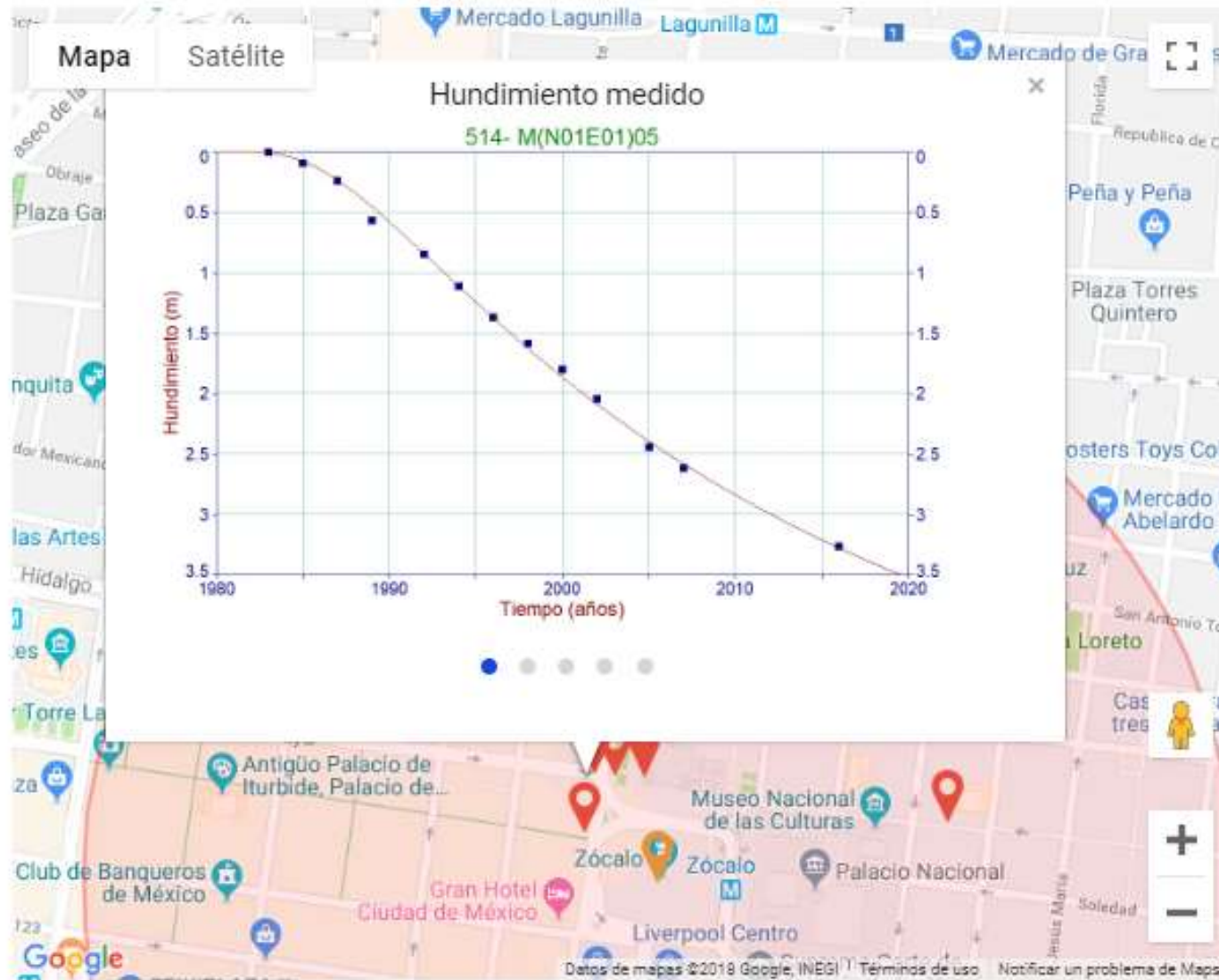


Figura 42. Comportamiento medido del banco 514-M(N01E01)05

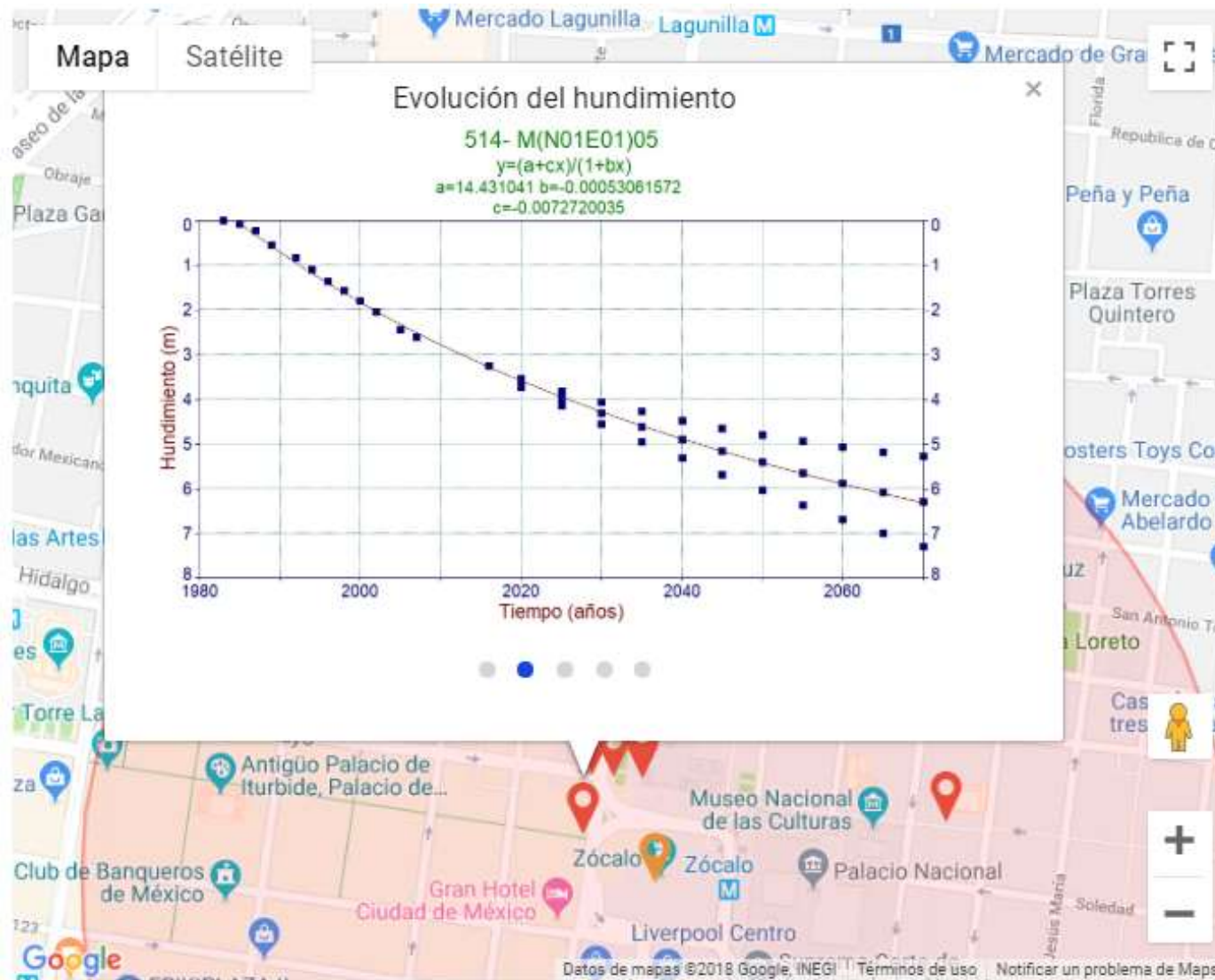


Figura 43. Comportamiento a futuro estimado del banco 514-M(N01E01)05

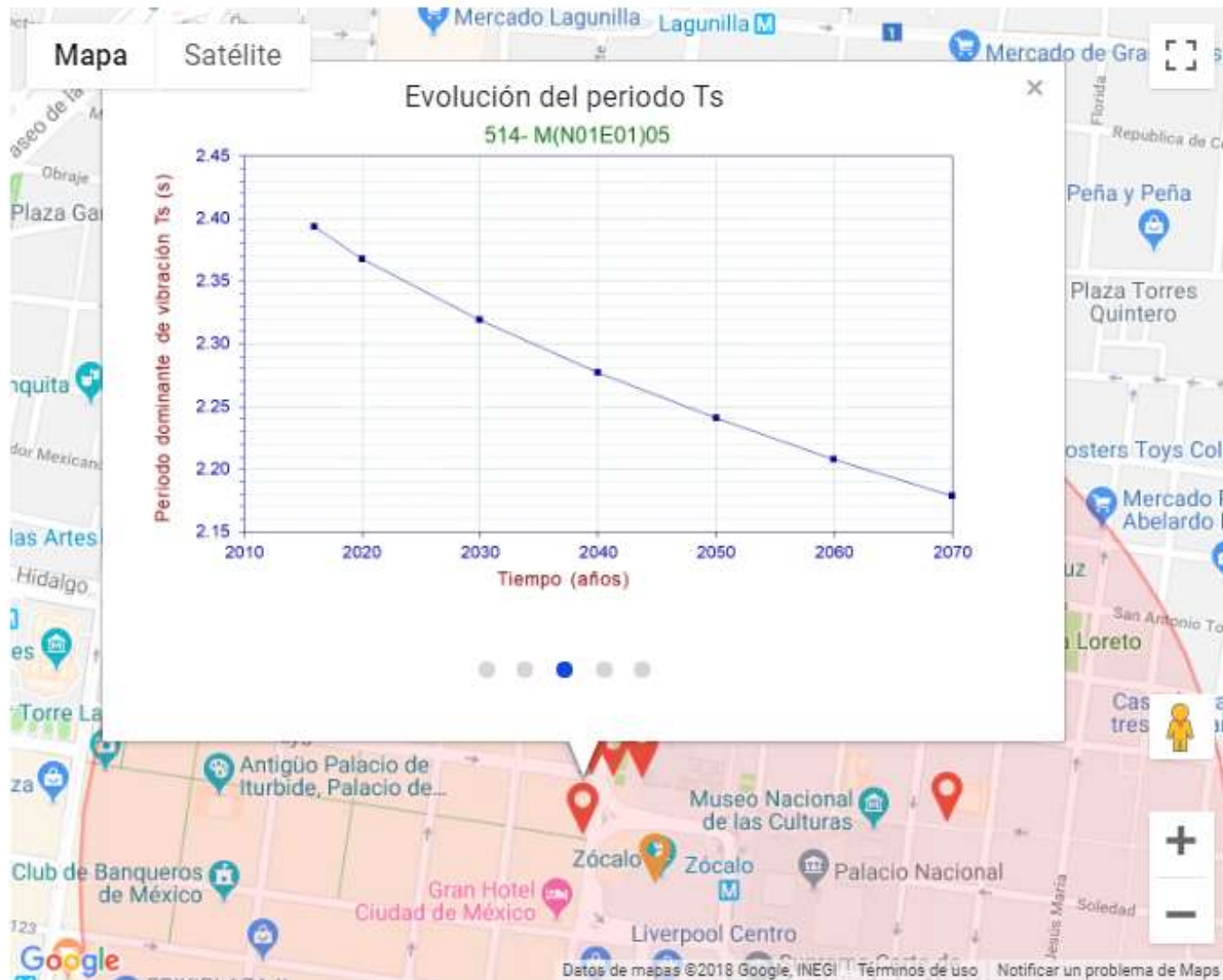


Figura 44. Evolución del periodo dominante de vibración del banco 514-M(N01E01)05

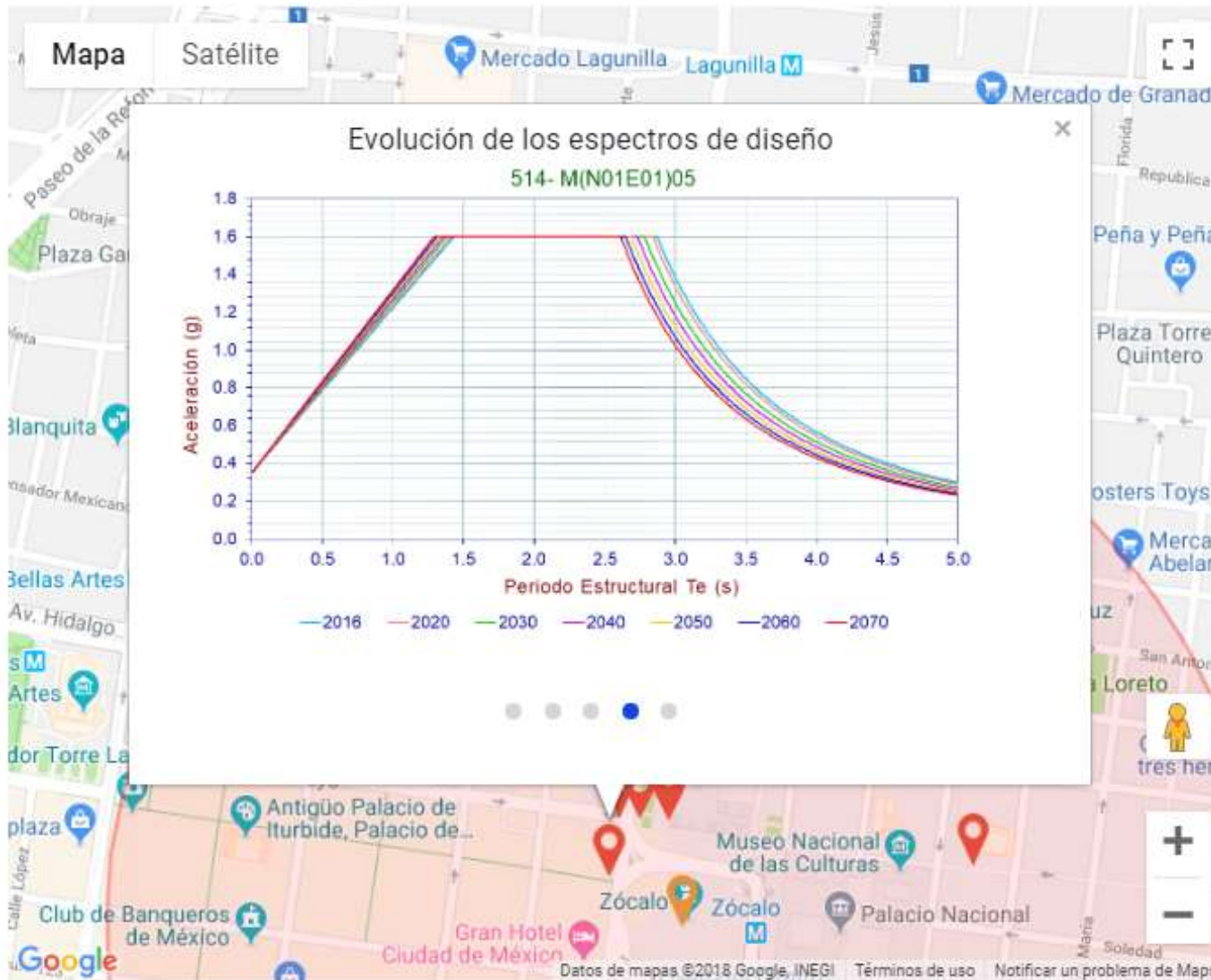


Figura 45. Espectros de diseño evolutivos del banco 514-M(N01E01)05

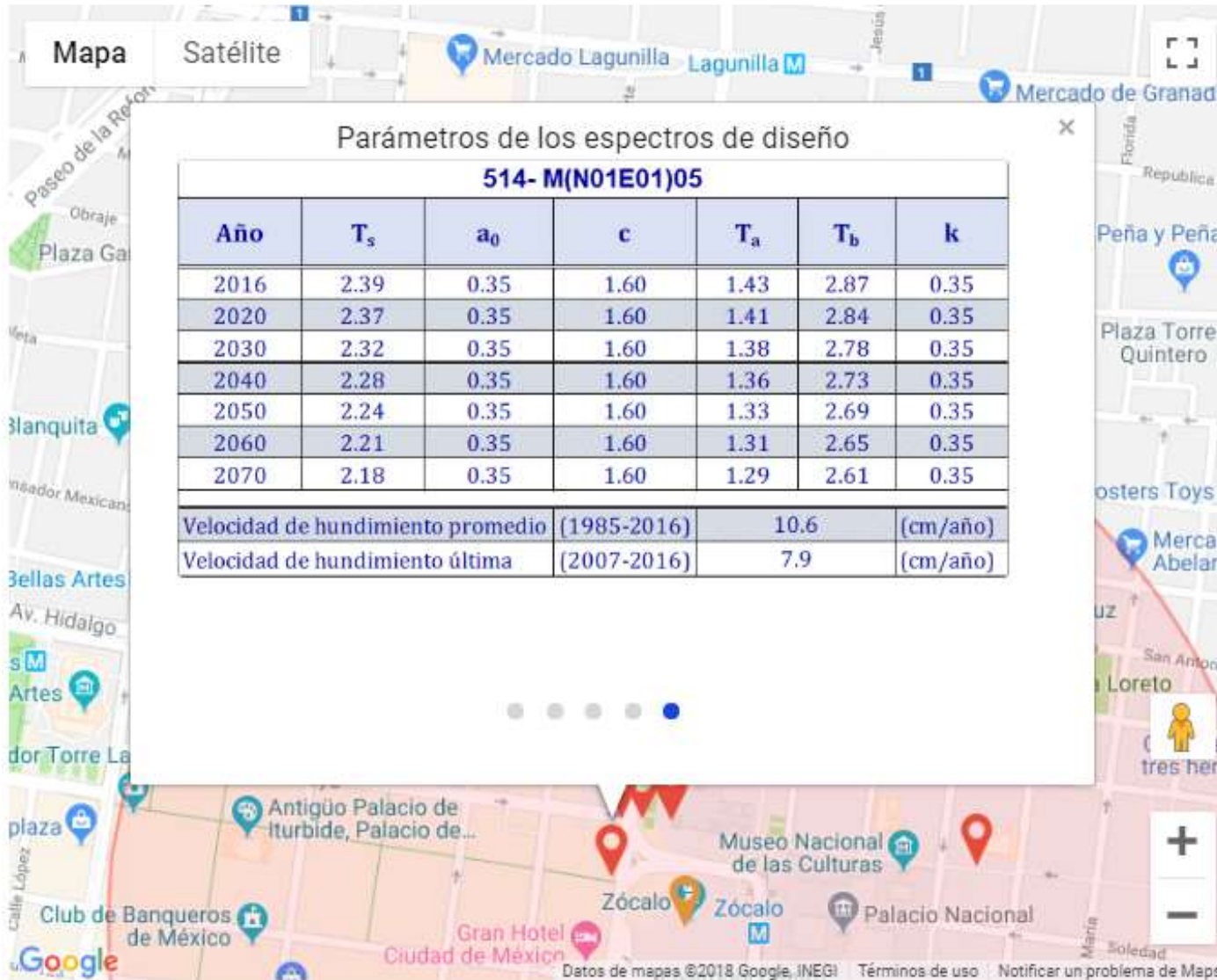


Figura 46. Parámetros de construcción del espectro del banco 514-M(N01E01)05



El Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico es una referencia para consultar datos de nivelación y cambios en los parámetros dinámicos de los suelos de la Ciudad de México, pero no tiene validez oficial para su aplicación en proyectos ejecutivos.



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES

---

A partir de los resultados obtenidos del desarrollo de esta investigación, se desprenden los siguientes aspectos principales y conclusiones:

- Se analizó la información de más de 1700 bancos de nivel superficial distribuidos en la Ciudad de México, seleccionando aquellos localizados en las zonas geotécnicas de lago y transición.
- Con las elevaciones reportadas en los bancos desde el año 1983 y hasta el año 2016/2017, se construyeron curvas de hundimiento que muestran su comportamiento histórico. Con esta información se estableció para cada banco la velocidad de hundimiento promedio y la más reciente velocidad de hundimiento medida.
- Se destaca que cerca del 60% de los bancos de nivel analizados, cuentan con de más de 30 años de monitoreo medido.
- El banco con mayor velocidad de hundimiento promedio detectado se localiza en la zona de Chalco, con 37.5 cm/año.
- Al comportamiento observado se ajustaron familias de funciones que describen el hundimiento medido de cada banco. De ellas, se seleccionaron las dos expresiones que mejor se ajustan al comportamiento medido, estableciendo un intervalo de variación esperado. El promedio de este par de funciones se asumió como el hundimiento medio esperado para cada banco.
- Se observó que, con los datos del monitoreo realizado en el año 2016, las curvas que mejor se ajustan al hundimiento observado en la gran mayoría de los bancos analizados dejan de tener un comportamiento lineal, como había sido considerado en el pasado.



- El comportamiento del hundimiento de la mayoría de los bancos se ajustó a una hipérbola. Los bancos con comportamiento aparentemente lineal se ubicaron en la parte superior de la hipérbola, mientras que los bancos con curvatura más pronunciada se ajustaron mejor a la parte central de la misma.
- Se construyeron curvas de hundimiento esperado desde el último periodo de monitoreo en el año 2016, hasta el 2070.
- Con base en la información existente en las NTC-DS, 2004 y aplicando las técnicas de interpolación espacial de IDW y Kriging, se obtuvieron los espesores compresibles y los periodos dominantes de vibración del suelo para cada banco estudiado. A partir de estas propiedades se calculó para cada sitio la velocidad de propagación de ondas de corte.
- Se ha considerado que los cambios que se producen con el tiempo en el espesor compresible de los suelos de la Ciudad de México son mucho más significativos que el incremento en la velocidad de propagación de ondas de corte. Por ello, para los fines de este trabajo se ha asumido como despreciable el cambio en este último parámetro.
- A partir de la predicción establecida del hundimiento futuro en los bancos analizados y la relación que guarda con la reducción del espesor del depósito, se han construido curvas que muestran el cambio en el periodo dominante de vibración del suelo. Esta prospección se realizó hasta el año 2070.
- De la misma forma como fue planteado en el Apéndice A de las NTC-DS, 2004, se ha considerado que la respuesta sísmica de los suelos de la Ciudad de México es fuertemente dependiente del periodo dominante de vibración del terreno.
- Se han propuesto ecuaciones que permiten construir espectros de diseño a partir del periodo dominante de vibración del suelo. Los espectros de diseño resultantes cumplen con los niveles de aceleración que corresponden a un periodo de retorno  $T_r=250$  años, establecido en la normatividad vigente (NTC-DS, 2017).



- Con base en la reducción del periodo dominante de vibración del suelo en función del tiempo, se han calculado espectros de diseño sísmico evolutivos hasta el año 2070.
- La gran cantidad de resultados obtenidos de esta investigación obligó a concentrarlos en una herramienta denominada “Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico” para la Ciudad de México, que permite el ágil manejo de la información.
- El sistema permite ubicar un sitio de interés en la Ciudad de México, mediante sus coordenadas, y muestra los bancos de nivel cercanos en función de un radio de búsqueda preestablecido.
- Cada banco próximo al sitio de interés contiene la curva de hundimiento medido, la curva de predicción del comportamiento, la curva del cambio en el periodo dominante de vibración del suelo y la evolución de los espectros de diseño hasta el año 2070, además de la velocidad de hundimiento promedio y la velocidad de hundimiento medida en el intervalo de monitoreo más reciente.
- El SEHEDIS -Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico- está disponible para consulta pública en una página Web para quien esté interesado en consultar esta información.



## CAPÍTULO 8

### REFERENCIAS

---

- Auvinet, G, & Juárez, M. (2011). Geotecnical characterization of Mexico City subsoil. XIV Congreso Panamericano de mecanica de suelos e ingenieria geotécnica.
- De Cserna, Z., De la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M. y Mota-Palomino, R., 1987 (1988). Estructura Geología, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México. Bol. 104 del Inst. de Geología, UNAM. México, D.F.
- Carrillo N., (1969). El Hundimiento de la Ciudad de México proyecto Texcoco: Vol. De la SHCP y Fiduciaria: Nacional Financiera, S. A.
- CONAGUA, (2012), Acciones de infraestructura de drenaje y abastecimiento de agua en el Valle de México. Coordinación General de Proyectos Especiales de Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento del Valle de México.
- Damon, E. P., Muhammand Shafigullah y Clark, F. K., (1981). Evolución de los Arcos Magmáticos en México y su Relación con la Matalogénesis: Revista del Inst. Geología. UNAM, Bol. 5 num. 2, p. 223-238.
- De Cserna, Z., De la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M. y Mota-Palomino, R., 1987 (1988). Estructura Geología, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México. Bol. 104 del Inst. de Geología, UNAM. México, D.F.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (2018). ArcMap, Estados Unidos. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es>



- Juárez, C. (2015), Análisis geoestadístico del subsuelo de la zona lacustre del Valle de México. Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, México.
- Lugo, Hubp, J., (1984). Geomorfología del sur de la Cuenca de México: Serie Varia T. 1. Núm. 8 Inst. de Geografía.
- Maune D.F. (2001), Digital elevation model technologies and applications: the dem user's manual, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland, United States of America.
- Marsal R y Mazari M (1990). Desarrollo de la Mecánica de Suelos en la Ciudad de México. El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a Cinco años del sismo, Memorias. México, D.F.
- Murillo, 1990, "Sobre explotación del acuífero de la Cuenca del Valle de México: Efectos y alternativas", El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su Relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco Años del sismo, SMMS.
- NTC-DCC (2004). Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal del 6 de octubre de 2004. "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones".
- NTC-DCC (2017). Gaceta Oficial de la Ciudad de México del 15 de diciembre de 2017. "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones".
- NTC-DS (2004). Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal del 6 de octubre de 2004. "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo".
- NTC-DS (2017). Gaceta Oficial de la Ciudad de México del 15 de diciembre de 2017. "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo".
- RCDF (2004). Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal del 4 de julio de 2004. "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal".



- RCDF (2016). Gaceta Oficial del Departamento de la Ciudad de México del 17 de junio de 2016. "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal".
- SACMEX (2017). Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Gobierno del Distrito Federal. Secretaría de Obras y Servicios. "Nivelación de bancos superficiales".
- Santoyo E (2010). Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. Exploración de Suelos. "Vigésima Conferencia Nabor Carrillo".
- Vázquez S.E., Jaimes P. R. (1989), "Geología de la Cuenca de México", El Sistema Acuífero de la Cuenca de México, Inst. de Geofísica, UNAM, D. F., México.