

3. Medición de microtemores, procesado y análisis

Los periodos dominantes pueden ser fácilmente identificados mediante funciones empíricas de transferencia, a partir de mediciones de microtemores obtenidas en los sitios donde la relación de la onda de velocidad cortante es lo suficientemente grande. Como se describió en el capítulo 1.5.1, el periodo dominante está relacionado con las condiciones del suelo a través de la siguiente relación elástica:

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde T_0 es el periodo dominante, H es el espesor del estrato compresible, V_s es la velocidad de onda de corte.

En el contexto de grandes masas de suelos compresibles atravesando un proceso de consolidación, como en la Ciudad de México, la distribución espacial de los periodos dominantes puede ser usada como un parámetro indicativo para la localización de zonas con posible agrietamiento. Como se ha mencionado con anterioridad, las grietas aparecen en lugares sustentados sobre materiales exlacustres como arcillas de alta compresibilidad, que cambian de espesor abruptamente en distancias cortas, como en las zonas de transición, o en presencia de estructuras geológicas enterradas. Bajo estas circunstancias, los cambios en los periodos dominantes se deben principalmente por los cambios de espesor de los suelos arcillosos (H), mientras que los cambios en la velocidad promedio de onda de corte son inversamente proporcionales a los periodos dominantes. Por otra parte, también se ha encontrado que la variación de la media de velocidad de ondas sísmicas de los materiales arcillosos en las zonas de transición también se ve influenciada por el efecto del endurecimiento del material, provocado por el proceso de consolidación regional inducida por la explotación de los acuíferos.

En consecuencia, conocer la distribución espacial de los periodos dominantes en una determinada región ayuda a identificar las zonas posibles a presentar agrietamiento mediante el reconocimiento y la caracterización de los patrones con los que cambian los periodos dominantes.

El procedimiento con el que se procesaron los registros de microtemores, método de Nakamura, se basa en obtener tres componentes de un registro de vibración ambiental, longitudinal, trasversal y vertical (figura 3.1). Se generan cocientes de los espectros de Fourier de las componentes horizontales (longitudinal y trasversal) entre el espectro de la componente vertical (Lermo et al., 1993, 1994). Se promedian distintos cocientes espectrales de un mismo punto de medición. El periodo dominante se obtiene al aplicar el inverso de la frecuencia dominante; es decir la que tiene la mayor frecuencia en el rango de interés (figura 3.2).

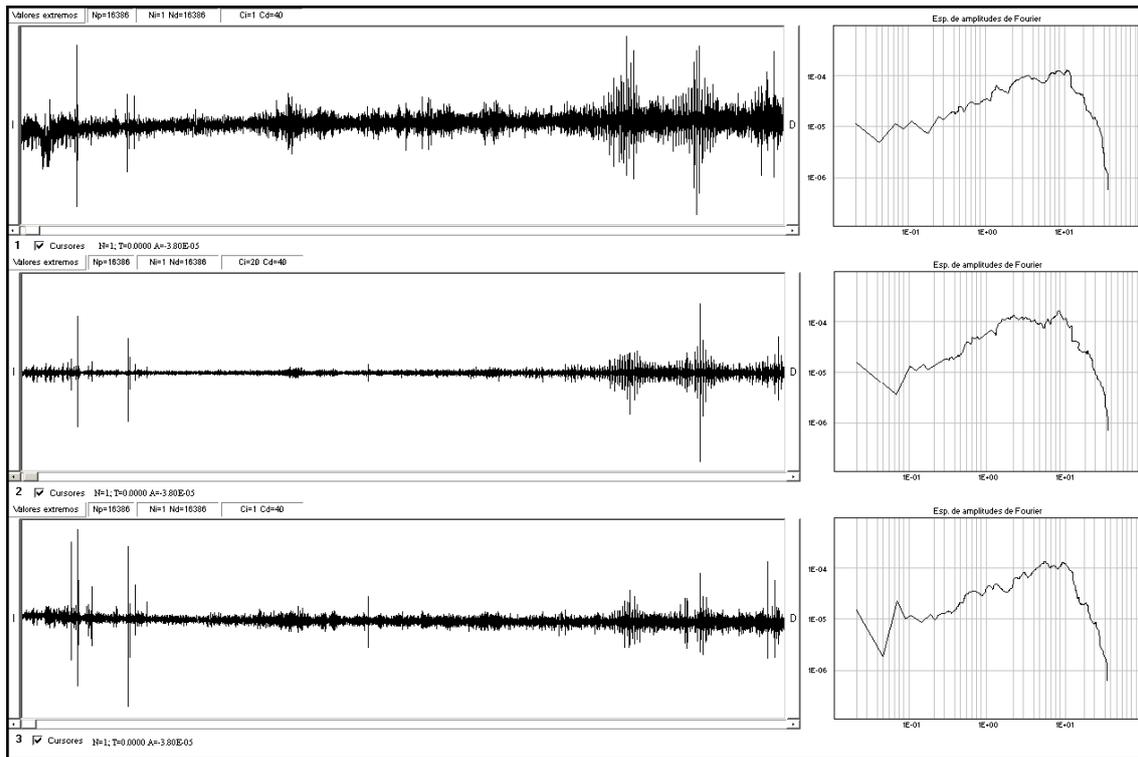


Figura 3.1 Procesamiento con el programa DEGTRA. Componentes horizontales (ventana 1 y 3), componente vertical (ventana 2). Acelerogramas (parte izquierda) y sus espectros de Fourier.

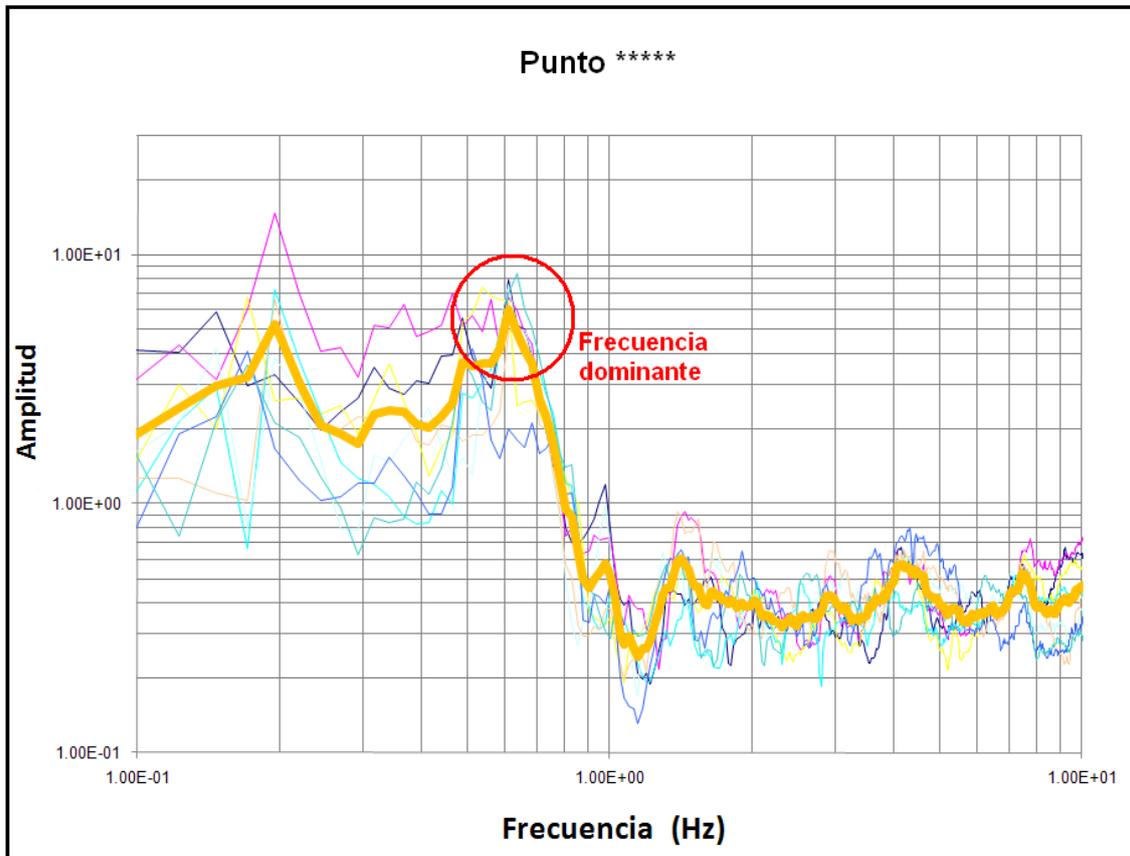


Figura 3.2 Promedio de cocientes espectrales (línea anaranjada). Frecuencia dominante.

3.1 Resultados colonia Lomas de San Lorenzo

Se realizaron dos campañas de mediciones de microtremores en la colonia Lomas de San Lorenzo, la primera en agosto del 2009 (47 mediciones) y la segunda en octubre (76 puntos). Las mediciones se tomaron a ambos lados de la grieta principal, tratando de encontrar los cambios bruscos por los que se genera el agrietamiento en dicha zona, a lo largo de una distancia aproximada de 1 kilómetro. Otros puntos fueron tomados en los puntos donde se han realizado sondeos geotécnicos, para poder calibrar el modelo propuesto en la presente tesis.

Los periodos dominantes se obtuvieron de las medidas de microtremores, haciendo uso de la técnica de Nakamura. La figura 3.3 resume dichos resultados, con los que se generó un mapa de isoperiodos, a partir de funciones de transferencia, S_M (ec. 1.5) aplicadas a cada punto. Es evidente (ver figura 3.3) que los cambios los cambios en los periodos dominantes más bruscos, se encuentran cerca de la grieta principal. La zona de San Lorenzo presenta periodos que van desde 0.10 (s), parte alta del derrame, hasta periodos de 2.50 (s), zona de depósitos exlacustres.

Se generaron 3 perfiles diferentes AA', BB' y CC', los cuales tienen los valores de los periodos dominantes en el eje de las ordenadas y en las abscisas la distancia, para poder apreciar el cambio brusco que se tiene en el límite del derrame y la zona de materiales blandos. Los perfiles BB' y CC' cuentan con los sondeos geotécnicos de la zona. (Ver figura 3.4, 3.5, 3.6)

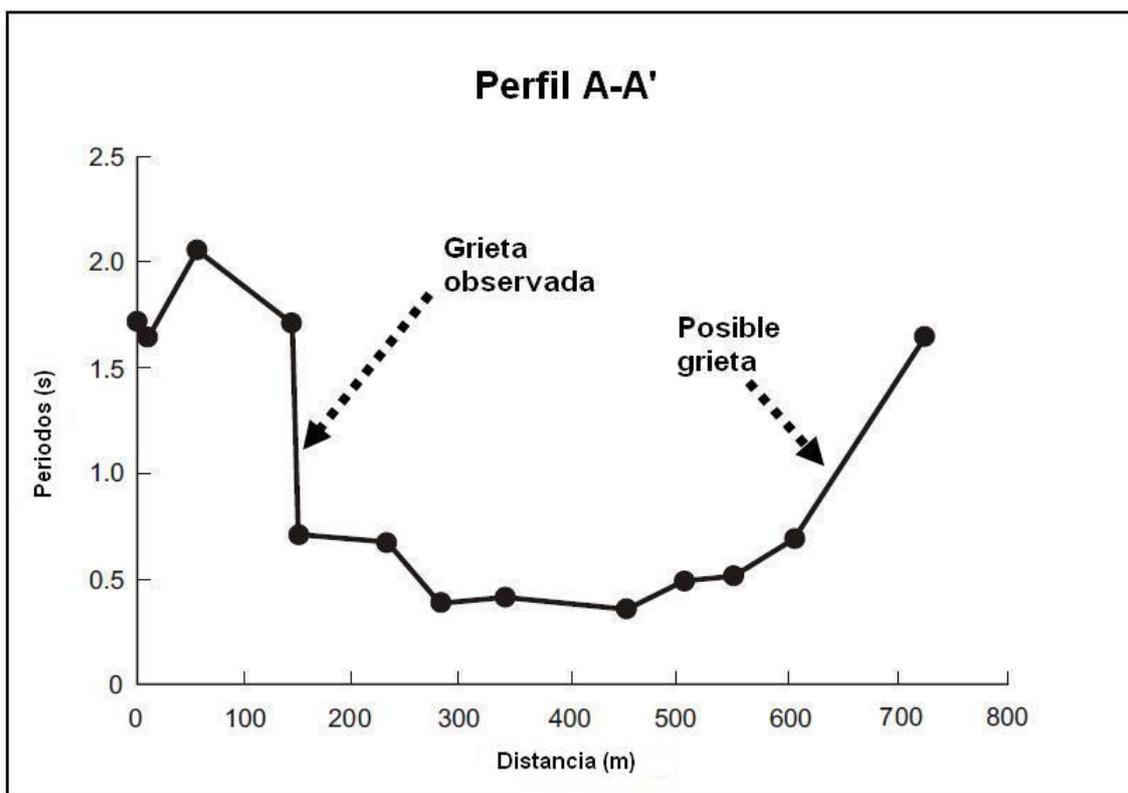


Figura 3.4 Distribución de periodos a lo largo del perfil A-A'.

La figura 3.4 muestra la variación espacial del periodo dominante del perfil denominado AA'. Entre los 0 y 150 metros el perfil se mantiene en valores propios de materiales exlacustres o blandos. Claramente el perfil tiene un cambio brusco entre 150 a 160 metros, cambiando su periodo de 1.5 a 0.5 segundos. De 160 a 620 metros el periodo dominante mantiene un valor aproximadamente constante (0.5) lo que muestra que en ese rango nos encontramos con la presencia de material rocoso cercano a la superficie. El punto en el que se da un cambio abrupto de gradientes, coincide bastante bien con la ubicación de la grieta.

Los perfiles geotécnicos de pruebas de campo coinciden con los perfiles de periodo dominante, como se indica en la parte inferior de la figura 3.5 y la figura 3.6, al comparar los perfiles de espesor de suelo y los periodos de los estratos, se observa claramente la proporción que se guarda en cada uno de los puntos.

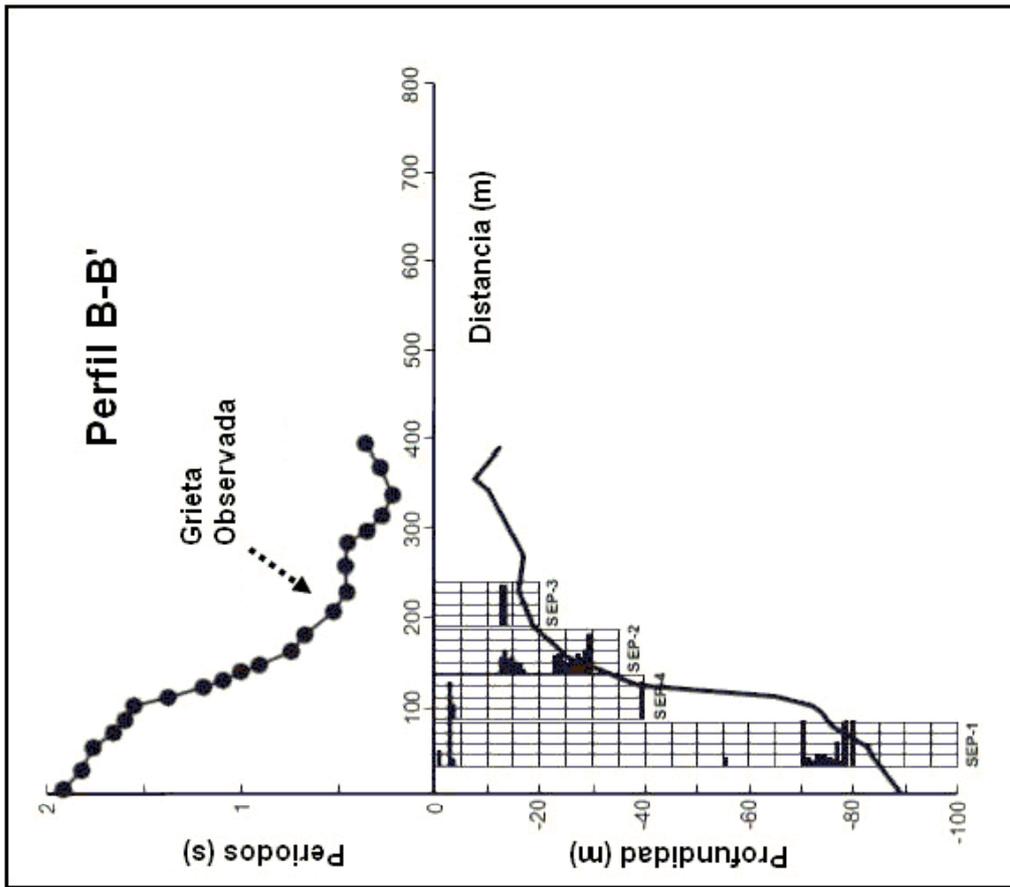


Figura 3.5 Perfil B-B'. Comparativo de sondeos geotécnicos y periodos.

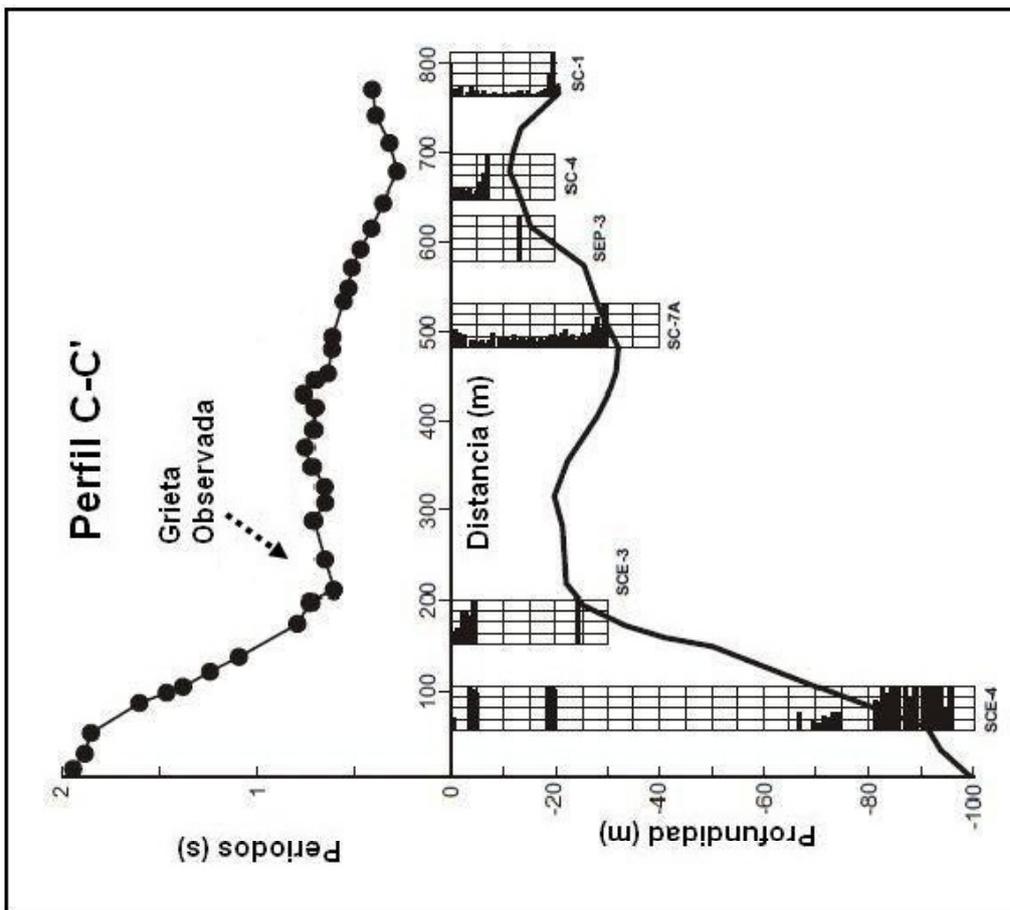


Figura 3.6 Perfil C-C'. Comparativo de sondeos geotécnicos y periodos.

La parte superior de la figura 3.5 y figura 3.6 muestran los periodos dominantes a lo largo ejes perpendiculares a la grieta principal. Nuevamente, los cambios repentinos de pendiente en los perfiles mencionados, coinciden con la localización de las grietas existentes; ocurriendo en un periodo de 1.5 segundos.

La comparación de los perfiles anteriores, corrobora que el periodo dominante depende más del espesor de capa que de la velocidad de onda de corte. De hecho, si ocurre un cambio de espesor abrupto, los valores de la velocidad de onda de corte de las arcillas lacustres no muestran un gran cambio en la vecindad de grietas presentes en la zona de estudio. Caso contrario de los valores de periodo dominante los cuales tienen cambios abruptos al cruzar el agrietamiento. Distintos valores de velocidad de onda de corte fueron estimados a partir de la información de las pruebas de penetración de cono (CPT *Cone Penetration Test*) realizadas por TGC Geotecnia en el 2007. De la figura 3.3 se tomaron los sondeos geotécnicos (CPT); las velocidades de onda de corte para arcillas blandas, se estimaron con la expresión:

$$V_s = \eta \sqrt{\frac{q_c}{N_{kh}\gamma_{ref}}} \dots\dots\dots (3.2)$$

En donde V_s es la velocidad de onda de corte en m/s; η es una constante que depende del tipo de suelo que para este caso es de 23; q_c es la resistencia a la penetración medida en una prueba de penetración de cono; N_{kh} es un coeficiente de correlación igual a 9.5 y γ_{ref} es el peso volumétrico del suelo. La discusión de los valores de las constantes en la ecuación 3.2 se ha presentado en otros trabajos (Ovando y Romo, 1992).

Las velocidades de onda de corte promedio (\bar{V}_s) mostradas en la tabla 3.1 fueron obtenidas utilizando la siguiente expresión:

$$\bar{V}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Donde:

\bar{V}_s : es la velocidad de onda de corte promedio.

H : es el espesor total del estrato compresible.

h_i : es el espesor de cada uno de los estratos.

V_i : es la velocidad de cada uno de los estratos.

La tabla 3.1 muestra las velocidades de onda de corte promedio calculadas con las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, haciendo uso de los resultados de las pruebas de penetración de cono, en el perfil B-B' (figura 3.5).

Sondeo	Espesor del suelo (m)	Vs promedio (m/s)
SEP-1	70.00	89.00
SEP-2	30.00	130.00
SEP-3	14.00	147.00
SEP-4	38.00	89.00

Tabla 3.1 Espesor del suelo y sus velocidades de onda de corte a lo largo del perfil B-B' de la figura 3.5.

Como se observa en la tabla, la velocidad de onda de corte promedio sobre la grieta o cerca de ella (SEP-4) es casi la misma que la zona que tiene un espesor de suelo arcilloso más profundo (SEP-1). En el extremo sur las arcillas son más delgadas y duras (SEP-1) y (SEP-2). Así mismo estas arcillas se intercalan con lentes arenosos relativamente duros, limos y arenas limosas. Por lo tanto, las ondas de corte son considerablemente más altas.

3.2 Detalle en la delegación Iztapalapa

En base a los resultados de las mediciones de microtemores en la colonia Lomas de San Lorenzo, se procedió recabar las grietas que han aparecido en toda la delegación Iztapalapa, de Auvinet (57 grietas) y Carreón (158), su distribución espacial se muestra en la figura 3.7. Una vez validado el método propuesto en esta tesis, se diseñaron 2 nuevas campañas de mediciones, tratando de abarcar la mayor parte de los puntos que han sido señalados por autoridades delegacionales, como zonas de riesgo en la delegación Iztapalapa. Algunas de las colonias más afectadas han sido: Ermita Zaragoza, Ejército de Oriente, zona ISSSTE y zona Peñón del Marqués (ver figura 3.8), Concordia Zaragoza, Santa Martha Acatitla, San Lorenzo Xicoténcatl, Santa María Aztahuacán, Agrícola Oriental, Jacarandas, Cananea, Francisco Villa y Los Ángeles. La campaña de mediciones de microtemores iniciaron en octubre del 2010 (179 puntos) y finalizaron en diciembre del mismo año (53 puntos).

La distribución espacial de los puntos se muestra en la figura 3.9, añadiendo los puntos en la colonia Lomas de San Lorenzo y registros realizados con anterioridad (Lermo, 1998), sumando en total 424 puntos.

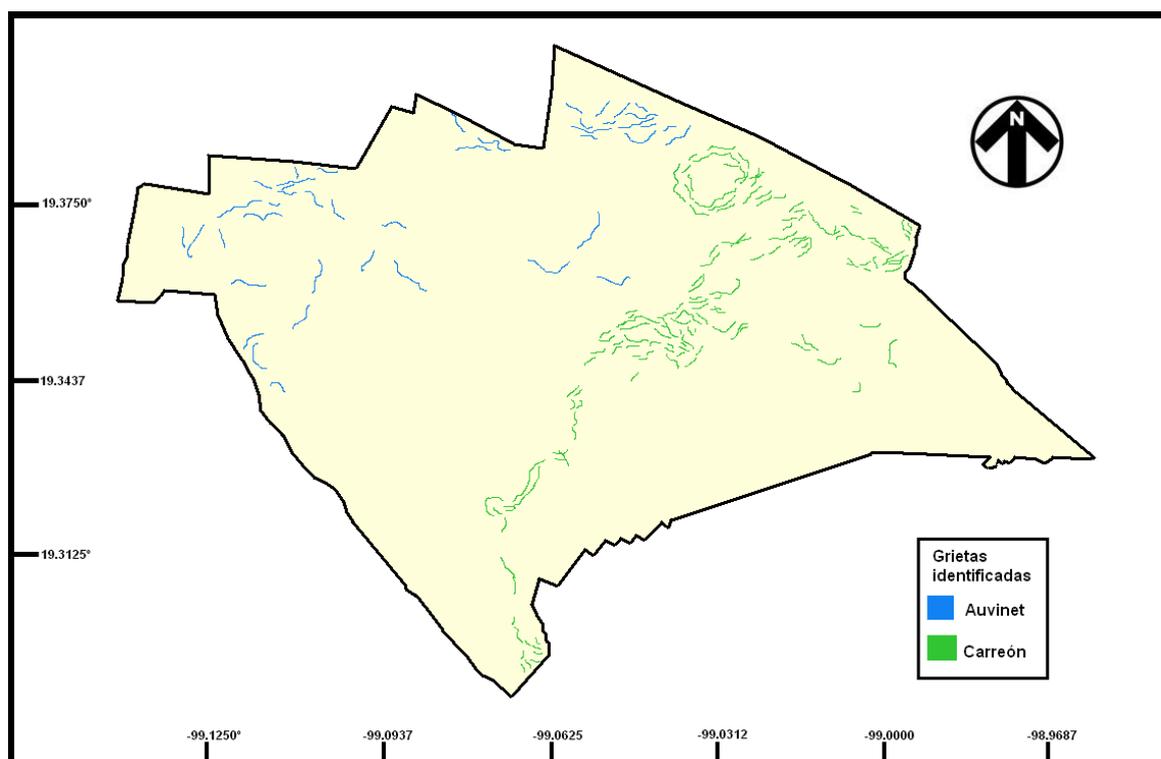


Figura 3.7 Grietas localizadas, Auvinet (2009) 57 grietas aproximadamente, Carreón (2009) 158 grietas aproximadamente.



Figura 3.8 Zona Norte Peñón del Marqués. Superior izquierda: medición con acelerógrafo en las grietas presentes, sobre Av. Zaragoza. Superior derecha e inferior izquierda: daños en la carpeta asfáltica. Inferior derecha: tamaño del desnivel presente a simple vista.

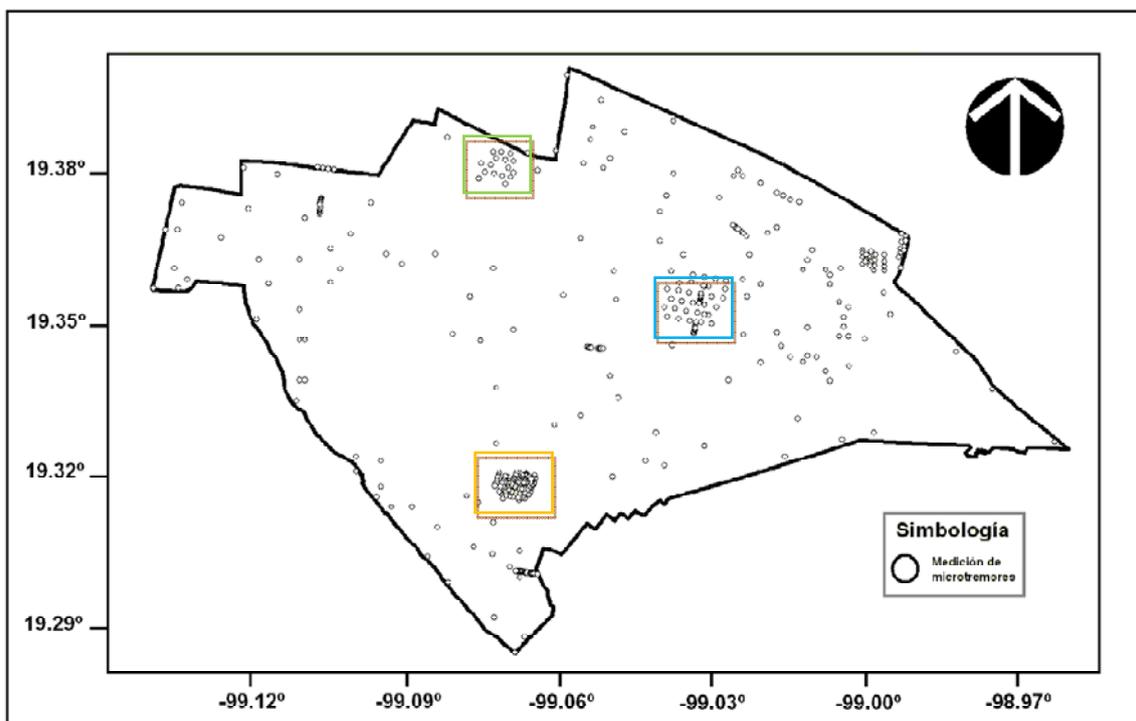


Figura 3.9 Distribución espacial de los puntos de medición de microtremores en la delegación Iztapalapa (424 puntos). Lomas de San Lorenzo (cuadro anaranjado), Agrícola Oriental (cuadro Verde), Aztahuacán (cuadro azul)

Los periodos dominantes obtenidos, aplicando los mismos criterios de los resultados en Lomas de San Lorenzo, muestran que las grietas aparecen en zonas en las inmediaciones de cambios fuertes de periodo. Los valores de los periodos dominantes a lo largo de la delegación se encuentran en la figura 3.10, la cual también muestra la topografía de la región.

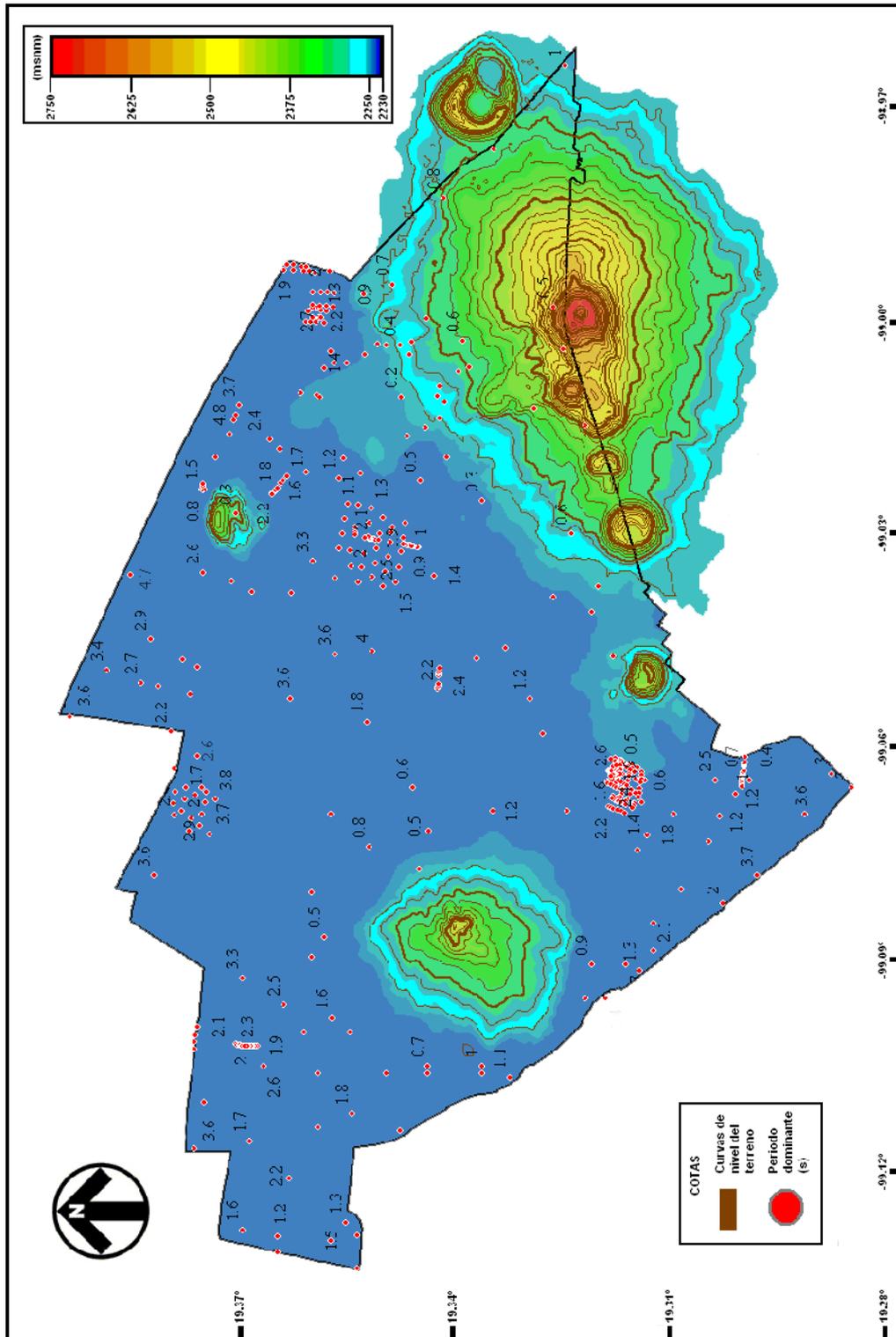


Figura 3.10 Valores de periodo dominante de los puntos de medición (424 puntos) y topografía de la región.

Con la información resultante se generaron dos mapas de isoperiodos en la colonia Agrícola Oriental (ver figura 3.11) y en la colonia Santa María Aztahuacán (ver figura 3.12), los cuales muestran la distribución espacial de las grietas existentes así como distintos perfiles que las cruzan perpendiculares, abarcando los lugares con cambios considerables de periodo dominante. Haciendo uso de la ecuación 3.1 se calculó el espesor del suelo compresible (H) teniendo como datos el periodo dominante, y con un valor promedio de velocidad de onda de corte de 80-100 (m/s).

3.2.1 Colonia Agrícola Oriental

La figura 3.13 muestra el perfil DD' el cual cruza una grieta que surgió en verano del 2008 en la colonia Agrícola Oriental, la grieta tiene un ancho de 1.5 (m) y se extiende a lo largo de 1.5 (km). La parte superior muestra el perfil de los resultados de las mediciones, empezando en un periodo de 3.5 (s) alcanzando valores de 2.0 (s) manteniendo una pendiente negativa a lo largo de 300 (m) y teniendo un repunte para llegar nuevamente a un periodo 3.5 (s). Este cambio brusco se presenta a lo largo de una longitud de 50 (m) muy cerca de la grieta presente. En la parte inferior de la figura se muestra la configuración del lecho rocoso calculado, teniendo un cambio evidente, similar a la trama de periodo dominante. En la figura 3.14 se tiene el perfil EE' de periodos dominantes y su configuración del lecho rocoso, mostrando que las grietas originadas en esa zona, tienen una vecindad de 100 (m) respecto al punto de quiebre. Las 2 configuraciones anteriores difieren de los perfiles hechos en Lomas de San Lorenzo, en donde las grietas se generan sobre periodos de 1.5 (s), mientras que en la Agrícola Oriental han aparecido en periodos de 2.5 (s) aproximadamente.

3.2.2 Colonia Santa María Aztahuacán

En la colonia Santa María Aztahuacán se tiene una grieta principal la cual se extiende a lo largo de 1.7 (km) con una profundidad de 1 a 2 (m) y sus diferentes ramificaciones. Los desniveles sobre el asfalto llegan a una altura de casi un metro. La figura 3.15 muestra las tramas de periodos dominantes y de la configuración del lecho rocoso del perfil FF', mostrando un comportamiento estable a lo largo de 500 (m), permaneciendo horizontales, pero una vez que hay un cambio de pendiente abrupto se genera el agrietamiento aproximadamente a 100 (m) de distancia de dicho cambio, en un periodo de 1.5 (s).

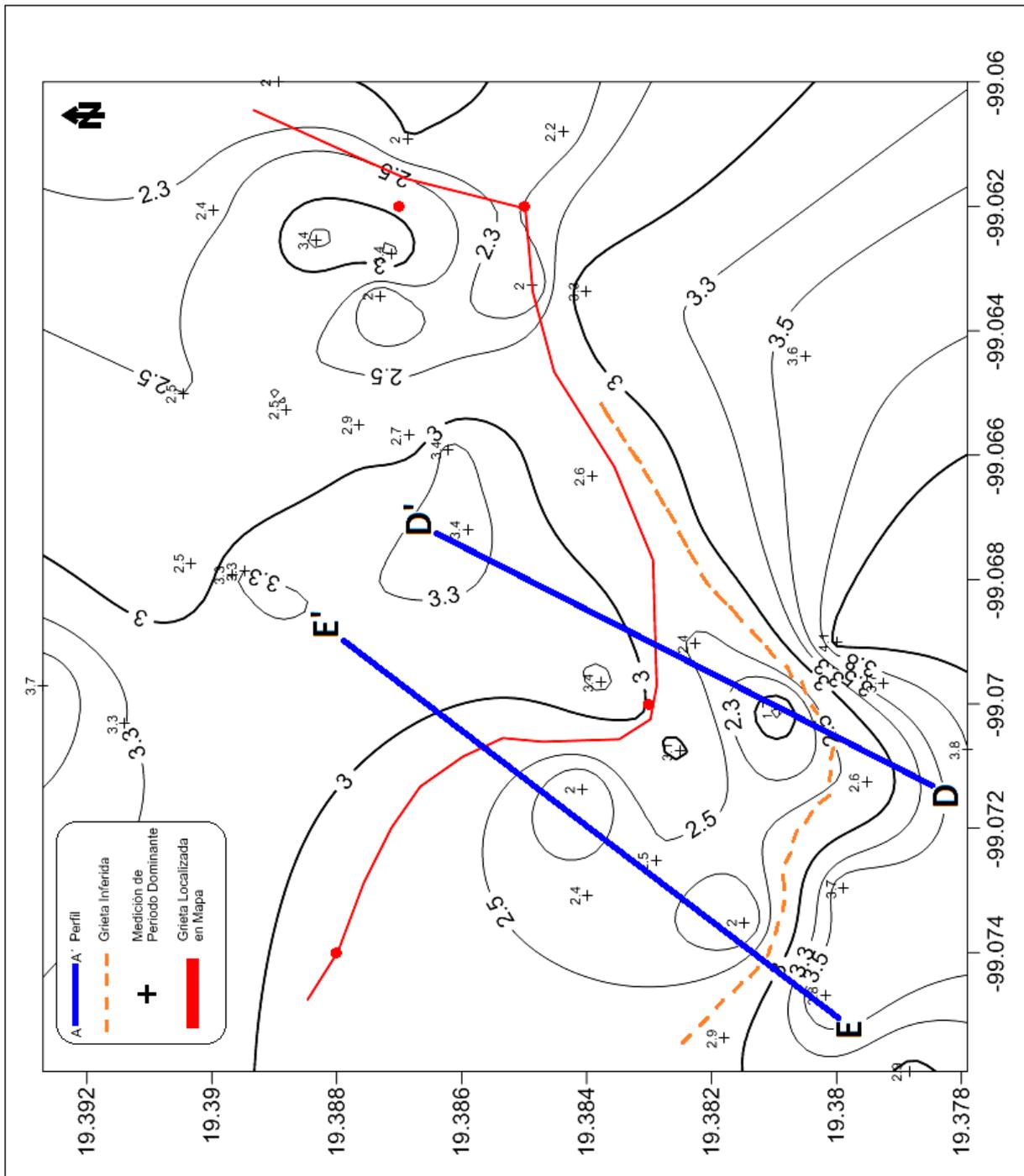


Figura 3.11 Mapa de isoperiodos en la colonia Agrícola Oriental, con grietas existentes e inferidas. Perfiles EE' y DD'.

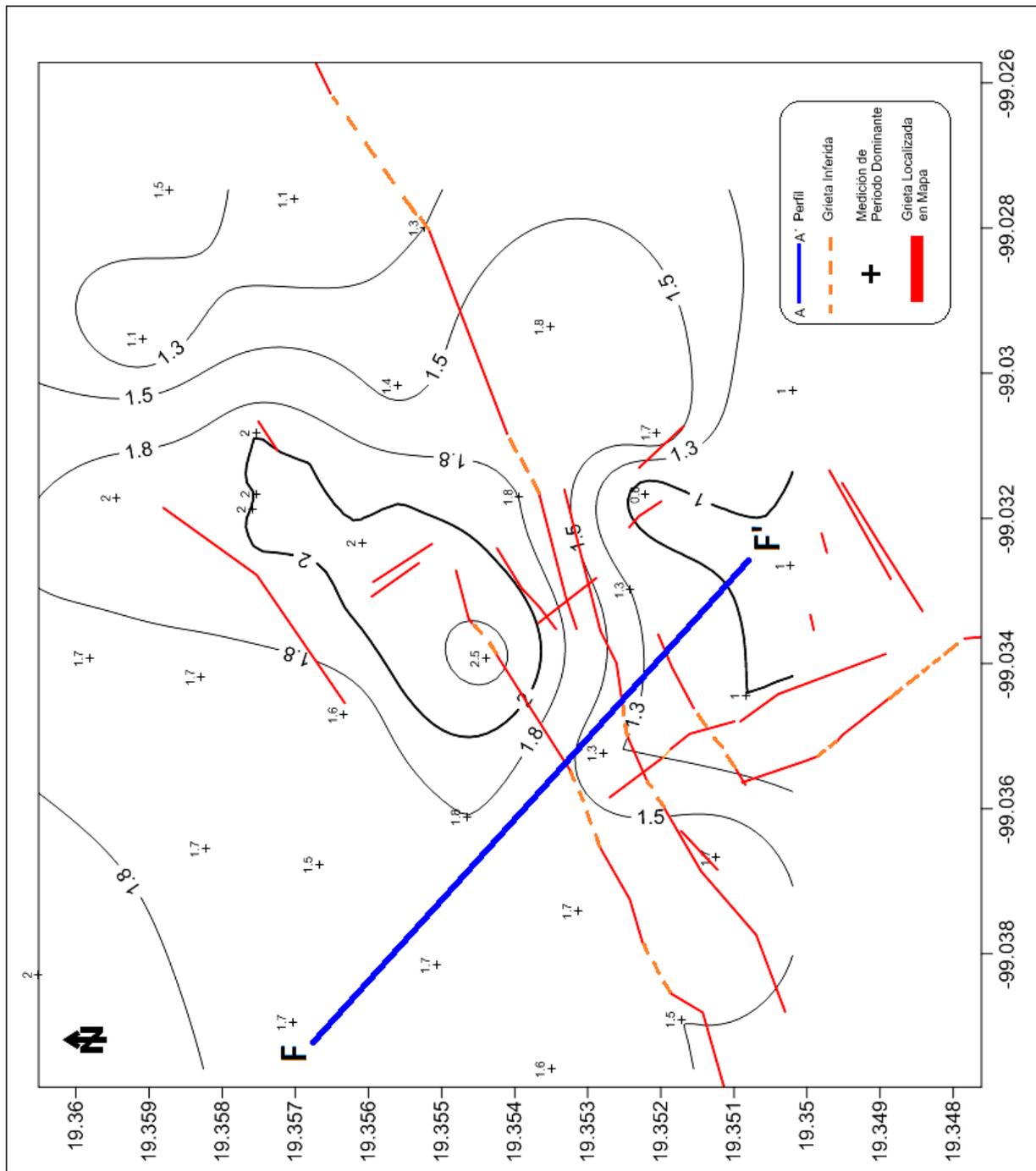


Figura 3.12 Mapa de isoperiodos en la colonia Santa María Aztahuacán, con grietas existentes e inferidas. Perfiles FF'.

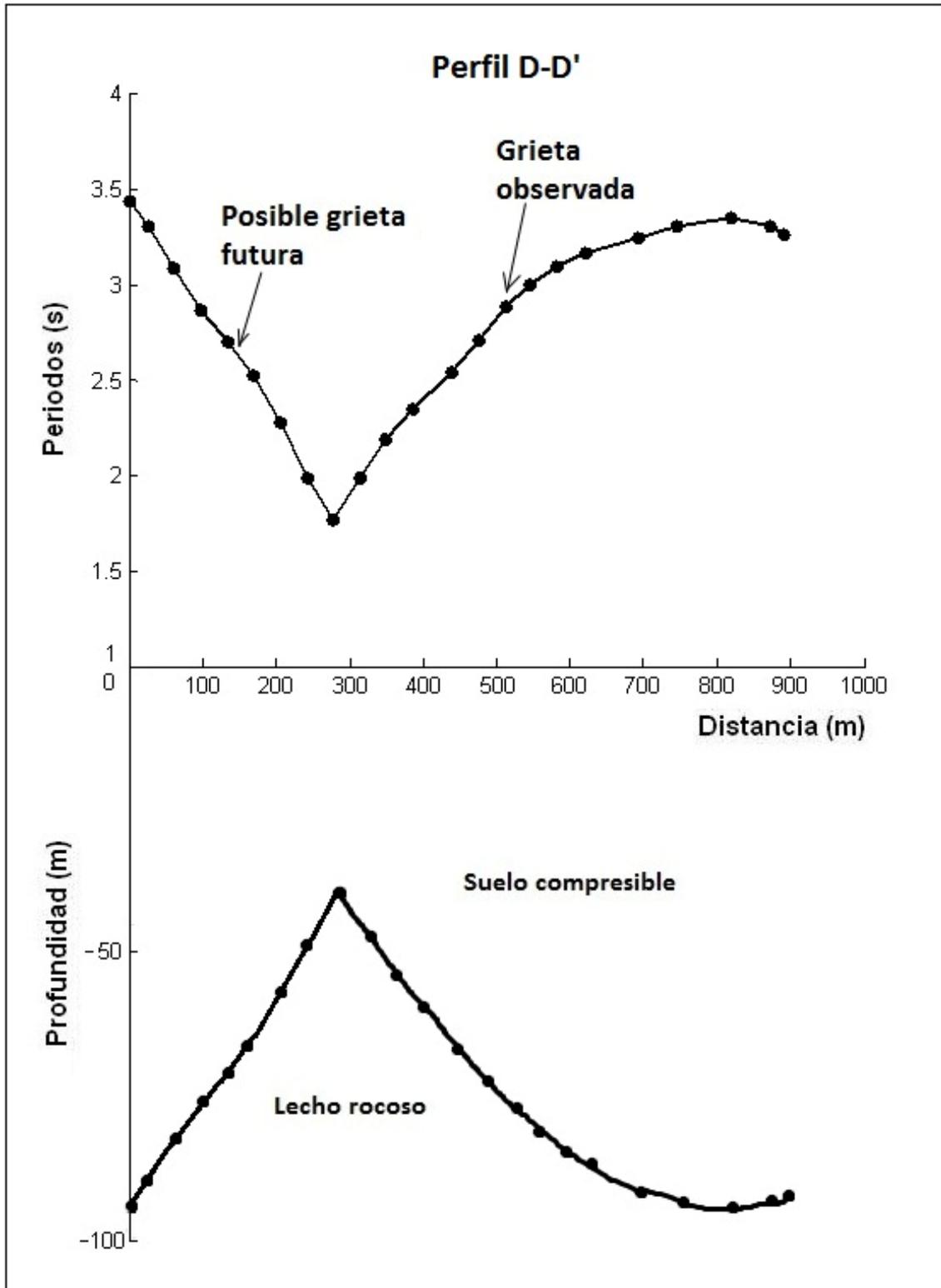


Figura 3.13 Perfil D-D'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso.

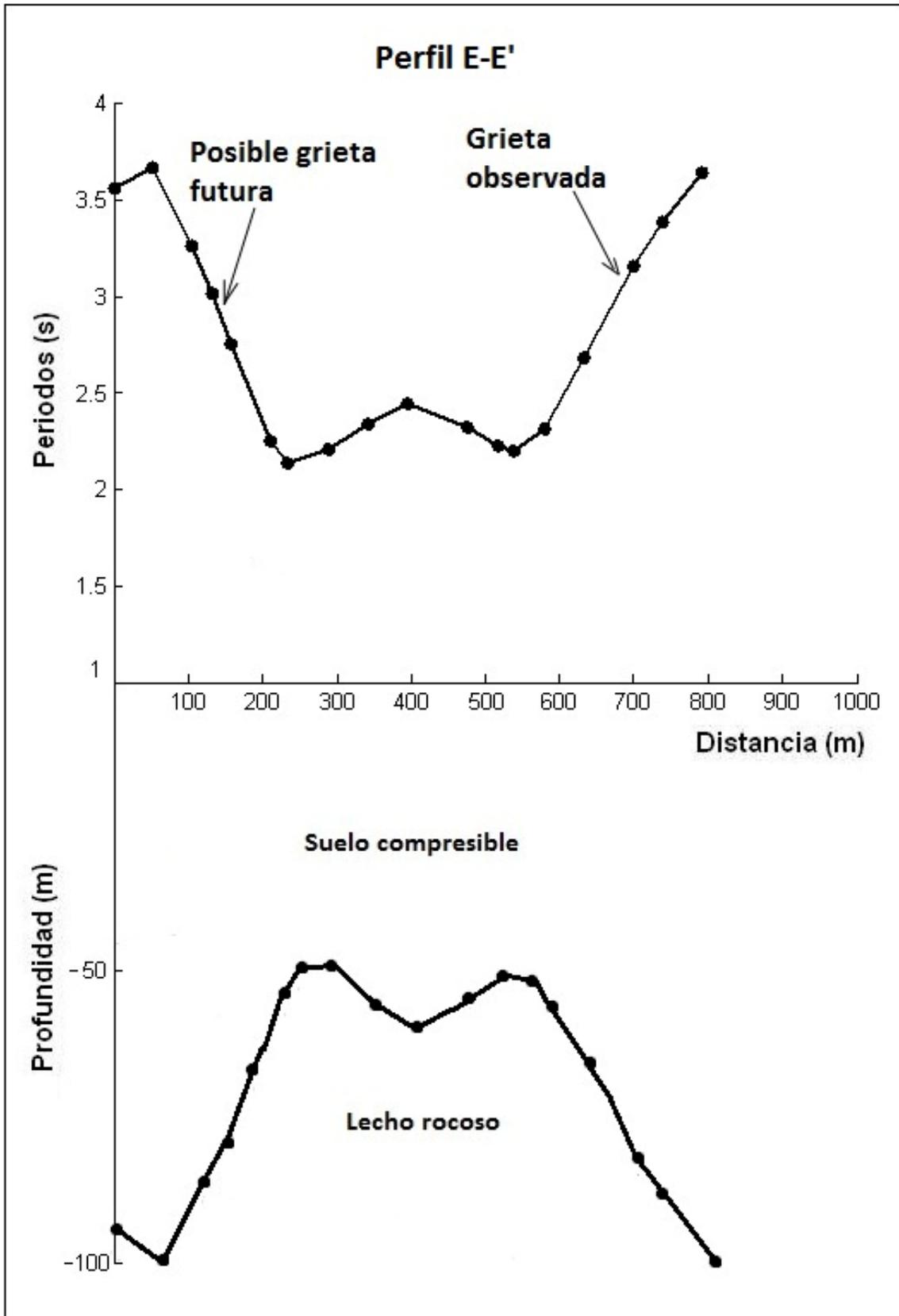


Figura 3.14 Perfil E-E'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso.

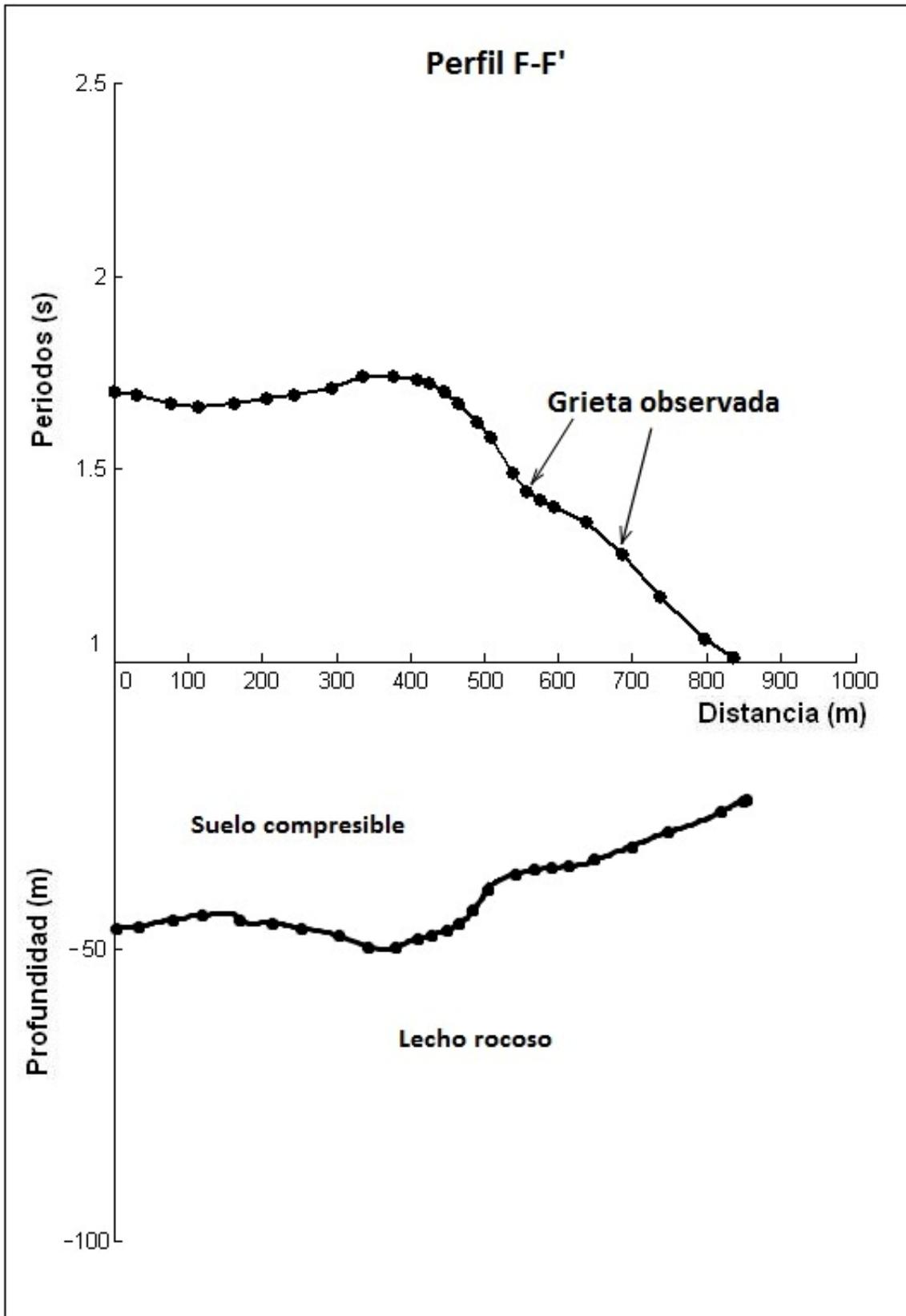


Figura 3.15 Perfil F-F'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso.

3.2.3 Análisis de los periodos dominantes de la delegación Iztapalapa

Actualmente el fenómeno de agrietamiento del suelo es un problema que no está totalmente claro, por lo que una vez que se comprobó que las grietas presentes en la delegación Iztapalapa se encuentran en la cercanía de zonas de transición, cambiando abruptamente su periodo dominante, se generó un mapa temático de los periodos y de las grietas existente, haciendo uso de los 424 puntos de periodo dominante (los valores su localización se encuentran el *Anexo B* y algunas gráficas de los cocientes espectrales, frecuencias dominantes, en el *Anexo C*). Este mapa tiene como finalidad dar una posible descripción del origen del agrietamiento en Iztapalapa, así como zonas susceptibles a presentarlo, basándose en los perfiles descritos anteriormente y observando el patrón de ocurrencia (ver figura 3.15).

El análisis de los periodos muestra que las grietas han aparecido, sustancialmente, en zonas en las que hay dos cambios importantes de periodo, el primero cuando se tiene una transición abrupta de 1 a 2 segundos en una longitud de 200 metros, presentes al centro, este, sureste y noreste de la delegación, representando suelos compresibles no tan profundos que se encuentran entre 4 y 60 metros de profundidad. Y el segundo cambio entre 2 y 4 segundos en una longitud aproximada de 250 metros perpendicular a las curvas de isoperiodos, en la parte centro y norte de Iztapalapa, significando la presencia de suelos compresibles más profundos de 40 a 100 metros o más de profundidad.

Colonias que presentan cambios de periodos de 1 a 2 segundos en 200 metros:

- Barrio de San Pablo
- Barrio de San Lucas
- El Santuario
- Ejército de Oriente
- Zona ISSSTE
- Santa Martha Acatitla Sur
- Lomas de San Lorenzo Xicoténcatl
- Santa Cruz Meyehualco
- Jacarandas Cananea

Colonias que presentan cambios de periodos de 2 a 4 segundos en 250 metros:

- Santa María Aztahuacán
- Central de Abasto
- Santa Martha Acatitla Norte
- Chinampac Juárez
- Vicente Guerrero
- San José Aculco

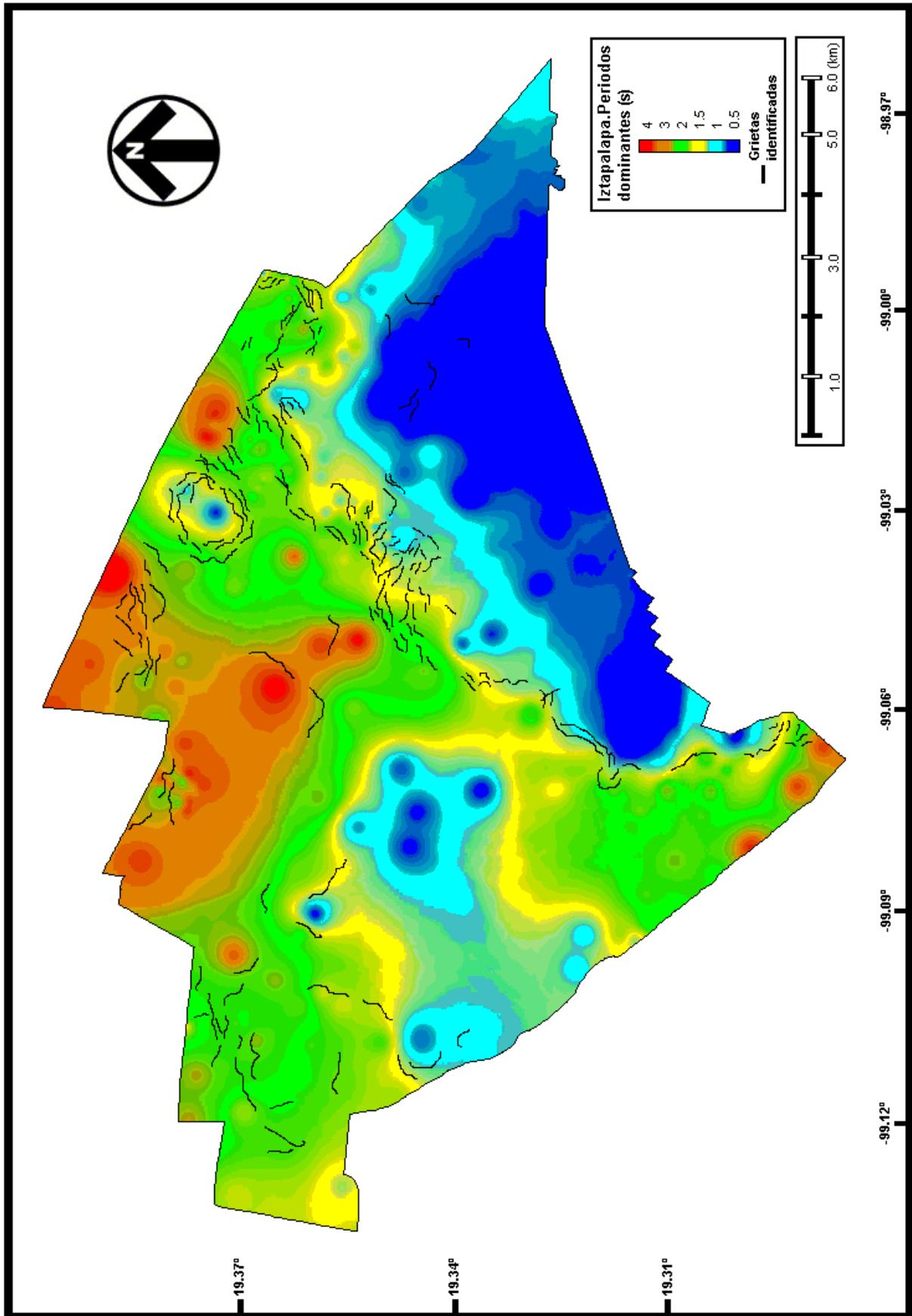


Figura 3.15 Mapa temático de isoperiodos de la delegación Iztapalapa.