



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

**“VARIACIÓN EN EL TIEMPO DEL PERIODO DOMINANTE DEL SUELO
Y LAS AMPLIFICACIONES DINÁMICAS DEL TERRENO EN LA CIUDAD
DE MÉXICO”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A:

ANDRÉS FELIPE HERNÁNDEZ ESTRADA

TUTOR:

**Dr. MARIO GUSTAVO ORDAZ SCHROEDER
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

COMITÉ TUTOR:

**Dr. ROBERTO MELI PIRALLA
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**Dr. EDUARDO REINOSO ANGULO
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**Maestro JAVIER FRANCISCO LERMO SAMANIEGO
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**Dr. DANNY ARROYO ESPINOZA,
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MEXICO, AZCAPOTZALCO**

MÉXICO D.F., ENERO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ROBERTO MELI PIRALLA
Secretario: DR. EDUARDO REINOSO ANGULO
Vocal: DR. MARIO GUSTAVO ORDAZ SCHROEDER
1^{er}. Suplente: M. C. JAVIER FRANCISCO LERMO SAMANIEGO
2^{do}. Suplente: DR. DANNY ARROYO ESPINOZA

Lugar donde se realizó la tesis:
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

MARIO GUSTAVO ORDAZ SCHROEDER

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
1. ANTECEDENTES	8
2. VARIACIÓN DE LAS AMPLIFICACIONES DINÁMICAS DEL TERRENO EN MÉXICO D.F.....	11
3. DATOS E INFORMACIÓN SÍSMICA	14
3.1 EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	14
3.1.1 DATOS SÍSMICOS EMPLEADOS EN LA VARIACIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL..... TERRENO.....	16
3.1.2 DATOS SÍSMICOS EMPLEADOS EN LA VARIACIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN DINÁMICA..... DEL TERRENO.....	18
3.2 ESTACIONES CONSIDERADAS	20
3.2.1 ESTACIONES EN ZONA DE TERRENO FIRME	20
3.2.2 ESTACIONES EN ZONA DE LAGO.....	21
4. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	23
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
5.1 VARIACIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL TERRENO.....	26
5.2 VARIACIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DEL TERRENO	36
5.3 COMPARACIÓN RESULTADOS VARIACION DEL PERIODO DEL SUELO Y LA AMPLIFICACIÓN..... DINÁMICA DEL TERRENO	43
5.4 EVALUAR EFECTO DE SITIO.....	45
6. CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS.....	50
7 ANEXOS:	53
7.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	53
7.1.1 MODO DE USO	54
7.2 CÓDIGO PARA LA CONEXIÓN A LA BASE DE DATOS.....	64

RESUMEN

Con la ayuda de un software desarrollado en esta investigación se determinó la variación del periodo dominante del suelo (T_s) y la amplificación dinámica del terreno para la ciudad de México a lo largo del tiempo. Se usaron registros de acelerogramas en diferentes puntos de la ciudad (zona de lago y zona de lomas) en el lapso de tiempo comprendido entre 1985 y 2012. Por medio de la técnica de cocientes espectrales se pudo determinar que para algunos sitios la variación de T_s es claramente apreciable mientras que para otros no hay ningún cambio a pesar de que ambos se encuentren en la zona de lago. La zona que mayor variación presenta es dentro del circuito interior Bicentenario (una de las principales vialidades de la ciudad de México) y en sus inmediaciones. Dada la tendencia de los resultados, es de esperarse que la reducción en T_s continúe con el paso de los años. Las estaciones que se encuentran en la zona de transición exhiben un comportamiento del periodo del suelo y de las amplificaciones dinámicas del terreno muy estable con una tendencia a permanecer constante con el transcurrir del tiempo. La zona de lago presenta en mayor o menor medida una dispersión de las amplificaciones dinámicas del terreno, existiendo en la zona de lago profundo ($T_s > 4s$) una mayor inestabilidad en los resultados. El nombre del programa computacional empleado es ADITER, con la ayuda del cual puede tenerse un seguimiento a este tipo de cambios de una manera automatizada ya que actualmente este proceso se realiza de forma manual.

ABSTRACT

With the help of software developed in this research we investigated the variation of the dominant period of the soil (T_s) and the soil dynamic amplification for Mexico City over time. We used accelerograms recorded at different points of the city (lake-bed zone and hill zone) in the time period 1985 to 2012. Through the technique of spectral ratios it could be determined that for some sites the change in T_s is clearly significant while for others there is no change even though both are in the lake-bed zone. The most variable region is within the Circuito Interior Bicentenario (one of the main roads of Mexico City) and its vicinity. Given the trend of the results, it is expected that the reduction in T_s will continue over the years. The stations located in the transition zone exhibit behavior period of the soil and soil dynamic amplification very stable with a tendency to remain constant over time. The lake-bed zone has a greater or lesser degree a dispersion of soil dynamic amplification, existing in the deep lake ($T_s > 4s$) increased volatility in results. The name of the developed computer program used is ADITER, with the help of it can be followed up this kind of changes in an automated manner because this process is currently done manually.

INTRODUCCIÓN

La gran sismicidad de la que se ve presa la mayor parte de la República Mexicana y en especial la ciudad de México es el resultado de un sin número de variables, desde los procesos tectónicos propios de la madre naturaleza, los cuales dan origen a sismos con diversas características, hasta la decisión de levantar una urbe de grandes proporciones sobre un lago tal y como lo cuenta la leyenda del águila y la serpiente; razones suficientes para que todos los que vivimos sobre suelo mexicano tengamos en mayor o menor medida cierto grado de sensibilidad por esta clase de fenómeno natural.

Los desastrosos eventos ocurridos en 1985 mostraron lo vulnerable que es la ciudad a este tipo de acontecimientos; en particular, a los grandes efectos de amplificación dinámica del terreno que se presentan. Los altos contenidos de frecuencias bajas (periodos largos) presentes en los sismos de subducción, recurrentes en el último siglo en México, junto con características de la zona lacustre son los responsables de este comportamiento.

A raíz de lo anterior un importante número de investigaciones se realizaron en los años subsiguientes desarrollando una serie de modelos y empleando técnicas cuya finalidad son entender de mejor modo este problema así como el comportamiento en general del movimiento del suelo en el valle de México.

Actualmente, sigue ahondándose en el tema y aunque se tienen mejores herramientas y se cuenta con información de estudios previos hay varias incógnitas por resolver y nuevos desafíos a los que se debe enfrentar.

Producto de esta actividad sísmica que se genera el país, se desarrolla en 1989 un sistema de alerta sísmica de la ciudad de México (SAS) a cargo del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. (CIRES) pionero en la república; posteriormente con la ayuda de autoridades de gobierno de algunos estados involucrados se desarrolla otro sistema de alerta sísmica para ciudades que se ven amenazadas por estos movimientos telúricos. Todas estas redes proporcionan avisos de alerta con un tiempo de oportunidad de algunos segundos, el cual ayuda a evitar grandes pérdidas humanas en futuros eventos catastróficos. Las costas de Guerrero y Oaxaca así como las regiones sísmicas de los estados de Michoacán, Jalisco y Colima se encuentran actualmente instrumentadas y se tienen planes de expansión a otros estados con potencial sísmico elevado.

La ciudad de México fue la primera en el país que contó con una red acelerométrica y gracias a esta instrumentación ha sido posible obtener información que ha ayudado a comprender las características especiales del movimiento que se presentan. Adicionalmente, con los datos obtenidos en las estaciones ubicadas en diversos puntos de la ciudad, se ha empleado un análisis de cocientes espectrales entre sitios de zona de lago y lomas a lo largo de los años lográndose observar en ciertas zonas una clara variación en el periodo dominante del suelo (T_s). Asimismo, las amplificaciones

dinámicas del terreno presentan comportamientos que no deben dejarse de lado. Las pruebas de vibración ambiental también han sido de gran ayuda para identificar las zonas con diferentes niveles de amenaza sísmica.

La variación de estos parámetros del suelo plantea una revisión a los mapas de Ts que se encuentran consignados en el reglamento de construcciones del Distrito Federal actual, ya que hoy por hoy se están diseñando y construyendo estructuras tomando como referencia periodos del suelo que ya no corresponden a los reales, ocasionando en el peor de los casos que los periodos de la estructura y del suelo se asemejen, algo para nada recomendado. Estudios previos han abordado este problema y construido mapas con posibles valores, los cuales son fruto de ciertas hipótesis pero todavía no se han realizado cambios a los códigos de diseño.

En esta investigación se realiza una aplicación computacional que sirve de herramienta para determinar la variación del periodo dominante del suelo y del cambio en las amplitudes dinámicas del terreno a lo largo del tiempo, ya que actualmente este proceso se realiza de una manera poco eficiente. Asimismo, se emplea dicho programa utilizando una serie de criterios que más adelante se exponen, de manera que se obtengan resultados que evidencien este comportamiento.

Finalmente, se busca resaltar la importancia de automatizar este tipo de procedimientos de manera que la obtención de los resultados sea mucho más rápida y pueda monitorearse una problemática como ésta; eso sí teniendo las debidas precauciones.

1. ANTECEDENTES

La cronología de los principales sismos que se han sentido en el valle de México data de muchos años atrás, lo cual nos da a entender cómo este fenómeno natural ha formado parte de la historia de México, dado el impacto que han tenido algunos de estos eventos sísmicos en la capital de la República Mexicana.

Esta importante actividad sísmica que se presenta en el país ha sido motivo de estudio y se han identificado las principales fuentes sísmicas que afectan en particular a la ciudad de México (Rosenblueth *et al.* 1989), siendo los sismos de subducción los que han generado los mayores daños, a pesar de la relativa lejanía de su epicentro, localizado a distancias de entre 150 y 600 km.

Los procesos geológicos que formaron la cuenca del Valle de México produjeron una secuencia ordenada de estratos de arcilla blanda, separados por lentes duros de limos y arcillas arenosas, costras secas y arenas, basálticas o pumíticas, de las emisiones volcánicas (Santoyo, E. *et al.* 2005; Ovando-Shelley *et al.* 2003). Estas características del subsuelo vuelven particularmente vulnerable a la ciudad porque las ondas que llegan de fuentes sísmicas de subducción son ricas en contenido de periodos largos y tienen grandes duraciones, sobre todo en la zona del lago (Reinoso 1995).

El 19 de septiembre de 1985 a la 07:19 am, hora local, se produce el gran sismo de Michoacán ($M_s = 8.1$), conocido popularmente como el terremoto del '85; se presenta un daño inesperado en la ciudad de México. La cantidad de víctimas y daños materiales que ocasionó, lo convirtieron en el más recordado de la historia.

Sin lugar a dudas el sismo del '85 pone en alerta a toda la comunidad científica, y deja en evidencia que pueden presentarse eventos de esa magnitud que ocasionen daños de grandes proporciones, dado el desmedido crecimiento de la ciudad.

Para esa fecha ya se tenían instrumentados algunos sitios en la ciudad, es el caso de Ciudad Universitaria (CU), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Central de Abastos (CD) y Tacubaya (TACY) (ver Figura 1) por mencionar algunos, en donde se registra el movimiento del suelo y gracias a esta información se desarrollan una serie de investigaciones que logran avanzar en el estudio del comportamiento sísmico de la cuenca.

Después de este gran terremoto se reconoce que es necesario tener mayor instrumentación sísmica en la ciudad, por lo que se amplía la red de estaciones que registran movimientos del terreno en el valle de México.

Un gran responsable del daño en la ciudad de México durante el sismo del '85 fue la drástica amplificación del movimiento del suelo en la zona de lago (Singh *et al.* 1988 b). Aunque este

fenómeno ya se conocía desde antes de ocurrir este evento sísmico, fue a raíz de él que se empezó a ahondar en el tema.

Con base en la técnica de funciones de transferencia empíricas, los registros acelerométricos de la ciudad de México sirvieron para medir la amplificación en las zonas de lago con respecto a puntos en terreno firme. Dicha amplificación puede alcanzar valores de 50 para periodos entre 1.4 y 4.8 s (Singh *et al.* 1988 a). Adicionalmente, con este método se pudo determinar que los cocientes espectrales son aproximadamente independientes de la magnitud, la profundidad y el azimut de fuentes localizadas a distancias mayores de 200 km (Singh *et al.* 1988 b). Los estudios anteriores encontraron indicios de un comportamiento no lineal de la arcilla en el sitio CDAO (ver Figura 1) durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, pero no hubo suficiente evidencia que comprobara que otros sitios experimentaran ese mismo comportamiento (Ordaz *et al.* 1988).

Como en un principio no se tenían instrumentados muchos sitios en la ciudad de México, además de la pobre calidad de algunos registros, se realizaron modelos semiempíricos para predecir las amplitudes del espectro de Fourier en el sitio CU (Castro *et al.* 1988). Mas adelante, Lermo *et al.* (1993) propusieron una técnica para estimar los efectos de sitio usando cocientes espectrales con una sola estación de referencia, obteniendo buenos resultados. Luego, se dieron ciertas circunstancias que favorecieron el desarrollo de procedimientos empíricos para estimar el movimiento sísmico del terreno en la ciudad, tomando en cuenta los efectos de fuente, trayecto y sitio (Pérez-Rocha 1998).

A medida que pasaban los años, se tenían nuevos registros, la red acelerométrica crecía más y los instrumentos de medición tenían mejor resolución, aumentando la calidad de los registros. Toda esta nueva información se fue incorporando y se pudo observar que estos cocientes permitían cuantificar con bastante precisión la respuesta de cada sitio (Reinoso 1991).

Pero la zona de lago no es la única que sufre amplificación de ondas sísmicas; hay evidencia de que este fenómeno también se presenta en sitios ubicados en zona de terreno firme, aunque en menor proporción (Ordaz y Singh 1992). Esta zona está compuesta por suelos duros o tobas rojizas arcillosas los cuales son el resultado de la alteración del polvo volcánico depositado en un clima relativamente caliente (Santoyo *et al.* 2005). La amplificación de la que se habla es atribuida a la posible existencia de una cuenca sedimentaria antigua por debajo del basamento firme. Ente el antiguo Oligoceno y el Plioceno existía una gran cuenca que cubría el actual valle de México y se extendía hacia el sur hasta la ciudad de Taxco. El contraste de impedancia entre la capa de arcilla vieja y la roca debajo de ella, junto con la variación lateral de la profundidad de contacto, pueden ser evidencia suficiente para explicar la citada amplificación (Ordaz y Singh 1992; Santoyo *et al.* 2005).

Al realizar los espectros de amplitudes de Fourier sobre los registros de las estaciones ubicadas en terreno firme, se observó que existen dos grupos que siguen comportamientos diferentes. Las estaciones del suroeste (SW) y las del norte, teniendo éstas últimas amplitudes considerablemente menores que las primeras (Reinoso y Ordaz 1999); lo anterior es atribuido a que los sitios donde se ubican las estaciones del SW se encuentran sobre depósitos del cuaternario reciente, mientras que las del norte están sobre depósitos del terciario, mucho más antiguos. Según el estudio citado, deben

utilizarse como referencia las estaciones de terreno firme ubicadas únicamente en el suroeste de la ciudad, debido a razones que más adelante se exponen.

Por medio de los cocientes espectrales puede determinarse el periodo dominante de un sitio, el cual será el asociado a la máxima amplitud; he ahí la gran ventaja de utilizar esta técnica, ya que es de vital importancia conocer el periodo dominante del suelo en un sitio dado, para evitar construir estructuras con periodos similares (Reinoso 1995).

Estos periodos del suelo están consignados en las Normas Técnicas Complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito Federal (NTC-DF-TII (2004)), en donde varían dependiendo de la zona. Recordemos que la microzonificación dividió la ciudad en tres zonas (zona I o lomas, zona II o transición y zona III o lago). Investigaciones recientes encontraron clara evidencia del cambio del periodo dominante del suelo en varios sitios de la ciudad (Arroyo *et al.* 2013), producto del hundimiento regional a causa de la extracción de agua subterránea.

2. VARIACIÓN DE LAS AMPLIFICACIONES DINÁMICAS DEL TERRENO EN MÉXICO D.F.

La ciudad de México está fuertemente ligada desde sus inicios al agua; mucho antes de conformarse como el gran núcleo urbano del país, y posteriormente como uno de los más grandes a nivel mundial, gran parte de su territorio estaba ocupado por el sistema de lagos de la cuenca del Valle de México; el Distrito Federal como lo conocemos hoy, en su mayor parte era el gran lago de Texcoco. Posteriormente la intervención del hombre hizo que las aguas represadas por la naturaleza se abrieran paso, desviando varios de sus afluentes y con ello, evitando las recurrentes inundaciones de aquella época. Éste fue el inicio de varios proyectos que cumplieron con el objetivo de reducir las inundaciones pero que tuvieron como resultado la desecación de los lagos.

Actualmente este vínculo con el agua sigue vigente, y no es para menos, ya que una metrópoli en constante expansión como lo es la ciudad de México, necesita una demanda del acuífero para el consumo humano de proporciones considerables. Cerca del 70% del agua que se consume en la ciudad se obtiene de acuíferos subterráneos (Reinoso 1995), los cuales se extraen por medio de un número aproximado de 1600 pozos en operación y otra cantidad innumerable de pozos clandestinos; adicionalmente, la evaporación solar, el consumo de los árboles y los pozos abandonados y mal sellados constituyen otras formas de extracción del líquido (Santoyo 2007). Por todo lo anterior, la desecación de las zonas de lago ha sido la nota predominante con el transcurrir de los años.

Todos estos factores han provocado, dadas las características geológicas del terreno, que se presente un claro hundimiento del terreno; dicho fenómeno fue advertido desde hace muchos años y se le atribuyó desde el inicio al abatimiento del nivel freático. A medida que pasaban los años, las tasas de asentamiento se incrementaban, y las demandas del líquido también, por lo que el fenómeno nunca se detuvo. Como consecuencia de ello, en varias zonas de la ciudad se puede apreciar a simple vista los estragos de este fenómeno, que poco a poco va deteriorando las construcciones involucradas, varias de ellas patrimonio nacional. Si tomamos en cuenta los últimos 100 años, hay zonas que partiendo de puntos de referencia fuera del lago, han cedido 8 m aproximadamente (Ovando-Shelley *et al.* 2001).

El hundimiento regional, producto del desecamiento es sólo el inicio de un proceso muy complejo de consolidación, el cual afecta el movimiento del terreno durante eventos sísmicos, es decir, el abatimiento del nivel freático produce una reducción en la presión de poros y un incremento en los esfuerzos efectivos (Avilés and Pérez-Rocha 2010). Lo anterior afecta también las propiedades dinámicas del suelo así como la respuesta sísmica (Ovando-Shelley *et al.* 2007). Dichos cambios en las propiedades del suelo modifica la vulnerabilidad de las estructuras ante futuros eventos sísmicos, ya que el peligro sísmico en la zona del lago varía.

Algunos estudios han registrado la evolución del asentamiento en diversos sitios del valle de México (Aguilar *et al.* 2003), apreciándose para un mismo lugar, aceleraciones y atenuaciones en el hundimiento. Asimismo, se identificaron sitios con velocidades de hundimiento regional entre 41 y 49 cm/año, en donde su ubicación coincide con depósitos de suelo en su mayoría arcilloso de mayor espesor.

En el valle de México, no es para nada desconocido el efecto de la amplificación del movimiento del terreno cuando ondas sísmicas lo perturban. Sus características geotécnicas son las principales responsables de que este fenómeno se presente, el espesor de los sedimentos puede exceder en algunos sitios los 60 m de profundidad, con velocidades de onda de corte menores de 50 m/s y con periodo dominante del suelo que puede ser mas de 5 s (Avilés and Pérez-Rocha 2010). Todo esto hace de este valle único y complejo a la vez.

La amplificación dinámica de la que se habla se debe a que las ondas sísmicas quedan atrapadas por el contraste entre las características dinámicas de los depósitos superficiales y la capa dura (Reinoso, 1991). La forma en la que se distribuyen los depósitos es la causante de la respuesta, sea en forma unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Algunas investigaciones hablan de que el valle de México puede ser candidato para aplicar un análisis 1D de propagación de ondas de corte (Avilés and Pérez Rocha 1998), aunque las diferencias entre los movimientos sísmicos calculados con modelos unidimensionales y los observados instrumentalmente se han atribuido a efectos bi y tridimensionales (Santoyo *et al.* 2005). En algunos sitios, especialmente en la periferia de la zona lacustre y cerca de los cerros, los modelos 1D no son tan eficaces (Bard *et al.* 1998; Santoyo *et al.* 2005).

La detallada observación de los movimientos del terreno ocurridos en los últimos años en la ciudad, gracias a que la red acelerométrica ha registrado varios sismos grandes y moderados, ha permitido entender las fuentes, la propagación y atenuación de las ondas sísmicas, así como la predicción de movimientos del terreno para futuros sismos en México (Singh and Ordaz 1993). Lo anterior da pie para decir que desde la perspectiva de la ingeniería sísmica, en el caso de la ciudad de México, las incertidumbres que se tienen al respecto pueden ser menores que las generadas en el proceso de diseño.

Adicionalmente, se han logrado construir mapas de igual amplificación para diferentes periodos dominantes del suelo, así como mapas iso-periodos, para el Distrito Federal, en donde se ha podido determinar con claridad cuáles son las áreas de mayor amenaza sísmica.

Las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2004), en el capítulo referido al diseño por sismo, ha incluido el mapa de periodos dominantes del suelo, en donde puede apreciarse claramente las tres zonas de la ciudad. Es un gráfico muy importante para tener en cuenta a la hora del diseño.

Con el cambio en las propiedades dinámicas del terreno a causa del hundimiento regional, se produce un cambio en los periodos dominantes del suelo (Arroyo *et al.* 2013); ello nos hace afirmar que los mapas de iso-periodos deben ser recalculados con el paso del tiempo para poder estar seguros de sus

valores, es decir, a medida que se tengan registros de los nuevos eventos sísmicos y mayor información en zonas donde antes no se tenía instrumentación, se deben ir ajustando los periodos dominantes del suelo de acuerdo con el comportamiento que se presente.

El proceso para llegar a conocer estos cambios actualmente es algo rudimentario, ya que es necesario usar la mayor cantidad posible de registros confiables de la ciudad de México. Una de las técnicas ampliamente utilizada para encontrar los periodos dominantes del suelo es la que emplea los cocientes espectrales de los registros sísmicos con respecto al terreno firme o también conocida como SSR. El uso de resultados producto de pruebas de vibración ambiental también ha sido utilizado para estos fines; pero en nuestro trabajo nos centraremos únicamente en el caso de registros de acelerogramas, dado a que se presente desarrollar un software como más adelante se menciona.

Continuando con el proceso, para cada estación deben encontrarse funciones de transferencia para cada evento registrado. Las funciones de transferencia para la zona del lago se calculan teniendo como referencia el promedio de las amplificaciones de los sitios ubicados en zona de terreno firme (Reinoso 1991). De estos cocientes salen los periodos dominantes del terreno. Este procedimiento debe realizarse con registros a lo largo del tiempo para poder observar la tendencia del comportamiento.

Por todo lo anterior, se propuso realizar un programa computacional que facilitara los cálculos y evitara el tedioso proceso de tener que hacerlo manualmente, máxime cuando a la ocurrencia de nuevos eventos es necesario volver a realizar el análisis para poder visualizar los cambios que se presentaron.

ADITER es el nombre de la aplicación, la cual se muestra a detalle en el Anexo de este documento. Con este programa de cómputo se resuelve el problema de no tener una herramienta para el análisis, con lo que podrá hacerse un seguimiento más continuo al cambio del periodo dominante del terreno en el tiempo para distintas zonas de la ciudad de México, así como la variación de las amplificaciones dinámicas del terreno cada vez que ocurra un evento sísmico.

La aplicación utiliza una base de datos donde se alojan una gran cantidad de registros obtenidos en distintas estaciones de la ciudad de México y a la cual se puede acceder por medio del internet. Adicionalmente, es posible agregar al análisis registros que no se encuentren contenidos dentro de la aplicación siempre y cuando mantengan ciertos parámetros referidos al formato del archivo de entrada.

De esta manera, la presente investigación está motivada por contribuir al seguimiento del cambio del periodo dominante del suelo de una manera sistemática, ayudando con esto a establecer parámetros que permitan el correcto diseño de las estructuras.

3. DATOS E INFORMACIÓN SÍSMICA

3.1 EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

El gran sismo de 1985 marcó de manera drástica la historia de México por todas las consecuencias que ocasionó; a raíz de ello la instrumentación sísmica tomó mayor importancia, ya que era necesario indagar sobre ciertos interrogantes alrededor de este fenómeno natural y sus implicaciones en el entorno.

Para la fecha de este terremoto se tenían instalados alrededor de 9 acelerómetros de superficie distribuidos en las 3 zonas de la ciudad (lomas, transición y lago); no obstante muy pocas fueron las estaciones que lograron capturar registros con suficiente claridad, por lo que la idea de ampliar la red acelerométrica de la ciudad y desarrollar ciertos avances tecnológicos tomó gran vitalidad para determinar la amenaza de la zona urbana.

Con el paso de los años se fue enriqueciendo la base de datos de eventos sísmicos con mayor cantidad de registros en distintas zonas de la ciudad, lo que permitió a diversas investigaciones obtener resultados que ayudaron cada vez más a entender este complejo valle.

Actualmente se tienen más de 100 estaciones en superficie programadas a registrar movimientos del terreno que sobrepasen determinados niveles preestablecidos en diversos puntos de la ciudad; la Figura 1 muestra los sitios instrumentados, la zonificación y algunos puntos de referencia. Varias de estas estaciones han dejado de funcionar, por lo que fueron retiradas, pero se indican en la figura ya que en algún momento proporcionaron datos para esta investigación.

En la Figura 1 podemos observar la zonificación de la ciudad, gran parte de ella se encuentra ubicada sobre la zona de lago, algo que es alarmante conociendo los grandes efectos de amplificación que se generan producto del movimiento del suelo. Esta zona está formada por depósitos lacustres altamente compresibles con espesores que varían de 10 m hasta 100 m de profundidad y altos contenidos de agua, la cual la convierten en la zona más compleja por todos los factores que intervienen. Los citados efectos de amplificación dinámica del terreno no son para nada desconocidos, ya que desde varios años atrás se sabe de ellos.

Por otra parte, la denominada zona de lomas está formada por suelos poco compresibles con capas superficiales de flujos de lava o tobas volcánicas; aunque hay indicios de cierta amplificación dinámica del suelo, es la zona más competente de la ciudad. Finalmente, la zona de transición tiene características intermedias entre las anteriores.

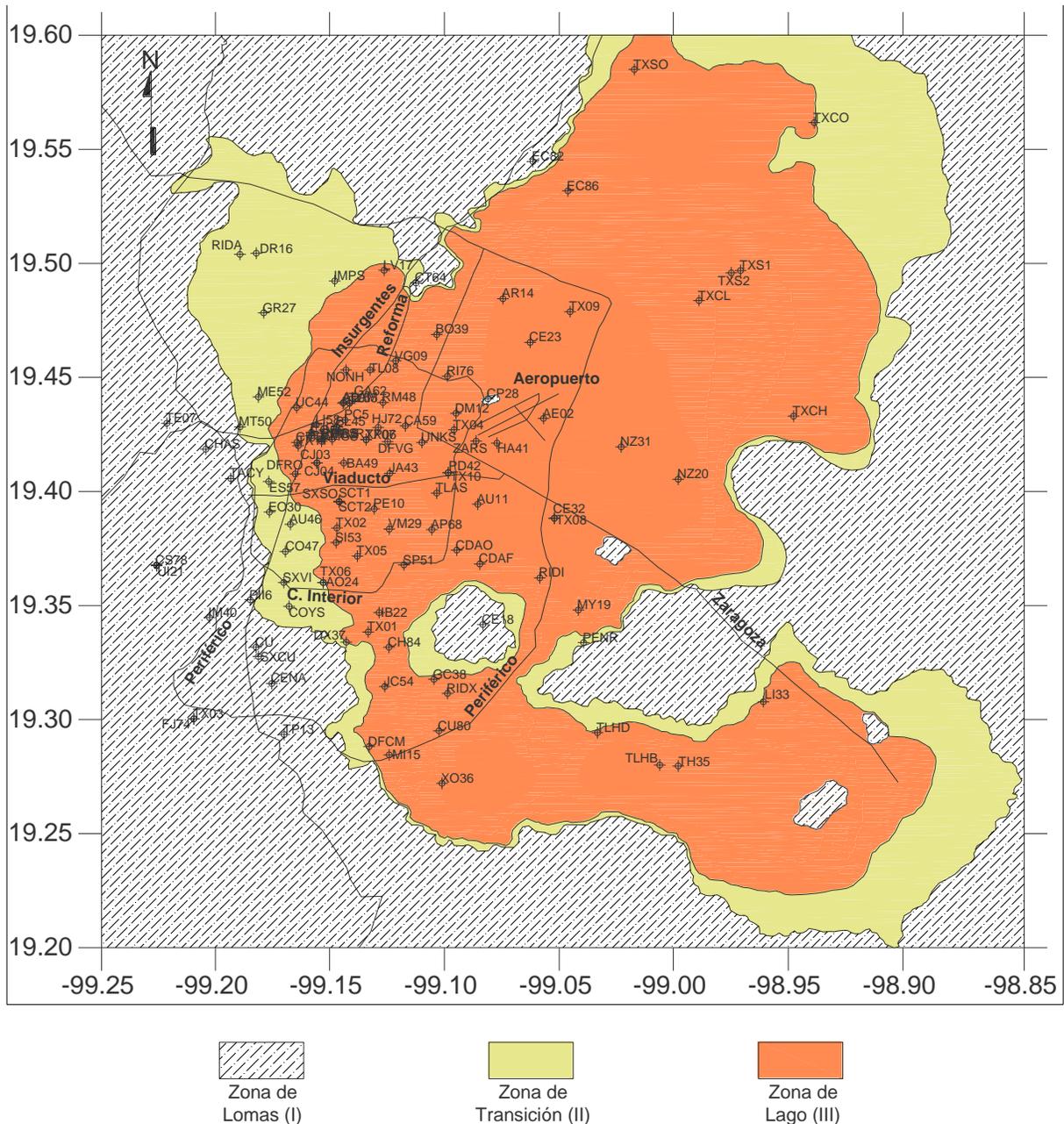


Figura 1 Estaciones, zonas geotécnicas y algunos sitios de referencia de la ciudad de México

La red acelerométrica de la ciudad de México (RACM) ha sido testigo de innumerables sismos que se han sentido en la ciudad y afortunadamente se han capturado algunos registros de eventos grandes y varios registros de eventos intermedios y pequeños.

Para determinar la variación en el tiempo de la amplificación dinámica del terreno así como del periodo dominante del suelo se emplearon dos criterios diferentes en la selección de los registros sísmicos.

3.1.1 DATOS SÍSMICOS EMPLEADOS EN LA VARIACIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL TERRENO

En el caso del periodo dominante del suelo se utilizaron 40 eventos sísmicos, los cuales fueron capturados entre 1985 y 2012; en su mayoría son sismos de subducción aunque también se tienen sismos de falla normal con epicentros que se encuentran a más de 100 km de la ciudad; las magnitudes oscilan entre 5 y 8. En la Figura 2 se puede observar la localización de estos eventos así como su relativa distancia hasta la ciudad de México, adicionalmente la Tabla 1 contiene información adicional de los sismos considerados.

La selección de estos registros se obtuvo tomando como criterio que al menos una estación en zona de lomas capturara adecuadamente el movimiento del suelo. Adicionalmente, se realizó una inspección visual a cada uno de los registros para que no se filtraran datos erróneos y alteraran los resultados.

Finalmente, se pudo comprobar que los periodos dominantes del terreno de cada sitio no dependen fuertemente de la relación señal-ruido de los registros, es decir, a pesar de que los acelerogramas reflejen cierto grado de ruido, el periodo del suelo (T_s) se mantiene en la mayoría de los casos muy estable, algo que no ocurre con la amplificación dinámica del terreno la cual es muy sensible a dicha relación.

Figura 2. Localización de eventos sísmicos considerados.

No.	Fecha	Mw	Latitud (N)	Longitud (W)	Profundidad (km)	Tipo	Estado
1	19/09/1985	8	18.14	-102.71	17	Subducción	Michoacán
2	21/09/1985	7.5	17.62	-101.82	22	Subducción	Michoacán
3	25/04/1989	6.9	16.61	-99.43	16	Subducción	Guerrero
4	31/05/1990	5.8	17.12	-100.88	18	Subducción	Guerrero
5	15/05/1993	6	16.47	-98.72	16	Subducción	Guerrero
6	24/10/1993	6.6	16.65	-98.87	26	Subducción	Guerrero
7	23/02/1994	5.8	17.75	-97.27	75	Normal	Oaxaca
8	14/03/1994	6.8	15.98	-92.64	167.6	Normal	Chiapas
9	23/05/1994	6.2	18.02	-100.57	50	Intraplaca	Guerrero
10	10/12/1994	6.4	17.98	-101.52	58	Normal	Guerrero
11	14/09/1995	7.3	16.48	-98.76	16	Subducción	Guerrero
12	12/10/1995	5.9	18.69	-104.18	17	Subducción	Colima
13	30/10/1995	5.6	16.55	-98.13	15.8	Subducción	Oaxaca
14	13/03/1996	5.1	16.616	-99.118	25	Normal	Guerrero
15	27/03/1996	5.5	16.36	-98.3	18	Subducción	Oaxaca
16	23/04/1996	5.5	17.081	-101.586	21.9	Subducción	Guerrero
17	15/07/1996	6.6	17.293	-101.241	18.7	Subducción	Guerrero
18	18/07/1996	5.4	17.379	-101.254	20	Subducción	Guerrero
19	11/01/1997	7.1	18.34	-102.58	40	Normal	Michoacán
20	21/01/1997	5.3	16.404	-98.21	19.9	Subducción	Guerrero
21	22/05/1997	6.5	18.371	-101.869	78.6	Normal	Guerrero
22	20/04/1998	5.9	18.338	-101.272	86.1	Normal	Guerrero
23	15/06/1999	6.9	18.13	-97.54	61	Normal	Puebla
24	21/06/1999	6.3	18.15	-101.7	53	Normal	Guerrero
25	30/09/1999	7.4	16.2	-96.96	46.8	Normal	Oaxaca
26	21/07/2000	5.8	18.116	-98.975	53.2	Normal	Guerrero
27	09/08/2000	6.5	18.13	-102.39	33	Normal	Michoacán
28	14/06/2004	5.9	16.2	-98.139	17.4	Subducción	Guerrero
29	14/08/2005	5.4	16.023	-98.385	25.1	Subducción	Oaxaca
30	20/02/2006	5.2	18.3	-100.54	55.7	Normal	Guerrero
31	11/08/2006	6	18.5	-101.06	57.8	Normal	Guerrero
32	13/04/2007	6	17.37	-100.14	42.7	Normal	Guerrero
33	28/04/2008	5.8	17.827	-101.08	61	Normal	Guerrero
34	27/04/2009	5.8	17.06	-99.41	32.2	Normal	Guerrero
35	22/05/2009	5.6	18.22	-98.26	59.4	Normal	Puebla
36	11/04/2012	6.4	17.9	-103.06	16	Subducción	Michoacán
37	05/05/2011	5.5	16.61	-98.91	11	Subducción	Guerrero
38	11/12/2011	6.5	17.85	-99.98	58	Normal	Guerrero
39	20/03/2012	7.4	16.42	-98.36	15	Subducción	Guerrero
40	02/04/2012	6	16.27	-98.47	10	Subducción	Guerrero

Tabla 1 Sismos registrados en ciudad de México empleados para determinar la variación de Ts.

3.1.2 DATOS SÍSMICOS EMPLEADOS EN LA VARIACIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DEL TERRENO

Para la amplificación dinámica tuvo que emplearse otro criterio ya que este parámetro está fuertemente relacionado con la relación señal-ruido de los registros, tanto para estaciones ubicadas en zona de lomas como las de zona de lago.

Por lo anterior, se decide tener en cuenta únicamente los sismos que cuenten con al menos dos registros ubicados en estaciones de terreno firme en sitios diferentes, de manera que esta zona pueda representarse adecuadamente. Además se realiza un examen a cada uno de los acelerogramas y se desechan los que tienen baja calidad. En este punto, se hizo mayor énfasis en los registros de zona de lomas, ya que como se ha mencionado, son la referencia de las funciones de transferencia y por ende deben representar satisfactoriamente las características del movimiento.

En la Tabla 2 se muestran los eventos considerados; para cada evento se tiene la magnitud, el tipo de origen y las coordenadas del epicentro, así como su distancia hasta un punto de referencia que es Ciudad Universitaria (CU).

No	Fecha dd/mm/yyyy	Magnitud Mw	Tipo	Latitud N	Longitud W	Profundidad (km)	Distancia a CU (km)
1	19/09/1985	8.0	Subducción	18.14	-102.71	17	394.4
2	25/04/1989	6.9	Subducción	16.61	-99.43	16	303.6
3	24/10/1993	6.6	Subducción	16.65	-98.87	26	299.8
4	23/05/1994	6.2	Intraplaca	18.02	-100.57	50	206.5
5	10/12/1994	6.4	Subducción	17.98	-101.52	58	288.5
6	14/09/1995	7.3	Subducción	16.48	-98.76	16	320.1
7	15/06/1999	6.9	Normal	18.13	-97.54	61	218.4
8	21/06/1999	6.3	Normal	18.15	-101.70	53	295.9
9	30/09/1999	7.4	Subducción	16.20	-96.96	46.8	420.1
10	21/07/2000	5.8	Normal	18.12	-98.98	53.2	136.8
A	13/04/2007	6.0	Normal	17.37	-100.14	42.7	240.3
B	22/05/2009	5.6	Subducción	18.22	-98.26	59.4	157.0
C	11/12/2011	6.5	Normal	17.85	-99.98	58	185.1
D	20/03/2012	7.4	Subducción	16.42	-98.36	15	335.1

Tabla 2 Sismos registrados en ciudad de México empleados para determinar la variación de la amplificación dinámica del terreno.

De la tabla anterior, un total de 8 eventos son sismos de subducción; de los 6 restantes sólo uno es un sismo intraplaca (evento 4) y los demás son sismos de falla normal. Las distancias epicentrales varían entre 136 y 420 km con magnitudes entre 5.6 y 8.0.

Estudios previos (Singh *et al.* 1988 a; Reinoso y Ordaz 1999) utilizaron los eventos del 1 - 10 para obtener resultados que evidencian un comportamiento no lineal del suelo en algunos sitios, así como amplificaciones dinámicas del terreno en distinta medida en todas las zonas de la ciudad.

Los eventos A, B, C y D son los últimos sismos registrados con magnitud e intensidad considerable, de entre los que destaca el sismo del 20 de Marzo de 2012, el último gran sismo que se sintió en la ciudad de México.

De acuerdo con Reinoso y Ordaz (1999) las aceleraciones máximas promedio en terreno firme (A_{max}) pueden ayudar a determinar la calidad de los datos y con ello obtener resultados de una mayor credibilidad. En la investigación citada se plantea que solamente se incluyan los eventos sísmicos cuya $A_{max} > 4$ gal en las estaciones de terreno firme. A pesar de lo anterior, pudo determinarse que los datos de esta zona para los sismos contenidos en la Tabla 2 no siempre avalan la hipótesis del estudio señalado; pero en términos generales, A_{max} es un buen parámetro para establecer cuales registros deben tenerse en cuenta en los análisis.

En la Figura 3 se muestra el historial de aceleraciones máximas promedio de las dos componentes horizontales en estaciones ubicadas en zona de lomas entre el 19 de Septiembre de 1985 y el 11 de Abril de 2012. Los puntos marcados con un triángulo son los eventos sísmicos que fueron tenidos en cuenta para encontrar la variación de la amplificación dinámica, mientras que los marcados con un rombo no fueron considerados. Puede notarse que hay algunos eventos que tienen una $A_{max} > 4$ gal pero no fueron tenidos en cuenta (es el caso de los puntos marcados con círculos); esto se debe a la pobre calidad de dichos registros en terreno firme o a la escasez de acelerogramas en zona de lomas.

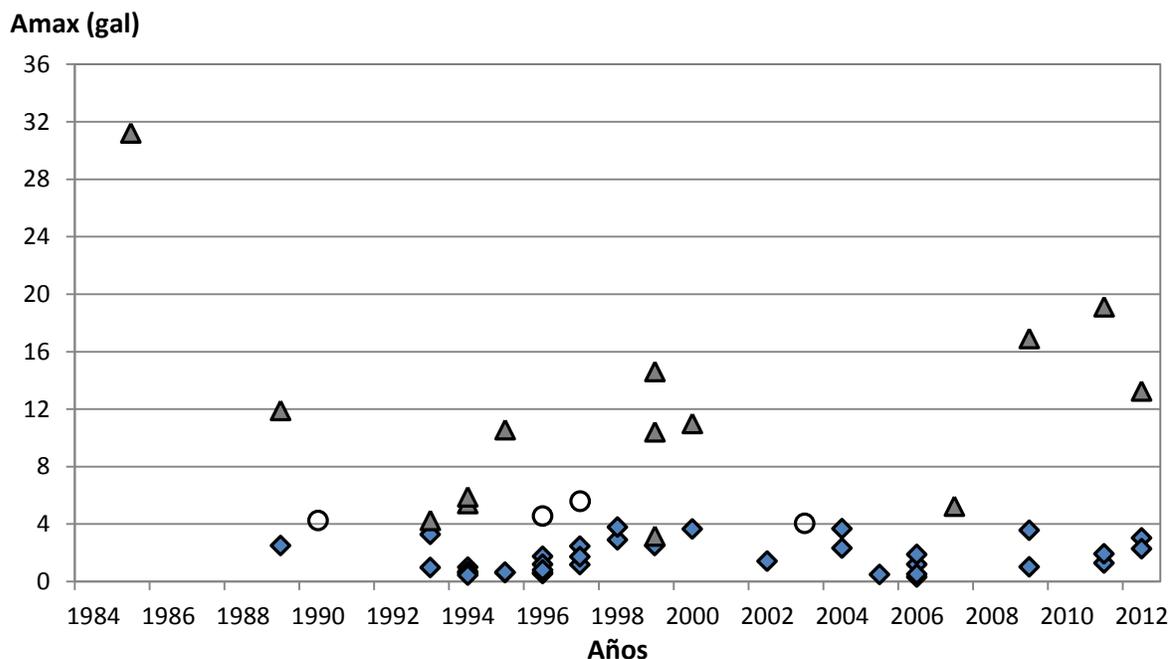


Figura 3 Historial de aceleraciones máximas promedio en estaciones de terreno firme 19/09/1985 – 11/04/2012

En la figura anterior resalta el hecho que el sismo del 11 de diciembre de 2012 fue el segundo con mayor aceleración en terreno firme que se registró en la ciudad, por detrás del gran sismo de 1985.

La inspección visual detallada de cada uno de los datos fue muy importante para determinar si un evento es tenido en cuenta. Desafortunadamente, a pesar de que se tienen varios acelerogramas, no todos representan claramente el movimiento, debe existir una cierta duración y una clara fase intensa en el registro. También se observaron detenidamente la forma de cada uno de los espectros de Fourier.

3.2 ESTACIONES CONSIDERADAS

La red acelerométrica de la ciudad de México cuenta con instrumentos de medición de distintas entidades. El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A. C. (CIRES) es el que mayor presencia tiene: cuenta con al menos 80 aparatos y ha realizado ciertos desarrollos tecnológicos que permitieron mejorar el servicio. El Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) son las otras dos entidades que también cuentan con estaciones aunque en menor cantidad. A los acelerómetros digitales ubicados en superficie los complementan aquellos situados en pozos o inclusive sobre algunas estructuras.

En la Figura 1 puede observarse que en el centro de la ciudad se tiene una gran densidad de instrumentación, y no es para menos, ya que durante el sismo de 1985 fue una de las zonas más afectadas. A pesar de que muchas estaciones han salido de operación, muchas aún continúan hasta la fecha y con mejores equipos, lo que sin duda permitirá que el seguimiento a la amenaza de la ciudad se mantenga.

Para fines de esta investigación únicamente se hace la distinción entre estaciones de terreno firme y estaciones en zona de lago; las estaciones en zona de transición se analizaron con los mismos criterios que las ubicadas en el lago y se hace referencia a ellas sólo cuando se considera pertinente.

3.2.1 ESTACIONES EN ZONA DE TERRENO FIRME

Las estaciones ubicadas en esta zona nos servirán de referencia para poder emplear la técnica de los cocientes espectrales; dicha técnica requiere que en las estaciones de terreno firme consideradas no se presenten efectos de amplificación (Lermo y Chávez-García, 1994). A pesar de lo anterior, debido a la escasez de instrumentación sísmica fuera de la zona de lago (ver Figura 1) nuestra referencia deberá tener por lo menos un comportamiento similar entre sí, aunque se presente cierta amplificación dinámica del terreno, la cual existe tal y como lo exponen Ordaz y Singh 1992.

Reinoso y Ordaz (1999) demostraron que hay una clara diferencia en el comportamiento entre las estaciones de esta categoría que se encuentran al norte de la ciudad (muy pocas) y las que están en el sur-oeste (la gran mayoría, ver Figura 1). Los espectros de amplitud de Fourier muestran que las estaciones de terreno firme ubicadas al norte presentan menores amplitudes que las del sur-oeste. Adicionalmente, estaciones como CE18 y CP28 están en medio de estos dos grupos. Por lo tanto, las estaciones al sur-oeste de la ciudad ubicadas en terreno firme serán nuestra referencia, a pesar de que se presenten pequeños efectos de amplificación.

De acuerdo a las consideraciones anteriores tan solo un total de 11 sitios nos servirán de referencia. La Tabla 3 contiene las estaciones en zona de lomas que fueron utilizadas, se muestra su localización y coordenadas geográficas.

No.	Código estación	Localización estación	Latitud	Longitud
1	CENA	CENAPRED	19.3143	99.1762
2	CS78	Colinas del Sur	19.3656	99.2262
3	CU01, CUP1, CUP4, CUP5, CUP6	Ciudad Universitaria	19.33	99.183
4	CHAS	Chapultepec	19.4157	99.2048
5	FJ74	Fundación Javier Barros Sierra	19.299	99.21
6	IM40	Instituto Médico Pediátrico	19.3428	99.2032
7	PA34	San Pedro Atocpan	19.2016	99.0491
8	PII6	Campo Libre, Av. Insurgentes	19.3505	99.1855
9	TACY	Tacubaya	19.403	99.194
10	TE07	Tecamachalco	19.4269	99.2217
11	TP13	Tlalpan	19.2922	99.1708

Tabla 3 Estaciones de terreno firme empleadas en los análisis

De los anteriores 11 sitios instrumentados únicamente se encuentran en operación 7 ya que las estaciones con código CENA, CHAS, PII6 y TACY no presentan registros desde mediados del 2000.

3.2.2 ESTACIONES EN ZONA DE LAGO

Alrededor de 100 estaciones se encuentran ubicadas en esta zona, a pesar de lo cual no todos los acelerómetros registraron la totalidad de los movimientos sísmicos y otra gran cantidad han sido retirados por diversas circunstancias; no obstante, la cantidad de información que se tiene es muy valiosa y servirá para el propósito de esta investigación.

Filtrar los registros de esta zona de una manera adecuada de modo que reflejen el comportamiento del suelo es una de las prioridades de este estudio, ya que de esto dependerá la credibilidad de los resultados, máxime cuando es bien conocida la gran amplificación de las ondas sísmicas especialmente en el rango de 1.4 s a 5 s.

En la Figura 4 se aprecia como varía la duración y la amplitud de los registros sísmicos en las diferentes zonas de la ciudad. El contraste entre la zona de lago y la zona de terreno firme es claro evidenciándose la citada amplificación dinámica del suelo.

La siguiente ilustración muestra algunos de los registros que se obtuvieron en el sismo del 11 de diciembre de 2011 para diversos puntos de la ciudad. Tal y como lo muestra la Figura 3 este evento sísmico fue el segundo de mayor aceleración en terreno firme que se presentó en la ciudad de México por detrás del gran sismo de 1985.

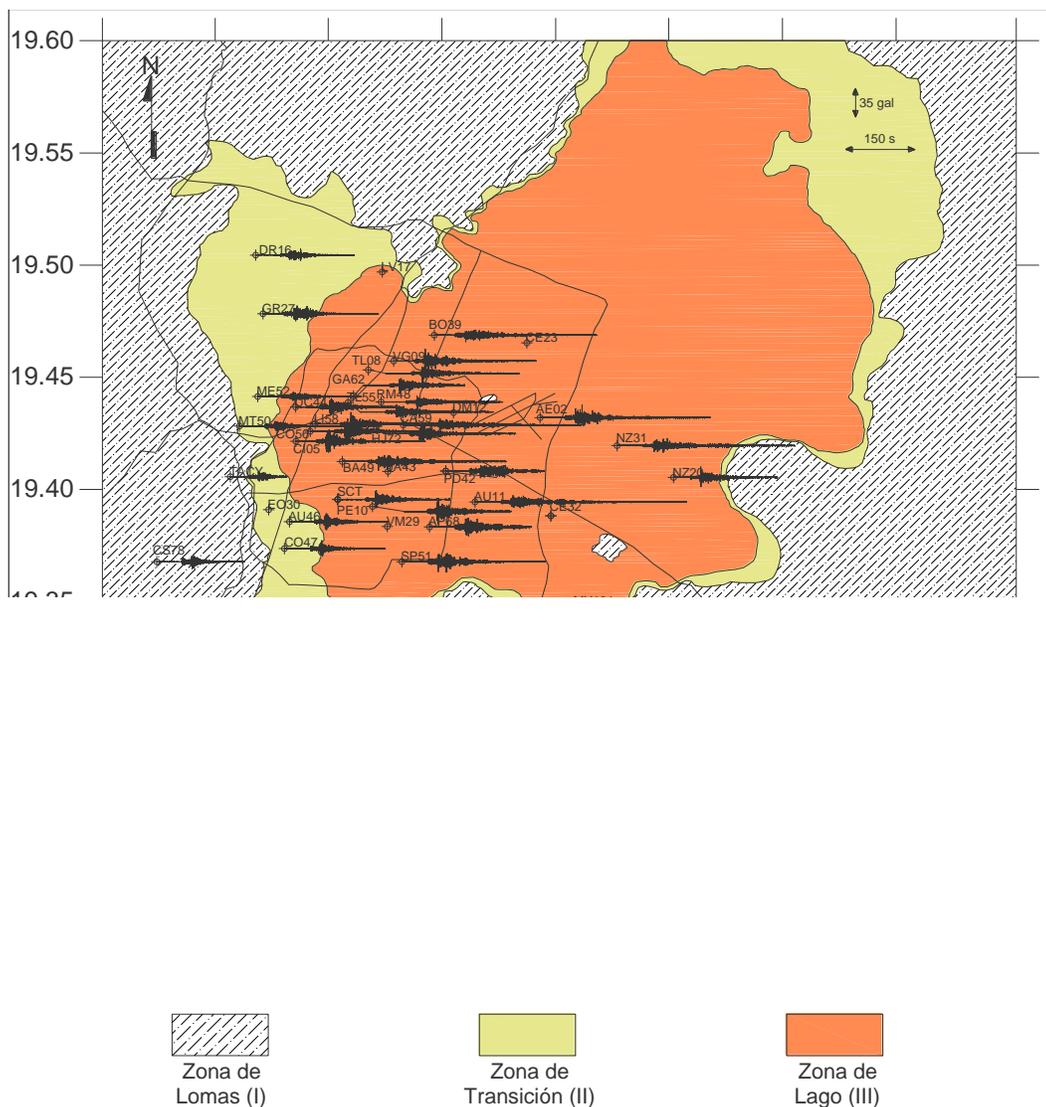


Figura 4 Registros sísmicos en diferentes zonas de la ciudad durante el sismo del 11-12-2011.

4. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Para obtener las funciones de transferencia se recurre a un método empírico en donde la estimación se realiza con registros de movimientos fuertes, se emplea la técnica de la razón espectral estándar (SSR), la cual consiste en el cociente entre el espectro de amplitudes de Fourier (EAF) del lugar de interés y el EAF de una estación de referencia (Limaymanta 2009).

Nuestra referencia y denominador del cociente espectral será el promedio de los espectros de amplitudes de Fourier en zona de terreno firme; Reinoso (1991) concluye que son la mejor referencia ya que la estabilidad de las funciones de transferencia aumenta si se realizan de esta manera.

Los EAF se suavizaron usando un filtro de banda de 1/3 o un 1/6 de octava para la zona de lomas y lago respectivamente; valores que provienen de observaciones en investigaciones previas (Singh *et al.* 1988a) en donde se determina que son los que mejor representan el comportamiento para cada zona.

Finalmente, la función de transferencia se representa mediante el siguiente cociente:

$$H_i(\omega) = \frac{|A_i(\omega)|}{|A_o(\omega)|}$$

En donde, $|A_i(\omega)|$ es el EAF de una estación i en zona de lago y $|A_o(\omega)|$ es el espectro promedio de amplitudes de Fourier para las estaciones en terreno firme del mismo evento.

Una buena manera para determinar la variación de las amplificaciones dinámicas del terreno en los sitios ubicados en la zona de lago es normalizando los periodos de excitación del terreno con respecto al periodo dominante del suelo (T_s), de manera que siempre las máximas amplitudes estarán sobre la ordenada (T/T_s) unitaria. Para encontrar T_s debemos localizar la máxima amplificación, la cual en la mayoría de los casos es bastante clara.

A continuación se presentan los resultados de las funciones de transferencia normalizadas (FTN) para la estación SCT (ver Figura 1) siguiendo las suposiciones planteadas anteriormente para encontrar los cambios en las amplificaciones dinámicas del terreno. La elección de este sitio en particular se debe a que es una de las estaciones con gran cantidad de información producto de los movimientos del suelo registrados allí y de estudios efectuados por varias investigaciones.

En la Figura 5 se observa para los eventos sísmicos contenidos en la Tabla 2 que correspondan al sitio seleccionado, una variación apreciable con el tiempo de la amplificación dinámica. La mayor amplitud para las componentes NS y EW se tiene en el sismo del 19/09/1985, mientras que la menor esta en el sismo del 20/03/2012 para NS y en 22/05/2009 para EW. Estos cambios en la amplificación se observan en otras investigaciones que utilizaron cocientes espectrales (Lermo y Chávez-García 1994).

El procedimiento que aquí se plantea es utilizado para obtener en cada una de las estaciones ubicadas en la zona de lago (ver Figura 1) la variación de la amplificación dinámica como del periodo dominante del terreno. No obstante, deben tenerse en cuenta las adecuadas suposiciones para la selección de los acelerogramas.

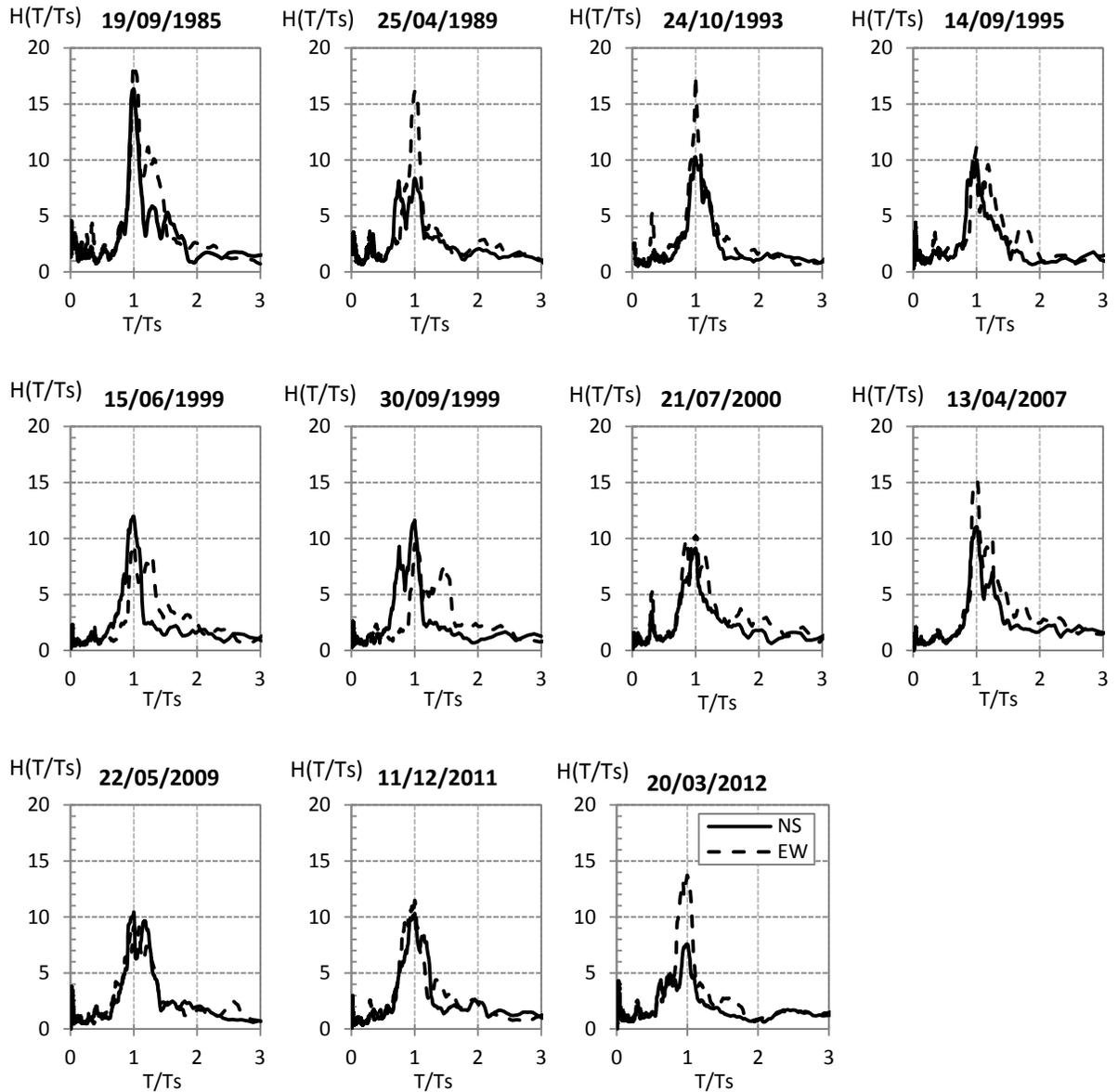


Figura 5 Funciones de transferencia normalizadas en la estación SCT

En la Figura 5 puede apreciarse que la forma de las gráficas de un evento a otro en general es similar; existen diferencias pero puede distinguirse bien la máxima amplificación dinámica del terreno para ambas componentes.

Los cálculos necesarios para obtener la figura anterior y los correspondientes a las estaciones restantes ubicadas en el la zona de lago, se realizaron con la ayuda del software **ADITER**, el cual fue producto de esta investigación y del que se amplía en los anexos de este documento.

La correcta automatización de procesos como los anteriores ayudan a obtener resultados con rapidez consiguiendo mantener monitoreada una problemática determinada, razón por la cual es de vital importancia acompañarnos de herramientas tecnológicas como éstas pero sin dejar de lado la parte teorica.

El periodo dominante del terreno (T_s) es un parámetro que es más fácil de relacionar con el comportamiento y diseño de estructuras que la amplificación dinámica del suelo, y no es para menos ya que con el conocimiento de esta propiedad del terreno es posible evitar efectos de resonancia entre T_s y el periodo natural de vibración de la edificación.

A continuación se muestran los resultados de la variación de T_s en el tiempo de pruebas de vibración ambiental (VA) y empleando los valores obtenidos con las funciones de transferencia para el sitio SCT. Los datos de VA se obtuvieron gracias a Martínez-González *et al* (2011). Los círculos rellenos representan mediciones de VA en 1985 y en 2010, mientras que los rombos representan la media geométrica de las funciones de transferencia en ambas componentes. Puede apreciarse que ambos resultados ponen en evidencia la reducción del periodo dominante del suelo, acentuándose en mayor medida en la VA.

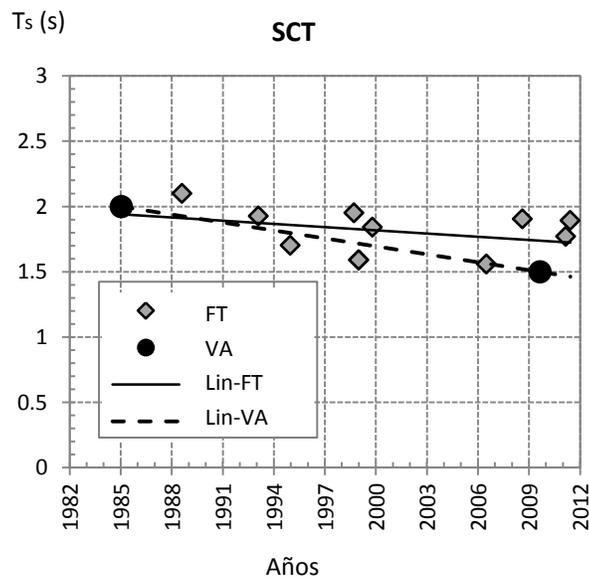


Figura 6 Resultados de T_s en pruebas de vibración ambiental (VA) y utilizando funciones de transferencia (FT) para diferentes eventos registrados entre 1985 y 2012 en SCT.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para cada estación ubicada en zona de lago se obtuvieron los valores del periodo dominante del terreno y su amplificación dinámica en cada uno de los eventos sísmicos que se consideraron en las direcciones NS y EW. A todos los registros (en lago y en lomas) se les hizo una corrección de línea base de tipo normal. Un total de 52 estaciones en el lago son las que registraron satisfactoriamente los movimientos del suelo y de las cuales se hablará en este capítulo.

Teniendo como referencia algunas investigaciones donde concluyen que la tendencia del periodo dominante del suelo es a disminuir con el paso del tiempo (Arroyo *et al* 2013; Avilés, J. *et al.* 2010; Ovando Shelley, E. *et al.* 2003; Ovando-Shelley, E. *et al.* 2007) y las fechas de los eventos sísmicos que se consideran, se puede apreciar que se cuenta con información de los últimos 27 años. Un horizonte temporal considerable pero, siguiendo las tendencias de los modelos mencionados anteriormente, es un espacio de tiempo relativamente corto por lo que se utilizó una regresión lineal como tendencia para nuestros resultados.

A pesar de que se cuenta con resultados de pruebas de vibración ambiental para algunas estaciones ubicadas en zona de lago (Martínez-González *et al* 2011) en los años 1990 y 2010, no se incluyen en esta investigación debido a que la comparación entre los dos métodos empíricos (estimación con registros de movimientos fuertes y con registros de microtremores) ya se han realizado en estudios citados aquí (Lermo y Chávez-García 1994; Arroyo *et al* 2013), además no todos los sitios cuentan con información de pruebas de vibración ambiental de años anteriores por lo que la tendencia no se puede suponer.

5.1 VARIACIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL TERRENO

Primero se muestran los resultados obtenidos de la variación de T_s en los sitios ubicados en la zona de lago (ver Figura 1); es importante recordar los criterios que se emplearon en la selección de los registros y que fueron descritos anteriormente.

En la Figura 7 están las gráficas en donde la variación de T_s se presentó en más de un 10% del periodo de sitio que se tenía en 1985. Puede observarse que existe una clara tendencia a disminuir en la mayoría de los casos, presentándose en algunos de ellos muy poca dispersión (CE23, DM12, CDAO, AP68, CA59, BA49, VM29, XP06, SP51, CO56, AL01 y SI53). Los anteriores sitios (a excepción de CE23)

se encuentran alrededor del centro histórico de la ciudad, es decir dentro del circuito interior Bicentenario, por lo que los mayores cambios se presentan allí.

La hipótesis que tiene mayor fuerza en el cambio del periodo dominante del suelo va relacionada con la extracción de agua de mantos acuíferos subterráneos; esto lo corroboran diversas investigaciones algunas de ellas mencionadas en este documento. Por lo tanto, el constante bombeo de agua en esta zona a lo largo del tiempo así como cambios en algunas propiedades geotécnicas ha provocado la disminución en los espesores de los estratos del suelo y con ello afectando la respuesta dinámica del terreno.

Los asentamientos que se presentan en la catedral metropolitana de la ciudad de México pueden ser en alguna medida consecuencia de la problemática que aquí se plantea, aunque es claro que en esta construcción intervienen una serie de factores. Algo que salta a la vista es que se encuentra ubicada en el centro de la ciudad, donde se produce la evidente reducción en T_s .

Las estaciones AU11, NZ20, XO36, JA43, VG09, RM48 y TL55 tienen una dispersión mucho mayor que las anteriores aunque la reducción en el periodo es apreciable. Se encuentran localizadas dentro de la misma área que las anteriores a excepción de NZ20 la cual esta al este del centro de la ciudad y XO36 al sur.

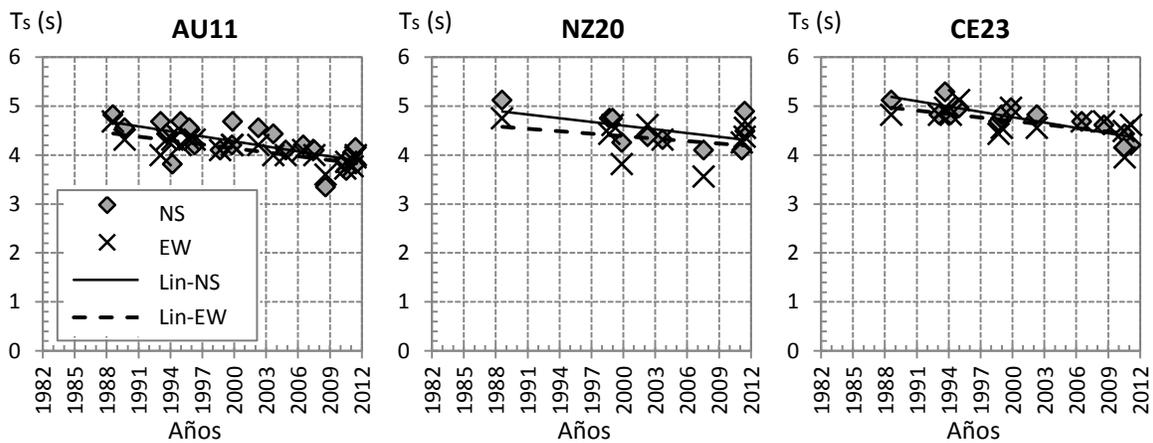


Figura 7 Gráficas del periodo (T_s) en función del tiempo para sitios en zona de lago. Cambio > 10% o aproximado en las dos componentes.

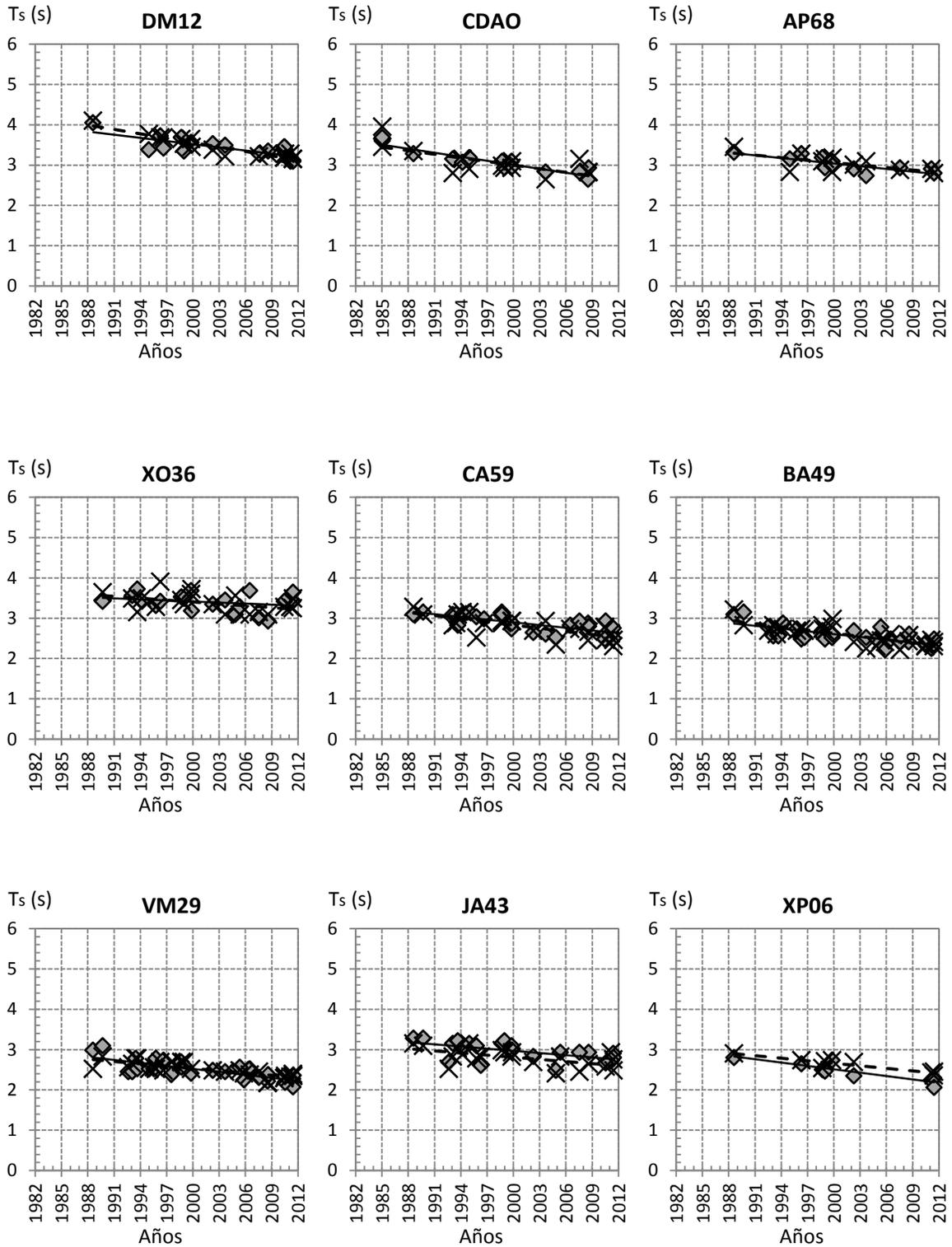


Figura 7 Continúa

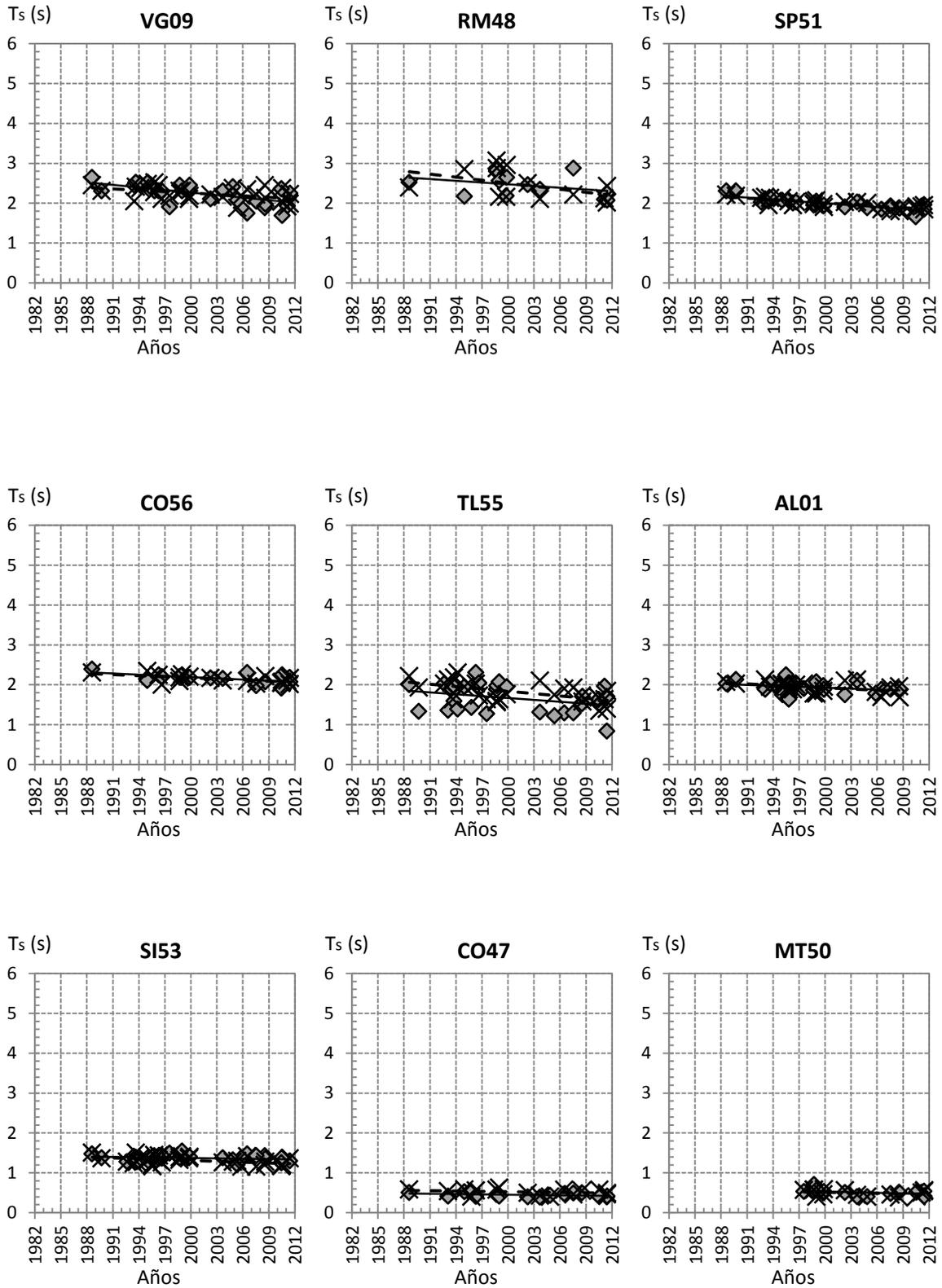


Figura 7 Continúa

Estaciones como NZ20, CO56 y SI53 presentan variaciones muy cercanas al 10% del periodo dominante del suelo en ambas componentes.

MT50 y CO47 son las únicas estaciones de este grupo que se encuentran en la denominada zona de transición, a pesar de lo cual los resultados son bastante consistentes año tras año y se puede apreciar claramente una tendencia con poca dispersión. Debido a que el periodo dominante del suelo de estos sitios es pequeño no logra apreciarse a simple vista la variación de más del 10% en ambas componentes.

En la Figura 8 están las gráficas de los sitios que sólo experimentan un cambio mayor al 10% del periodo dominante del terreno en una componente. En la mayoría de los casos esta componente es EW; únicamente las estaciones GA62, SCT, MI15 y LI33 presentan esta variación en la componente NS.

Los sitios que presentan mayor dispersión son LI33, HJ72, BO39 y definitivamente TH35. Esta última estación, ubicada en el lago de Xochimilco, exhibe resultados en donde no se vislumbra ninguna tendencia definida; una posible explicación podría ser la pobre calidad de los registros en este lugar, ocasionando errores en los cocientes espectrales, máxime cuando los sitios con periodos largos son más susceptibles a este tipo de fallas.

Los demás sitios de la Figura 8 tienen una tendencia claramente marcada y puede apreciarse la poca dispersión que presentan.

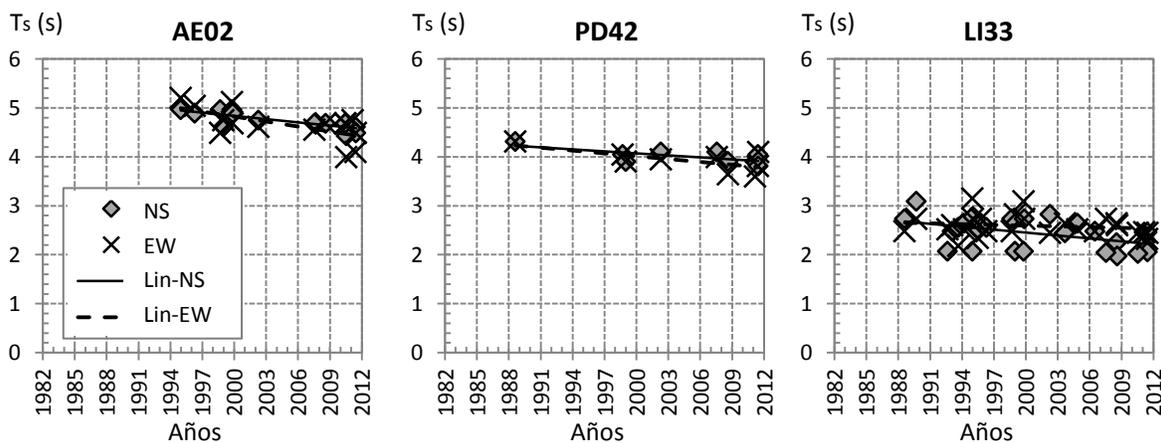


Figura 8 Gráficas del periodo (T_s) en función del tiempo para sitios en zona de lago. Cambio > 10% sólo en una componente.

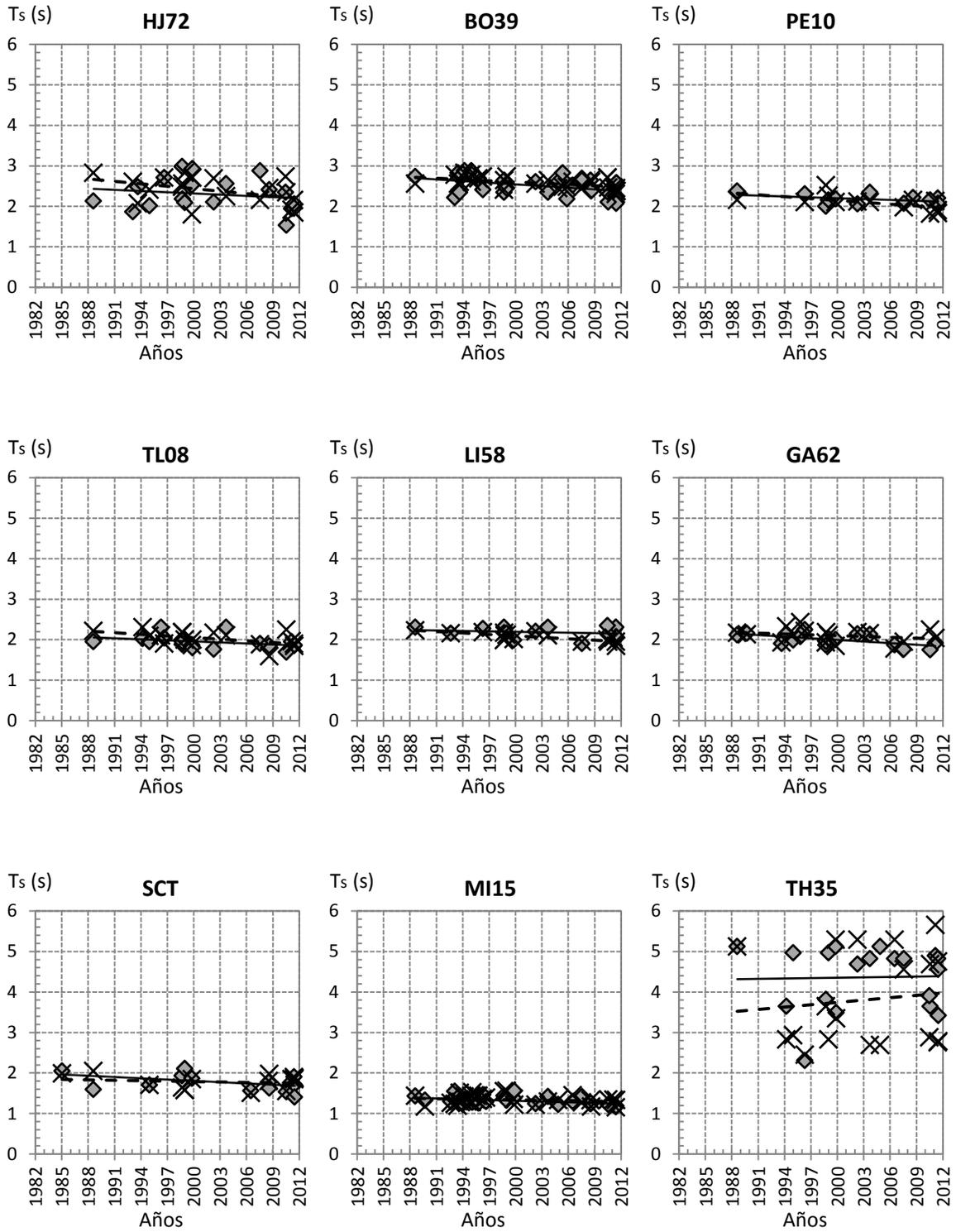


Figura 8 Continúa

La Figura 9 contiene las gráficas de las estaciones cuyo periodo permanece constante, es decir, no se experimenta ninguna variación en el periodo dominante del terreno mayor del 10% en ninguna de las dos componentes.

La dispersión de datos en la mayoría de este grupo de sitios es muy poca y se aprecia claramente la tendencia a permanecer constante. Únicamente las estaciones BL45 y LV17 tienen datos con mayor grado de dispersión, acentuándose en mayor grado en la última de las anteriores.

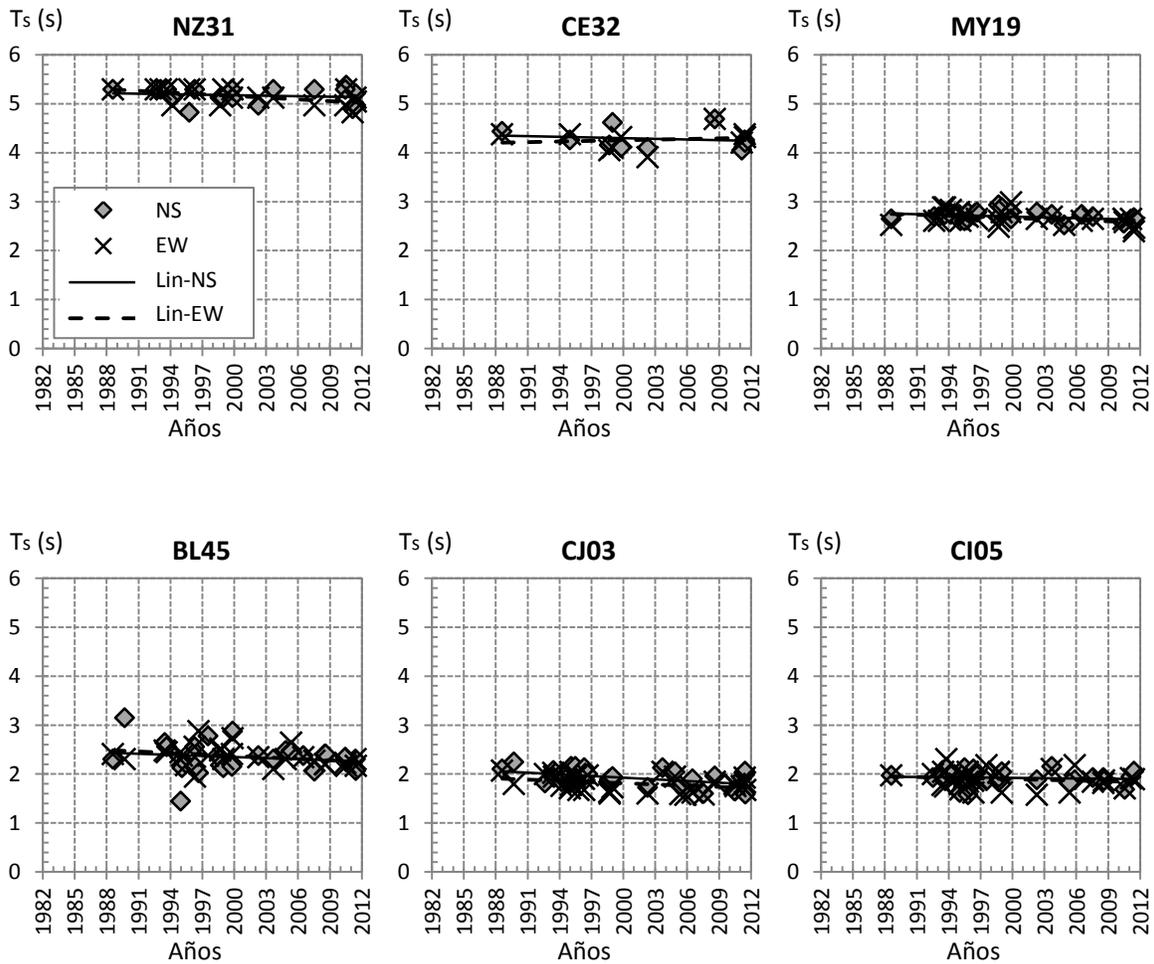


Figura 9 Gráficas del periodo (T_s) en función del tiempo para sitios en zona de lago. Cambio < 10% en ambas componentes.

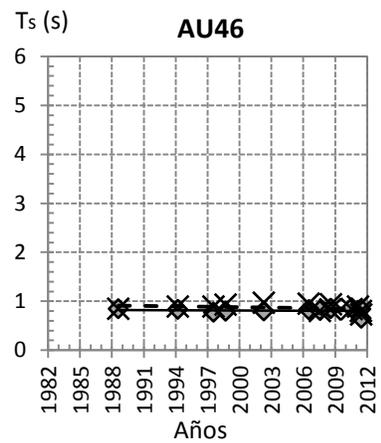
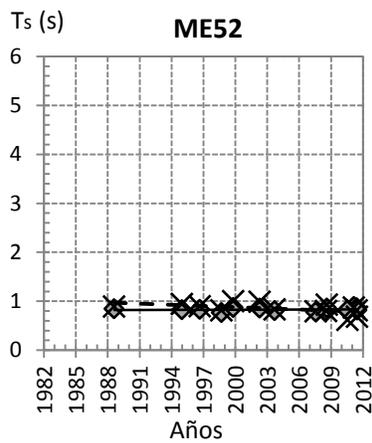
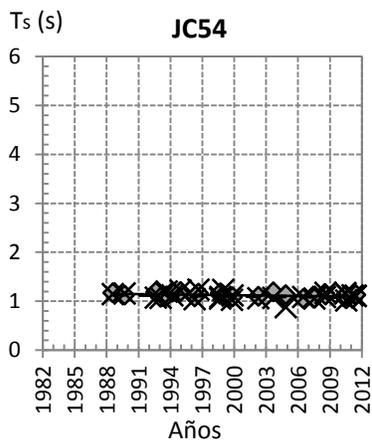
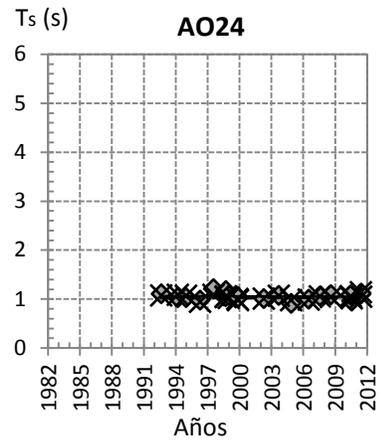
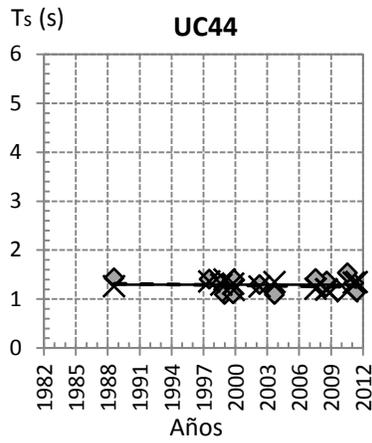
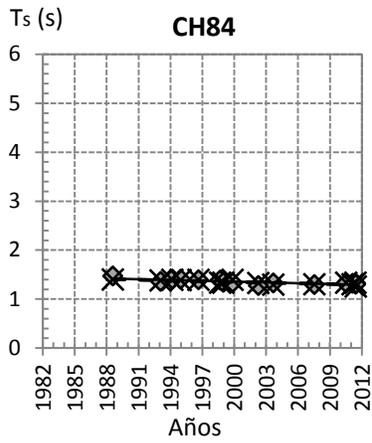
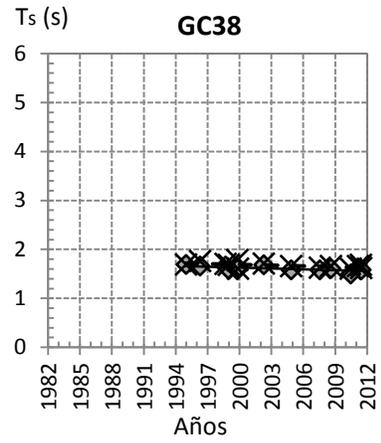
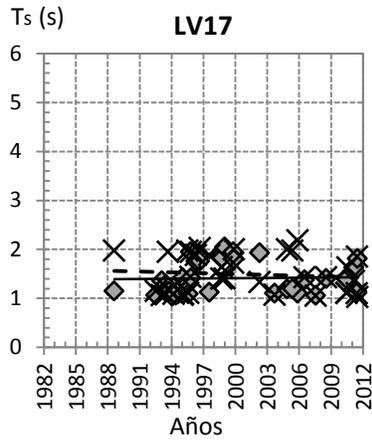
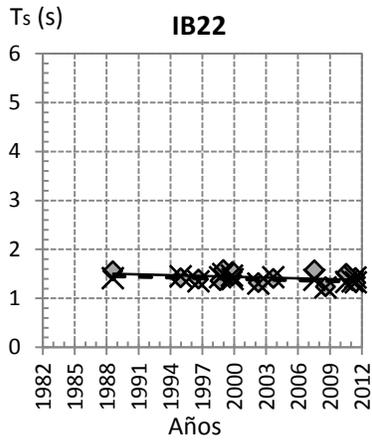


Figura 9 Continúa

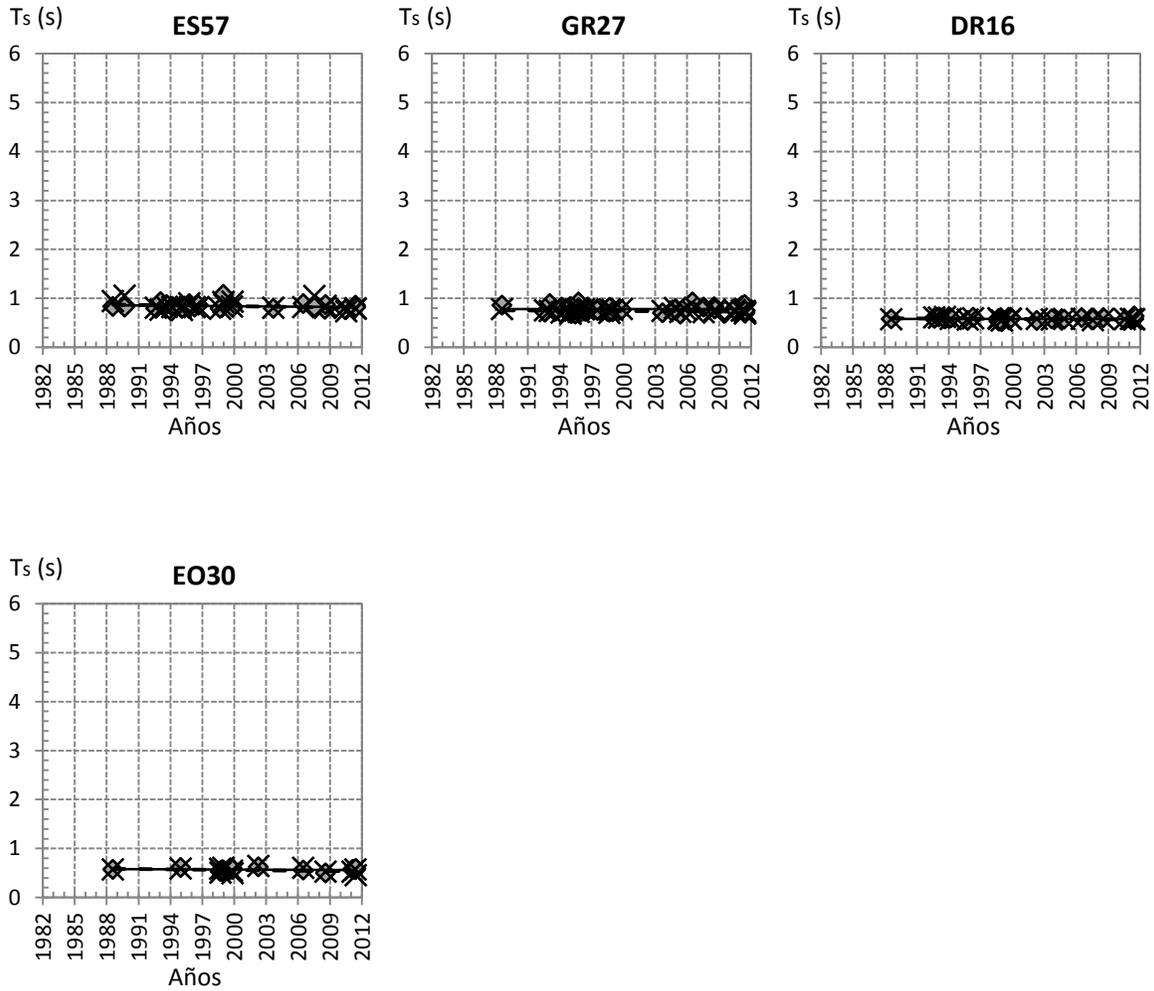


Figura 9 Continúa

En la siguiente figura se puede apreciar lo que anteriormente se viene diciendo, las grandes variaciones de T_s se presentan dentro del circuito interior. Los círculos oscuros son las estaciones que presentan un cambio de T_s mayor del 10% en ambas componentes, los más claros son los sitios que no presentaron variaciones considerables de T_s , mientras que los restantes son las estaciones que en una sola componente se presenta una variación mayor del 10% del periodo del suelo.

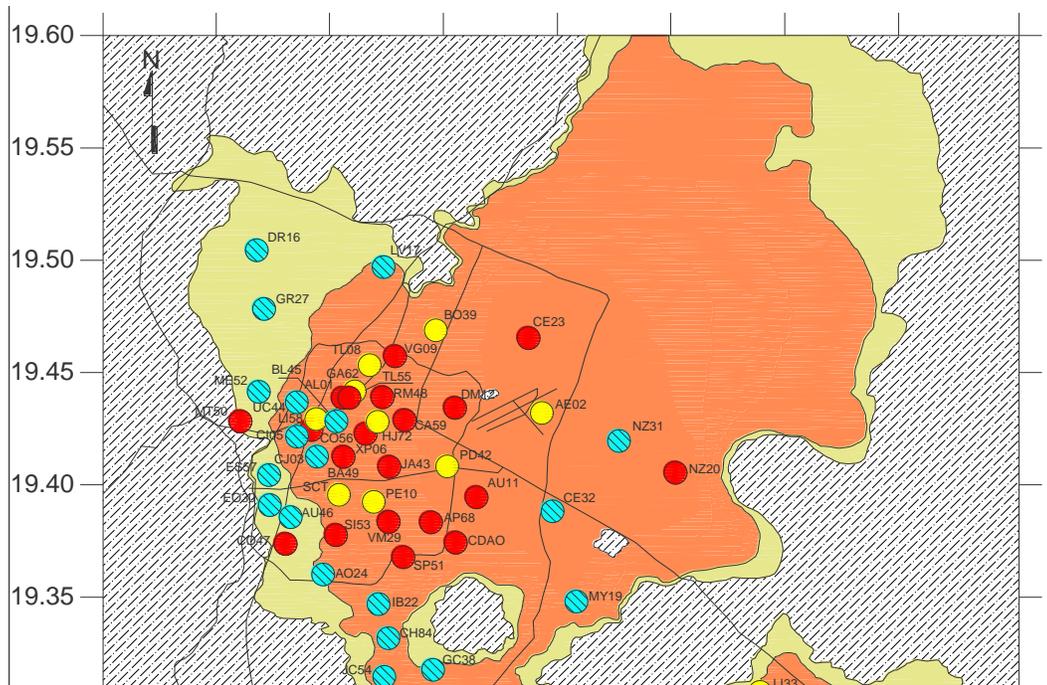


Figura 10 Variación de Ts en cada estación.
 < 10% en ambas componentes, en una componente y > 10% en ambas componentes.

5.2 VARIACIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DEL TERRENO

A continuación se muestran los resultados de la variación de la amplificación dinámica del terreno con el tiempo para las mismas estaciones que fueron consideradas anteriormente. Los eventos considerados se encuentran consignados en la Tabla 2.

La Figura 11 muestra la citada variación en las componentes NS y EW; estos valores se obtienen con respecto al periodo dominante del terreno (T_s), es decir, los puntos representan el valor de la amplificación máxima donde se encuentra el T_s .

Se aprecia que para los sitios que se muestran, la consistencia en los resultados es bastante buena y se tiene poca o muy poca dispersión en los datos, en especial en los sitios ubicados en zona de transición. Las amplitudes de todos los sitios son menores de 40.

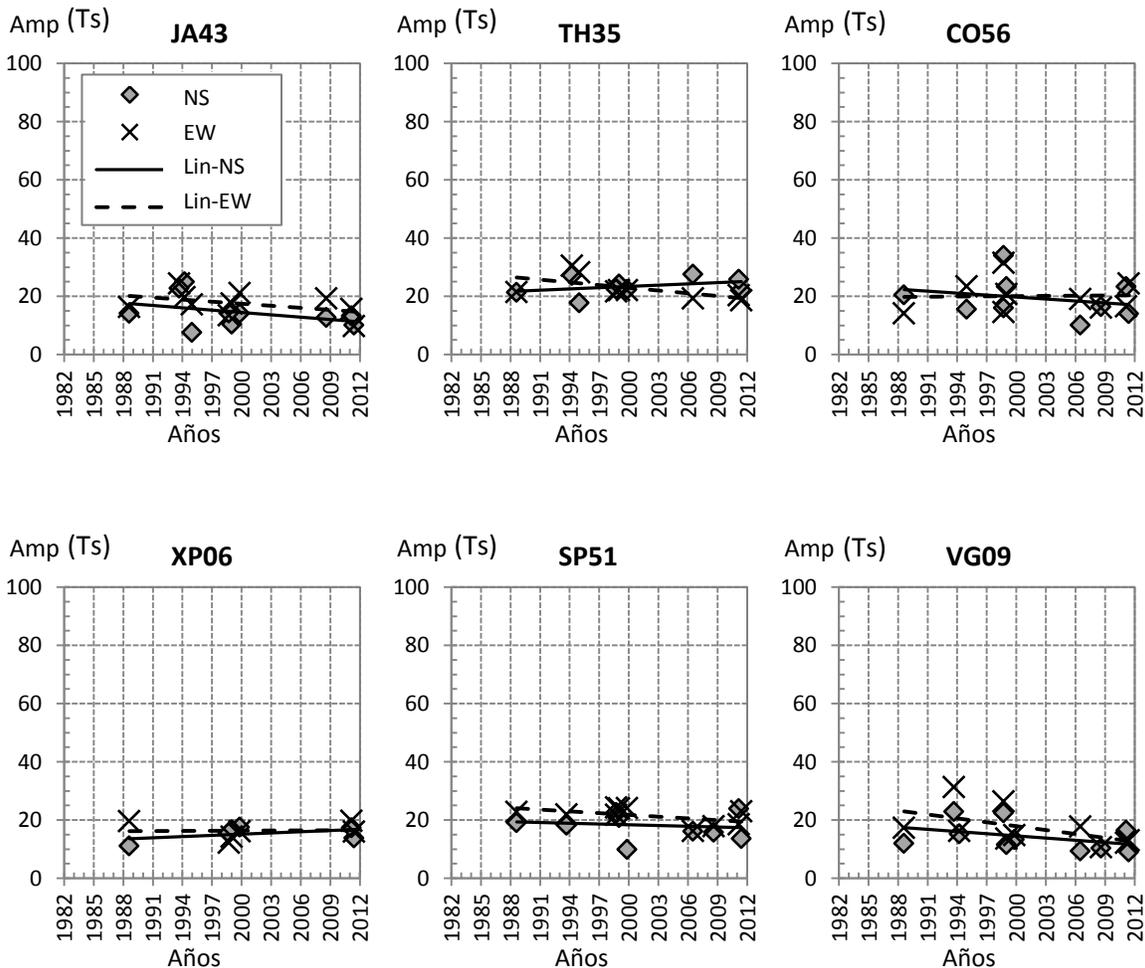


Figura 11 Gráficas de la amplificación dinámica del terreno (Amp) en función del tiempo para sitios en zona de lago con poca dispersión.

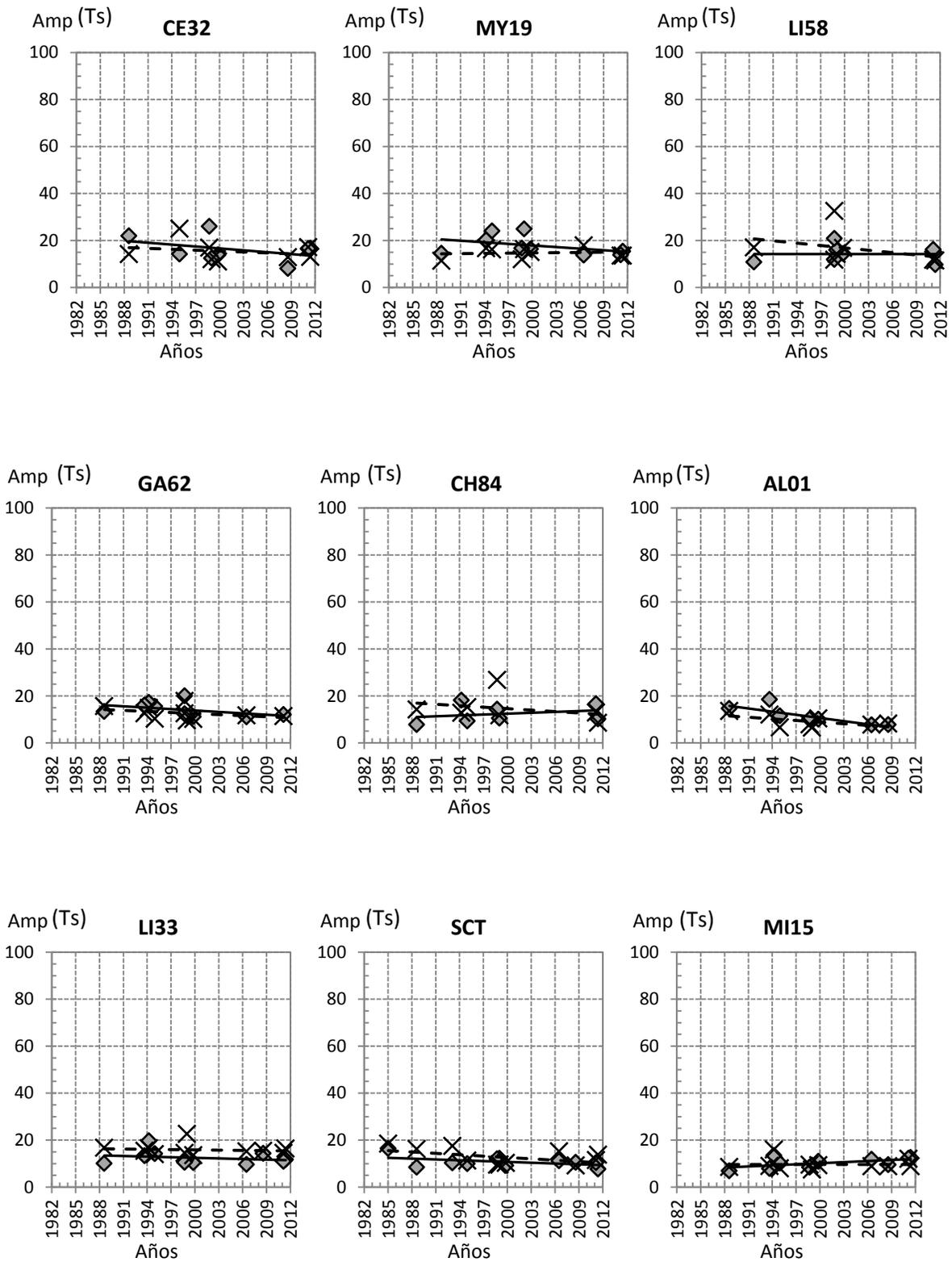


Figura 11 Continúa

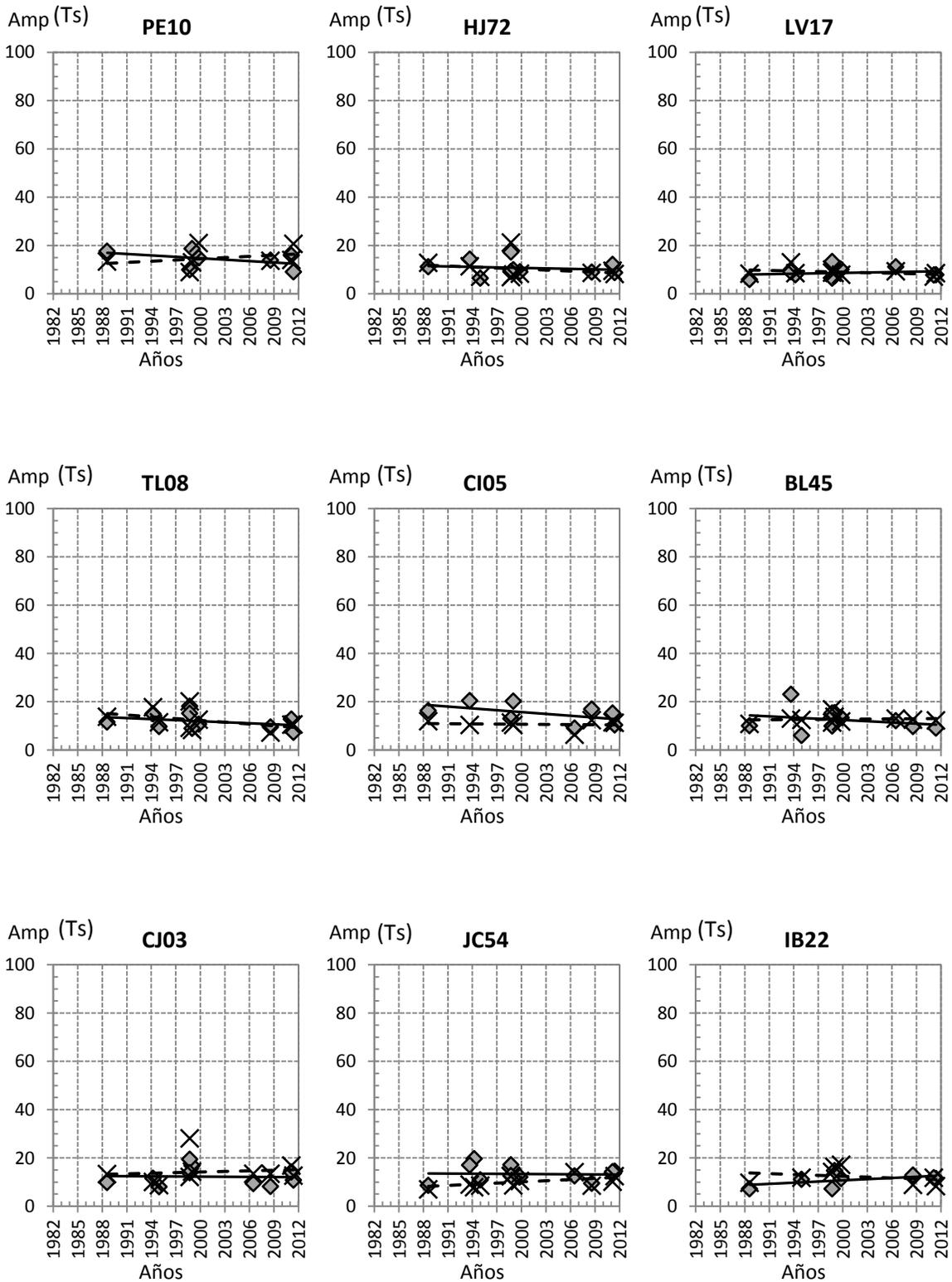


Figura 11 Continúa

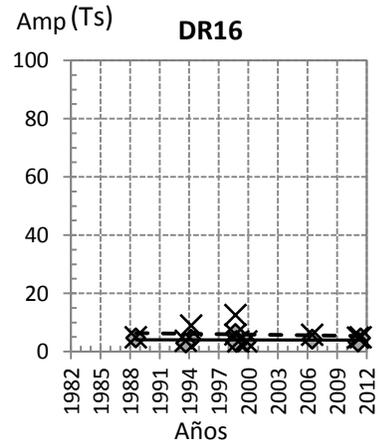
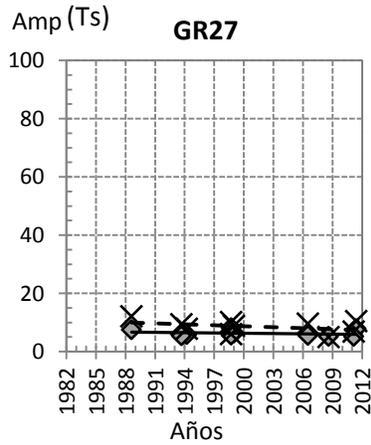
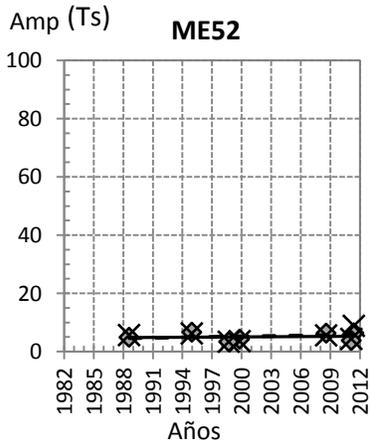
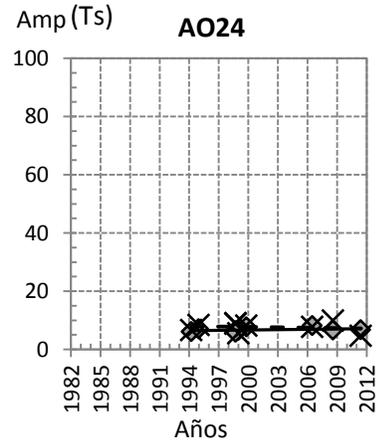
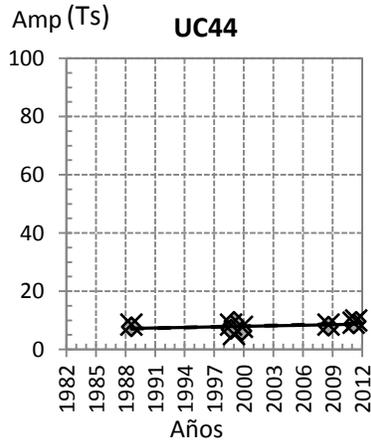
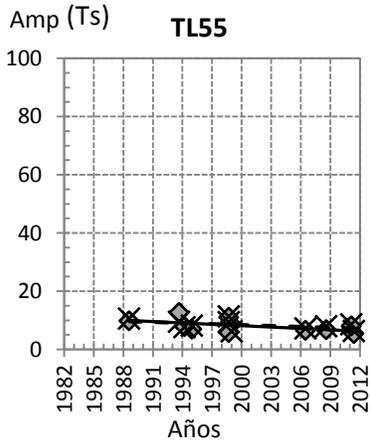
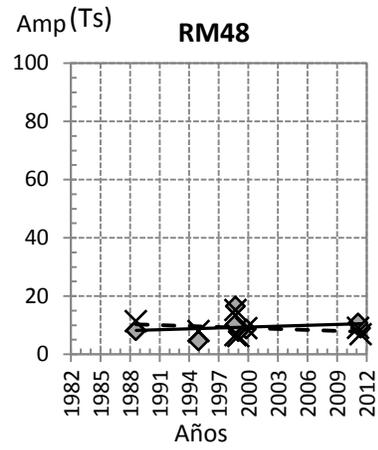
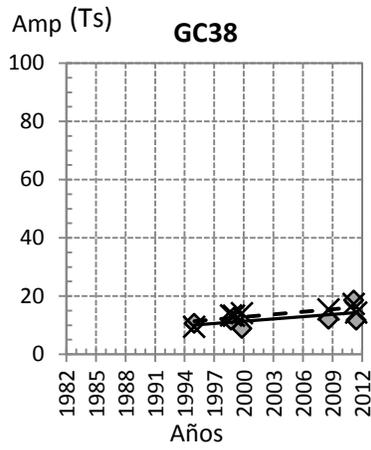
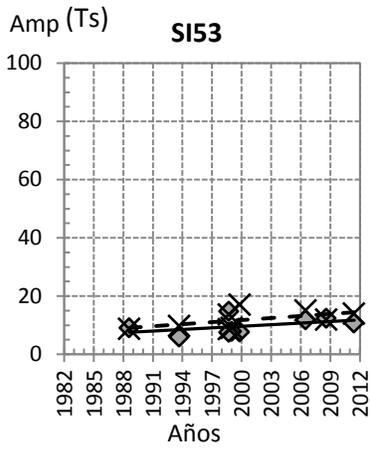


Figura 11 Continúa

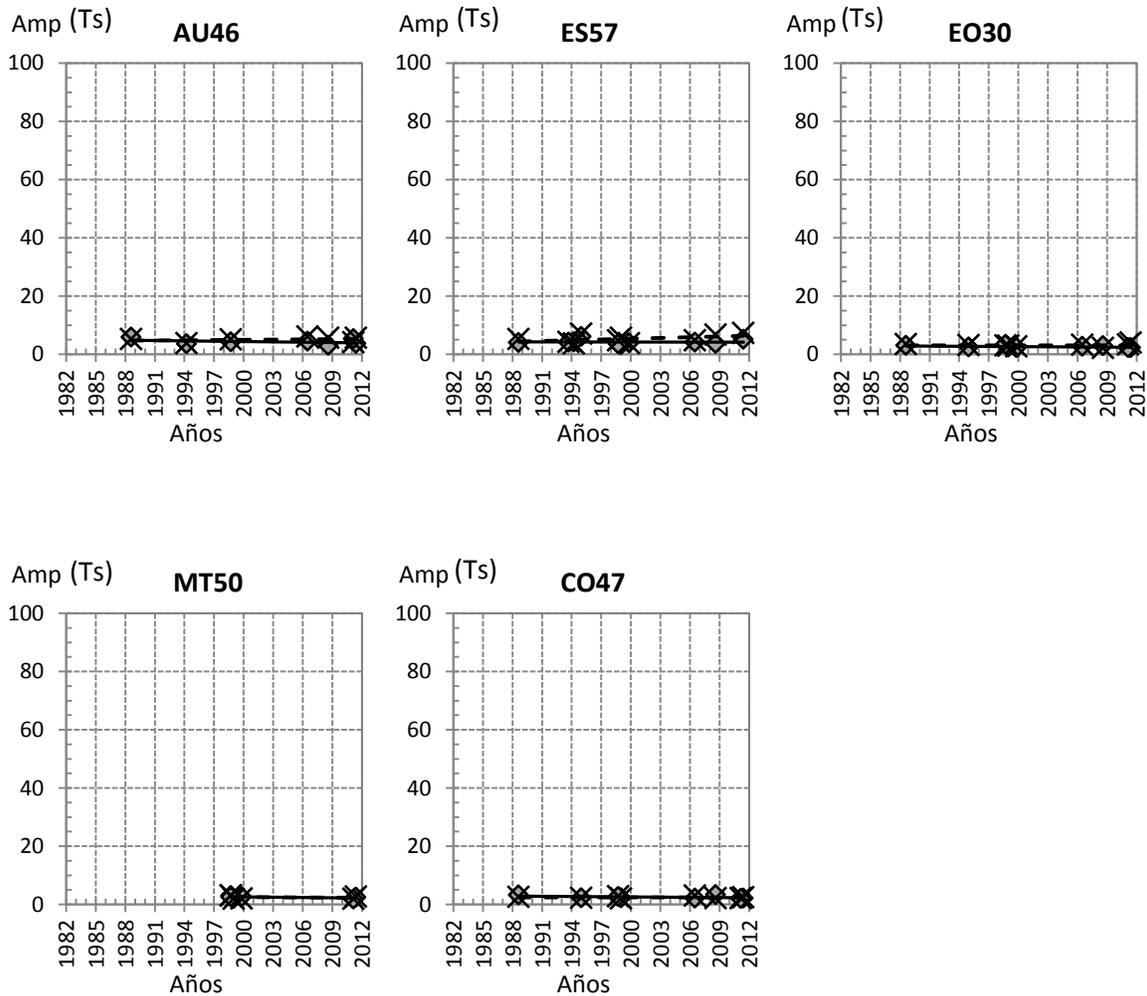


Figura 11 Continúa

En las gráficas de la figura anterior puede apreciarse que en los sitios donde la tendencia de la amplificación dinámica del terreno tiene una amplitud menor de 15, no hay prácticamente ninguna variación en el tiempo, es el caso de las estaciones TL55, UC44, AO24, ME52, GR27, DR16, AU46, ES57, EO30, MT50 y CO47.

En la Figura 12 se muestran otros resultados de la variación de la amplificación pero con mayor dispersión que en el caso anterior. Los sitios que se encuentran sobre la zona del lago profundo son lo que mayor acentuado tiene este fenómeno; éstos son NZ31, XO36, AE02, NZ20, AU11, PD42.

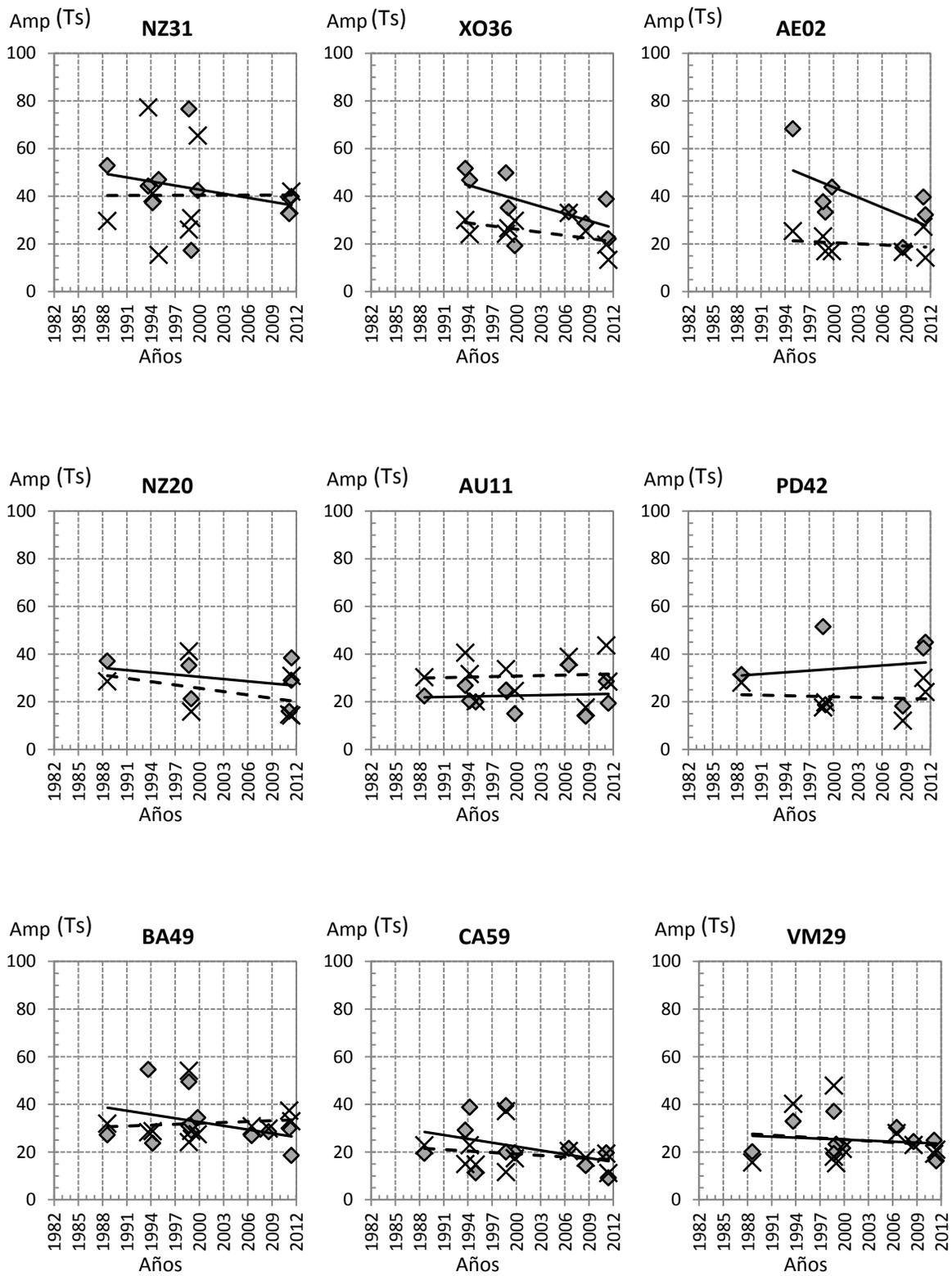


Figura 12. Gráficas de la amplificación dinámica del terreno (Amp) en función del tiempo para sitios en zona de lago con gran dispersión.

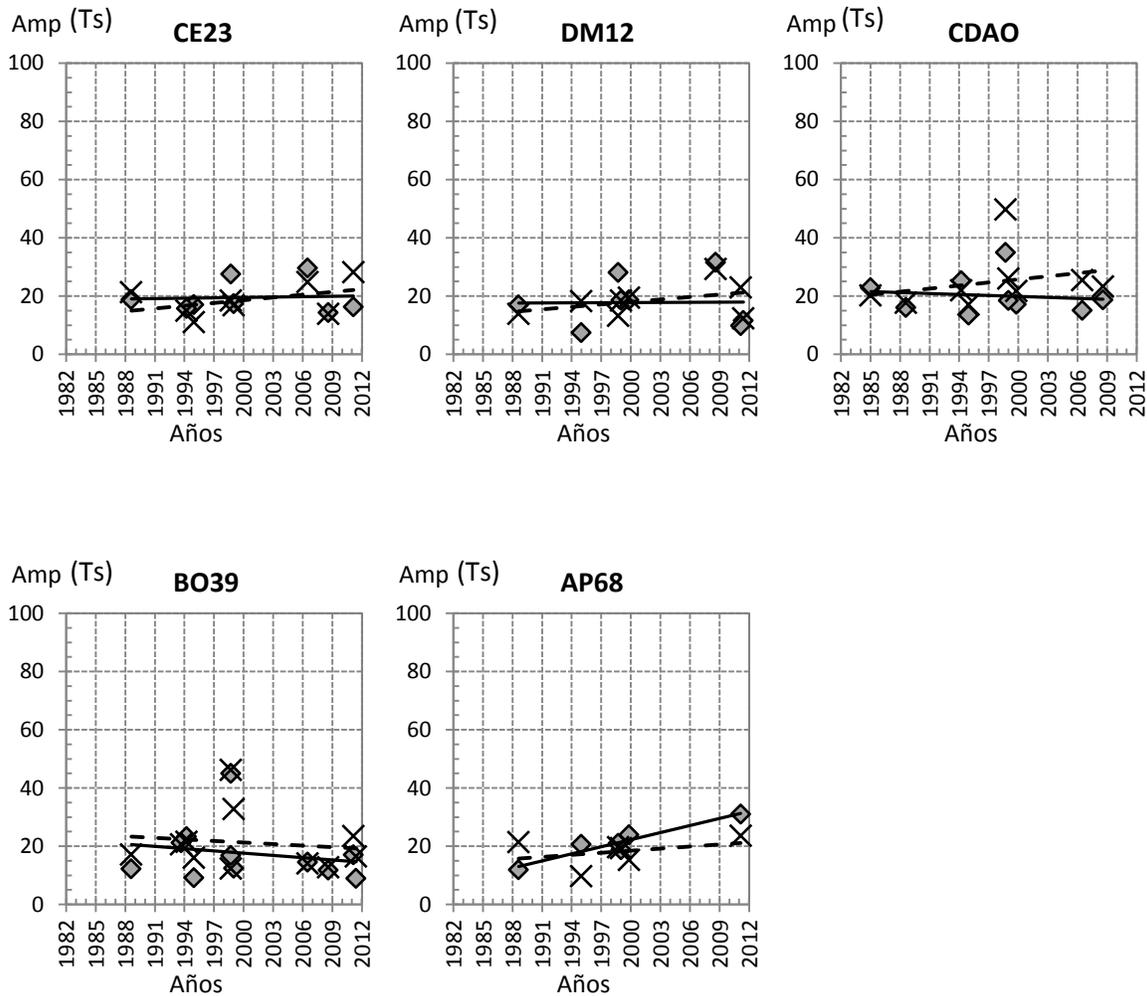


Figura 12 Continúa

De acuerdo a las gráficas anteriores, se realizó una figura en donde se aprecia la variación de la amplificación dinámica del terreno en cada una de las estaciones. En la Figura 13 puede observarse como en la zona de transición la tendencia de los resultados es muy estable, es decir, la amplificación permanece prácticamente constante en el tiempo con valores muy pequeños; lo anterior es predecible por la cercanía a la zona de terreno firme. Asimismo, hay una serie de estaciones en zona de lago que presentan una cierta dispersión pero que mantienen una tendencia en los resultados. Por último, las estaciones que tienen una gran dispersión y no exhiben una tendencia definida son en su mayoría las que se encuentran en la zona del lago profundo o en sus inmediaciones, es decir, en Xochimilco, Nezahualcóyotl y el aeropuerto; en estos sitios las amplitudes son mayores y por lo tanto hay más susceptibilidad a cometer errores, ya sea por el ruido presente en la señal o por los cocientes espectrales.

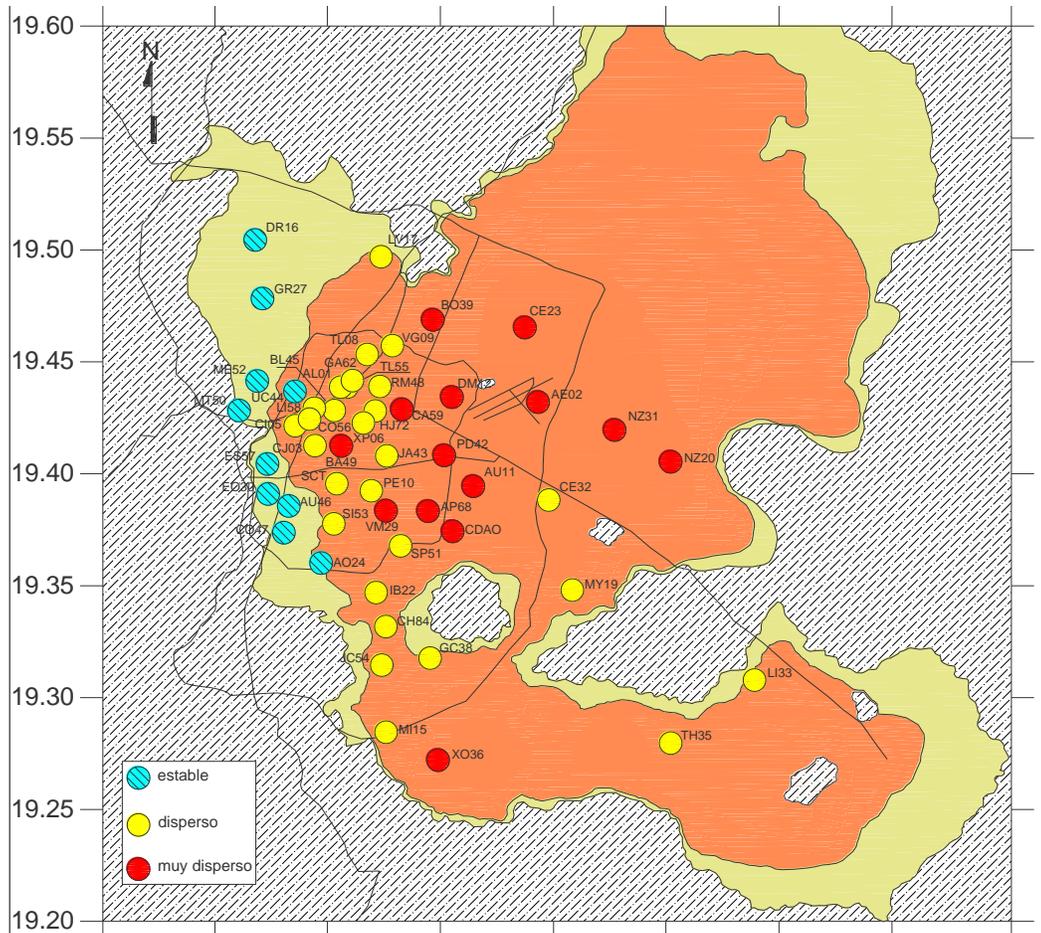


Figura 13 Variación de la amplificación dinámica del terreno en cada estación. Estable, disperso (con tendencia) y muy disperso (sin tendencia)

5.3 COMPARACIÓN RESULTADOS VARIACION DEL PERIODO DEL SUELO Y LA AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DEL TERRENO

La Tabla 4 muestra los resultados para cada estación de la variación del periodo dominante del suelo (ΔT_s) y la amplificación dinámica del terreno en donde se produce dicho periodo $\Delta \text{Amp}(T_s)$, para las componentes NS y EW. El signo negativo (-) significa que se produjo una reducción en el parámetro, mientras que la ausencia de él significa que hubo un incremento. El símbolo $\text{Amp}(T_s)_{\text{max}}$ significa la amplificación máxima del terreno que se encontró en la estación de consideración.

Estación	NS			EW		
	ΔTs (s)	$\Delta Amp(Ts)$	Amp(Ts)max	ΔTs (s)	$\Delta Amp(Ts)$	Amp(Ts)max
JA43	-0.41	-6.04	17.48	-0.40	-5.34	20.16
TH35	-0.07	3.29	25.05	0.44	-7.10	26.45
CO56	-0.23	-5.11	22.27	-0.21	0.51	20.32
XP06	-0.63	3.09	16.69	-0.48	0.28	16.47
SP51	-0.36	-1.99	19.40	-0.31	-4.59	24.09
VG09	-0.49	-5.77	17.45	-0.26	-10.15	22.94
CE32	-0.10	-6.11	19.65	-0.10	-2.98	16.95
MY19	-0.12	-5.14	20.42	-0.17	-0.74	15.06
LI58	-0.09	-0.06	14.26	-0.27	-7.69	20.72
GA62	-0.30	-4.44	16.04	-0.16	-3.45	14.26
CH84	-0.12	2.85	13.94	-0.11	-4.65	16.94
AL01	-0.16	-8.98	15.81	-0.21	-4.58	11.51
LI33	-0.45	-2.01	13.47	-0.12	-0.91	16.35
SCT	-0.28	-3.12	12.53	-0.09	-5.15	15.50
MI15	-0.15	3.47	11.89	-0.07	0.05	9.65
PE10	-0.16	-4.49	16.98	-0.35	3.87	16.44
HJ72	-0.23	-1.48	11.45	-0.46	-3.11	11.77
LV17	-0.04	1.29	9.28	-0.13	-1.80	9.86
TL08	-0.20	-3.35	13.61	-0.30	-5.67	15.07
CI05	-0.04	-5.74	18.59	-0.11	-0.54	10.99
BL45	-0.16	-3.88	14.34	-0.22	-0.60	13.05
CJ03	-0.26	-0.42	12.43	-0.19	1.87	15.11
*JC54	-0.05	-0.42	13.58	-0.05	3.75	11.94
IB22	-0.12	3.64	12.55	-0.11	-2.76	13.79
SI53	-0.07	4.14	11.69	-0.17	5.33	14.47
*GC38	-0.09	4.18	14.30	-0.09	4.78	16.15
RM48	-0.33	2.22	10.49	-0.58	-2.59	10.33
TL55	-0.36	-3.63	10.02	-0.45	-2.41	9.68
*UC44	-0.01	1.51	8.70	-0.06	1.77	8.89
*AO24	-0.01	0.65	7.17	-0.01	-0.78	7.97
*ME52	-0.01	0.38	5.25	-0.18	1.25	5.86
*GR27	0.00	-0.68	6.65	-0.02	-2.51	9.97
*DR16	0.00	-0.12	4.08	-0.02	-0.99	6.33
*AU46	-0.02	-0.88	4.84	-0.07	-0.57	5.29
*ES57	-0.04	-0.04	4.23	-0.07	1.95	6.34
*EO30	-0.02	0.46	2.91	-0.06	0.06	3.12
*MT50	-0.08	0.42	2.59	-0.06	0.27	2.57
*CO47	-0.06	0.55	2.84	-0.06	0.06	2.48
NZ31	-0.07	-13.01	49.28	-0.26	0.29	40.60
XO36	-0.46	-17.66	45.01	-0.36	-7.72	28.95
AE02	-0.37	-23.15	50.88	-0.56	-2.59	21.33
NZ20	-0.58	-7.12	34.02	-0.38	-10.60	31.00
**AU11	-0.78	1.44	23.28	-0.61	-1.65	31.65
PD42	-0.31	5.40	36.50	-0.44	-1.79	22.97
BA49	-0.53	-12.09	38.63	-0.61	2.86	33.50
CA59	-0.51	-12.26	28.44	-0.60	-4.65	21.52
VM29	-0.57	-3.12	26.76	-0.44	-4.67	27.59
**CE23	-0.82	1.03	20.07	-0.54	7.18	22.13
**DM12	-0.60	-0.30	17.94	-0.83	6.45	21.26
**CDAO	-0.78	-2.54	21.51	-0.70	8.26	28.74
BO39	-0.31	-5.83	20.52	-0.23	-3.99	23.30
AP68	-0.51	18.21	31.25	-0.47	5.27	21.08

Tabla 4 Resultados de la variación de Ts y de Amp(Ts)

Los resultados anteriores muestran que no hay una relación directa del cambio del periodo del suelo con la variación de la amplificación dinámica del terreno. Cuando se presentan grandes variaciones en T_s (CE23, CDAO, DM12, AU11) no ocurre lo mismo con $Amp(T_s)$. Por otro lado cuando T_s se mantiene prácticamente constante (JC54, GC38, UC44, AO24, ME52, GR27, DR16, AU46, ES57, EO30, MT50, CO47) las amplificaciones son relativamente pequeñas y prácticamente se mantienen constantes, en la mayoría de los casos es porque nos encontramos en zona de transición.

Se esperaría que a medida que disminuya el T_s la amplificación dinámica disminuya también, ya que partimos de un modelo de estrato unidimensional, pero en algunos casos la $Amp(T_s)$ tiende a aumentar, lo cual nos habla de la inconsistencia de los resultados. Es importante aclarar, que el periodo del suelo y la amplificación no fueron calculados con los mismos criterios.

5.4 EVALUAR EFECTO DE SITIO

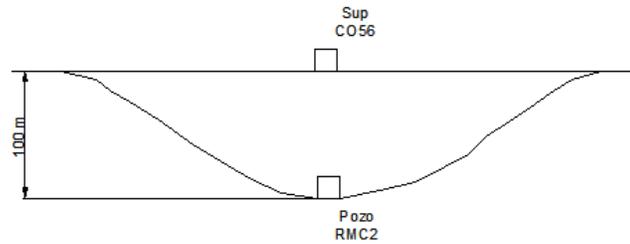
Los resultados que se presentan en las hojas anteriores nos mostraron como por medio de registros de movimientos fuertes en estaciones ubicadas en superficie es posible determinar los efectos de sitio que se presentan en distintas zonas de la ciudad de México. Pero las estaciones ubicadas en pozos también nos dan información importante para conocer los efectos de amplificación que se generan. Por lo anterior, se toma una estación de pozo de referencia para realizar cálculos que nos permitan conocer el fenómeno.

La estación elegida es RMC2 la cual se encuentra a 102 m de profundidad localizada en el parque Aurora en la colonia Roma Norte en la ciudad de México. La estación más cercana en superficie que contiene los suficientes datos es CO56 (ver Figura 14 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), la cual se encuentra cerca del parque Rio de Janeiro en la misma colonia. La distancia horizontal entre estos dos sitios es de 560 m.



Figura 14 Localización estaciones CO56 y RMC2

El procedimiento es el siguiente, se calculan las funciones de transferencia para CO56 tomando como referencia RMC2 para ambas componentes, y luego se obtiene la resultante. Por otro lado se obtiene para cada dirección el cociente entre la componente horizontal correspondiente y la componente vertical (H/V), el cual es un indicador cualitativo de la amplificación. Finalmente, se comparan los resultados de las dos técnicas.



$$|H(\omega)| = \frac{|A(\omega)_{NS,EW}|_{CO56}}{|A(\omega)_{NS,EW}|_{RMC2}}$$

$$\frac{H}{V} = \frac{|A(\omega)_{NS,EW}|_{RMC2}}{|A(\omega)_V|_{RMC2}}$$

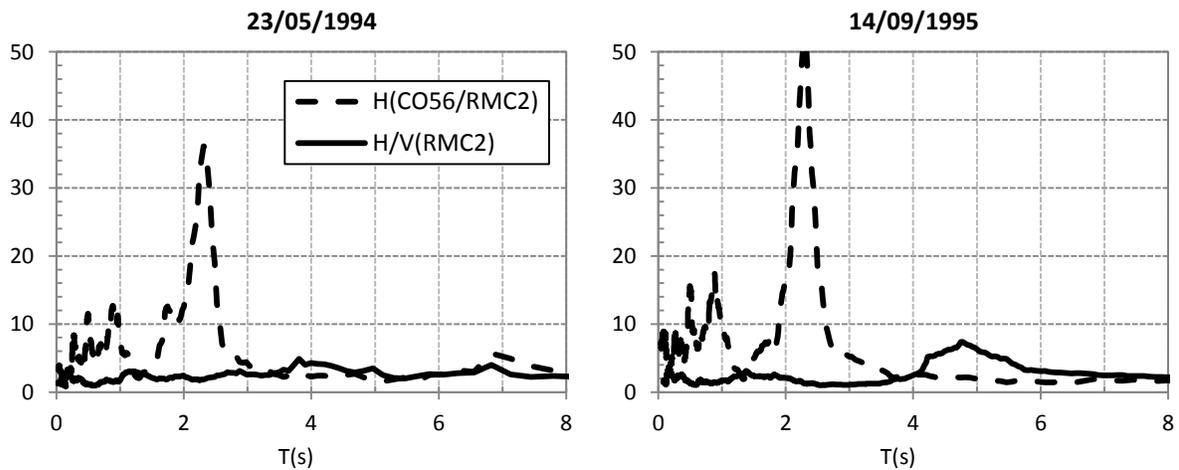


Figura 15 Amplificación dinámica resultante H y H/V

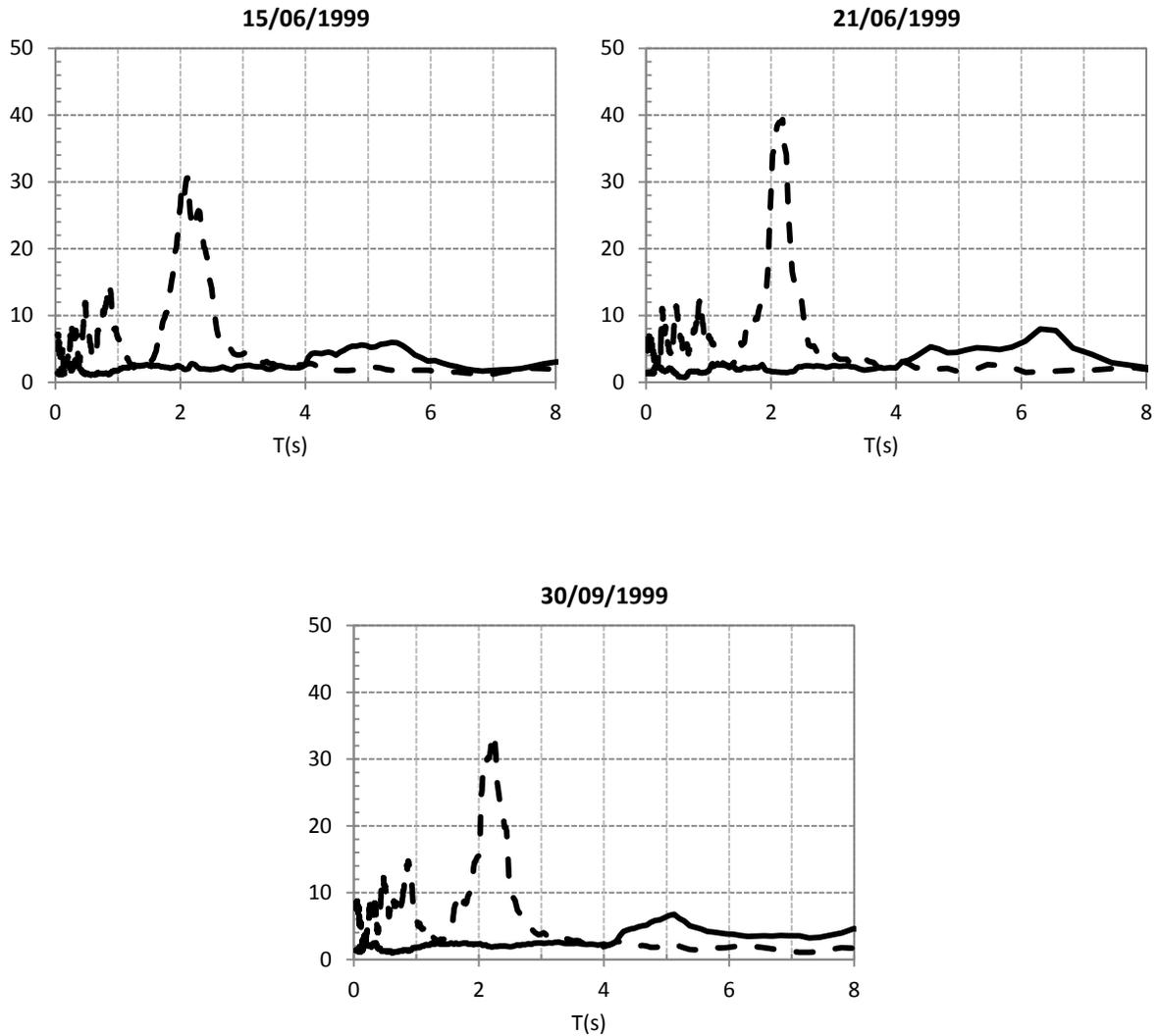


Figura 15 Continua

La figura anterior muestra los resultados empleando las dos técnicas mencionadas, la línea punteada representa la función de transferencia calculada entre la estación de superficie y la de pozo; mientras que la línea sólida representa el cociente entre la componente horizontal vs la componente vertical. Los resultados corresponden a la resultante de las componentes horizontales.

De la Figura 15 puede apreciarse la amplificación que tiene el estrato de suelo de 100 m de espesor, identificándose claramente un periodo de amplificación. Si comparamos estos resultados con los consignados en la Figura 7 puede verse que el periodo oscila entre $T_s = 2.2 - 2.0$ s, con lo cual los cálculos son consistentes.

6. CONCLUSIONES

De los análisis anteriores se comprueba la variación que presenta tanto el periodo dominante del suelo (T_s) como la amplificación dinámica del terreno. En el caso de T_s la variación en algunos de los sitios es bastante clara, presentándose una disminución en más del 10% del valor que se tiene establecido. El parámetro T_s es el que más fácil puede relacionarse en el diseño estructural ya que como advertimos anteriormente, en el código de construcciones del Distrito Federal (NTC-DF 2004) se encuentra un mapa de periodos dominantes del suelo. Varios estudios han recalculado dichos mapas, pero todavía no se han modificado los consignados en las normas, algo que debe hacerse para que los valores correspondan a los actuales.

En la Figura 10 se muestra como la mayor variación de T_s se presenta dentro del circuito interior Bicentenario (una de las principales vialidades de la ciudad de México) y en sus inmediaciones. En la zona de transición las variaciones son muy pocas así como los sitios que están cerca de este límite; resaltan las estaciones CO47 y MT50 (ver Figura 1) en donde hay una disminución mayor del 10% de T_s . La zona del lago profundo, es decir, donde T_s es mayor de 4s, se localiza en los alrededores del aeropuerto internacional Benito Juárez y en el lago de Xochimilco; estaciones como AU11, CE23 y XO36 tienen una reducción mayor del 10%, mientras que AE02 sólo presenta una variación mayor del 10% en una componente (EW); CE32 y NZ31 no exhiben variaciones considerables.

Observando las tendencias del periodo dominante del suelo en los sitios donde la reducción es claramente apreciable, es de esperarse que esta disminución continúe de la misma manera con el paso de los años, o por lo menos en el futuro próximo.

La disminución de T_s que se presenta en este documento concuerda con resultados obtenidos por estudios que aquí se citan y en donde la causa de esta variación probablemente es la extracción de agua para el consumo humano de mantos acuíferos subterráneos localizado en el valle de México.

Se comprobó que la variación de T_s no depende significativamente de la calidad de los registros sísmicos, es decir, el periodo dominante del terreno es bastante constante de un sismo a otro para una estación determinada, y a pesar de que el registro tenga cierto nivel de ruido puede observarse con claridad el cambio de T_s . Para la amplificación dinámica del terreno no sucede lo mismo, ya que es necesario tener acelerogramas lo suficientemente legibles para que la ordenada del espectro de Fourier no se vea afectada por el ruido presente en la señal y así se pueda observar el comportamiento adecuado.

Los resultados de la amplificación dinámica muestran que los sitios ubicados en zona de transición y algunos ubicados en las cercanías tienen valores muy estables con una tendencia a permanecer constante; mientras que las estaciones localizadas en la zona del lago profundo y algunas de los alrededores, presentan grandes dispersiones por lo que no hay una tendencia claramente definida.

Hay una serie de sitios que a pesar de contar con cierta dispersión, puede observarse una tendencia a mantenerse constante o a disminuir un poco, pero no esta del todo claro.

Las pruebas de vibración ambiental (VA) son necesarias para realizar el seguimiento a la problemática planteada aquí, por lo que deben realizarse con relativa frecuencia en diferentes zonas de la ciudad de manera que las variaciones del periodo dominante del terreno y de la amplificación dinámica se logren determinar y puedan modificarse los parámetros necesarios para el correcto comportamiento de las estructuras ante movimientos sísmicos. Han sido varios los estudios que encontraron por medio de VA reducciones de T_s en diferentes zonas de la ciudad (Lermo, J. *et al.* 1994; Martínez-Gonzales *et al.* 2001; Arroyo, D. *et al.* 2013). En esta investigación no se muestran sus resultados debido a que son varias las estaciones que no tienen información al respecto o sólo se han realizado pruebas en los años recientes; adicionalmente, los estudios citados anteriormente han realizado la comparación entre las dos técnicas, SSR y VA.

Un aporte de esta investigación es el desarrollo del software llamado ADITER, por medio de esta herramienta computacional puede mantenerse un monitoreo a la variación de los parámetros que se anteriormente se mencionan, ya que actualmente este tipo de procedimientos se realizan de forma manual volviéndose demasiado tediosos los cálculos y estando preso de cometer errores en el proceso. Adicionalmente, el programa puede usarse para descargar registros sísmicos que se encuentren en la base de datos.

REFERENCIAS

- Aguilar, H. R., Galicia M., Pérez-Rocha, L. E., Avilés, J., Vieitez, L., Salazar, M. (2003). Efecto del hundimiento regional en las propiedades dinámicas del suelo, XII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones.
- Arroyo, D., Ordaz, M., Ovando-Shelley, E., Guasch, J. C., Lermo, J., Pérez, C., Alcántara, L., Ramírez-Centeno, M. S. (2013). *“Evaluation of the change in dominant periods in the lake-bed zone of Mexico City produced by ground subsidence through the use of site amplification factors”*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 44, pp 54-66.
- Avilés, J. and Pérez-Rocha, L. E. (1998). *“Site effects and soil-structure interaction in the Valley of Mexico”*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 17, pp. 29-39.
- Avilés, J. and Pérez-Rocha, L. E. (2010). *“Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response”*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, pp. 981-989.
- Bard, P.-Y., Campillo, M., Chávez-García, F. J., Sánchez-Sesma, F. (1988). *“The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – A Theoretical Investigation of Large – and Small – scale Amplification Effects in the Mexico City Valley”*, Earthquake Spectra, 4, 3, pp. 609-633.
- Castro, R., Singh, S. K., Mena, E. (1988). *“The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – An Empirical Model to Predict Fourier Amplitude Spectra of Horizontal Ground Motion”*, Earthquake Spectra, 4, pp. 675-685.
- Lermo, J. and Chávez-García, J. (1993). *“Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with only one station”*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 83, No. 5, pp. 1574-1594.
- Lermo, J. and Chávez-García, F. J. (1994). *“Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records”*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 13, pp. 413-423.

- Limaymanta, F. M. (2009). *“Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtemores para la clasificación de terremotos con fines de diseño sísmico. Aplicación en las ciudades de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco.”* Tesis maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de México (UNAM).
- Martínez-González, J., Lermo, J., Ismael, E., Angulo, J. (2011). “Efectos del hundimiento regional en los cambios de periodo dominante del suelo de la cuenca de México: Propuesta de nuevos mapas para las normas técnicas complementarias para diseño por sismo (NTCDS)”, Memorias XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- NTC-DF TII (2004). Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Tomo II, Normas Técnicas para el Diseño por Sismo, Apéndice A.
- Ordaz, M., Singh, S.K., Reinoso, E., Lermo, J., Espinosa, J.M. and Domínguez, T. (1988). *“The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – Estimation of Response Spectra in the Lake Bed Zone of the Valley of Mexico”*, Earthquake Spectra, 4, 4, pp. 815-834.
- Ordaz, M. and Singh, S. K. (1992). *“Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, an evidence of amplification in the hill zone of Mexico City”*, Bulletin of the Seismological Society of America, 82, 1, pp. 24-43.
- Ovando-Shelley, E., Romo, M. P., Contreras, N., Giralt, A. (2003). *“Effects on soil properties of future settlements in downtown Mexico City due to ground water extraction”*, Geofísica International, 42(2), pp. 185-204.
- Ovando-Shelley, E., Ossa, A., Romo, M. P. (2007). *“The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response”*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, pp. 333-343.
- Pérez-Rocha, L. E. (1998). *“Respuesta sísmica estructural: Efectos de sitio e interacción suelo-estructura (Aplicaciones al valle de México)”*, Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de México (UNAM).
- Reinoso, E. (1991). Efectos sísmicos locales en el valle de México: Amplificación medida en la zona lacustre, Memorias IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, México, 2, pp. 224-236.

- Reinoso, E. (1995). Características sísmicas de la ciudad de México: Amplificación de las ondas sísmicas en el valle de México, características del movimiento del terreno y microzonificación de la ciudad, Curso sobre seguridad sísmica de las construcciones para directores de obra, México, México D.F., Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), febrero, pp. 53-82.
- Reinoso, E. and Ordaz, M. (1999). *"Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings"*, Earthquake Spectra, 15, 2, pp. 273-295.
- Reinoso, E. and Ordaz, M. (2001). *"Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to rupture area and dominant site period"*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, pp. 653-673.
- Reinoso, E. (2002). Scattering of Seismic Waves: Applications to the México City Valley (Advances in Earthquake Engineering), WIT Press 2002.
- Rosenblueth, E., Ordaz, M., Sánchez-Sesma, F.J., Singh, S. K. (1989). *"The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – Design Spectra for Mexico's Federal District"*, Earthquake Spectra, 5, pp. 273-291.
- Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., y León, E. (2005) *"Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México"*, Publicaciones Empresas TGC, México.
- Santoyo, E. (2007). *"Historia y actualidad del hundimiento regional de la ciudad de México"*, Publicaciones Empresas TGC, México.
- Singh, S. K., Lermo, J., Domínguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J. M., Mena, E., Quaas, R. (1988 a). *"The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - A study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site"*, Earthquake Spectra, 4, pp. 653-673.
- Singh, S. K., Mena, E., Castro, R. (1988 b). *"Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacán earthquake and ground motion amplification in the near Mexico city from strong motion data"*, Bulletin of the Seismological Society of America, 78, 2, pp. 451-477.
- Singh, S. K. and Ordaz, M. (1993). *"Strong motion seismology in Mexico"*, Tectonophysics, 218, pp.43-57.

7 ANEXOS:

7.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

Como se mencionó anteriormente el software se llama **ADITER** y está diseñado en Microsoft Visual Basic 2010 Express. En la Figura 16 se puede apreciar el diagrama de flujo que sigue el programa, a pesar de que es muy sencillo representa de una manera adecuada cuál es el camino que sigue el software.

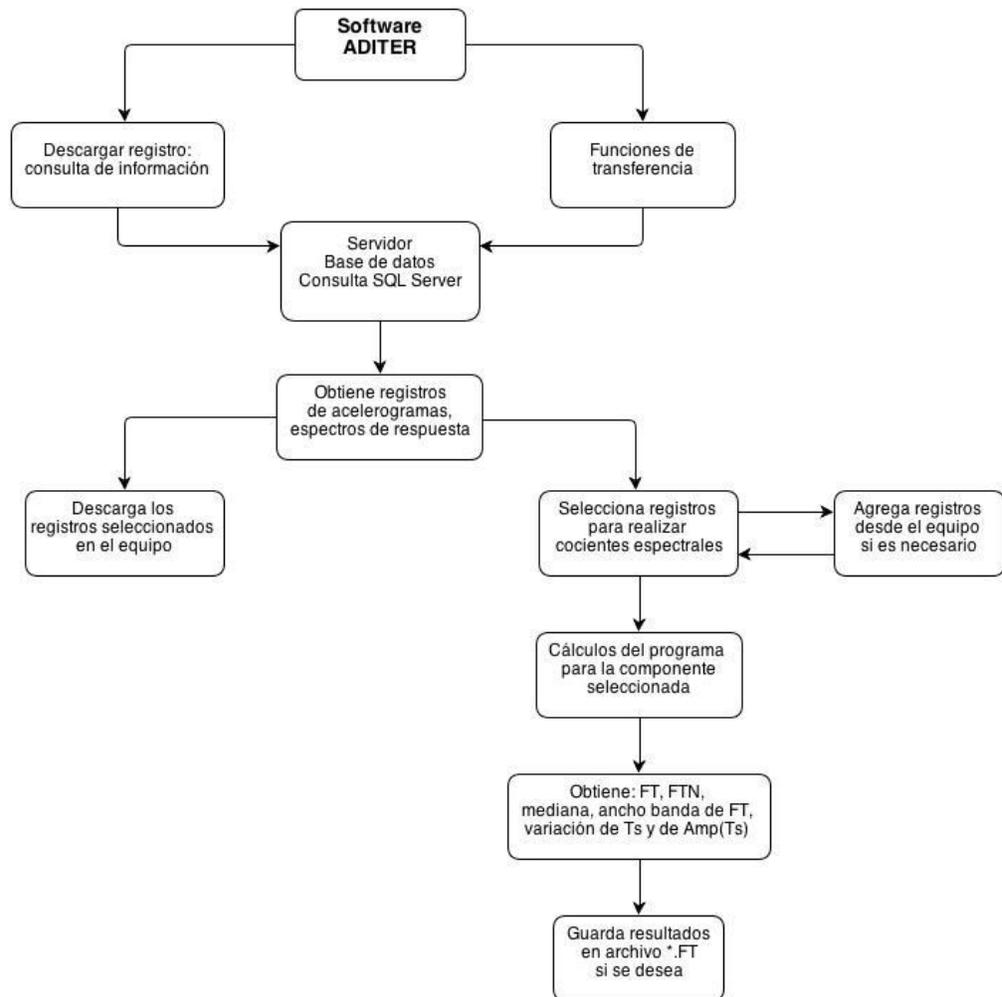


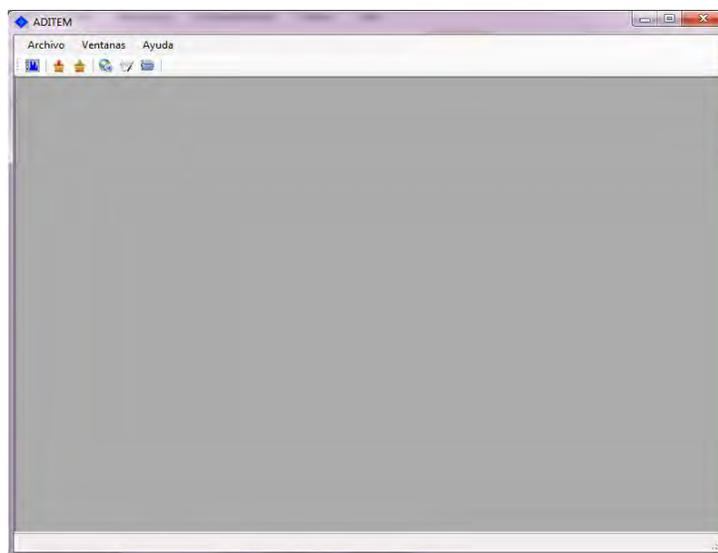
Figura 16 Diagrama de flujo del software

Como se puede apreciar de la figura anterior, la aplicación obtiene la información por medio de una consulta en SQL Server; una base de datos con toda la información alojada en un servidor el cual se encuentra conectado a internet permite realizar dicha consulta. De esta manera el operador del servidor es el único que tiene el control de la información por lo que puede adicionar o eliminar nuevos registros según sea el caso. Esta forma de estructuración del programa permite que en cualquier momento se pueda actualizar la base de datos sin que sea necesario volver a depurar la aplicación. Es importante aclarar que es necesaria una conexión a internet constantemente para que el software pueda realizar las consultas, descarga y cálculos correspondientes. El software podría utilizarse sin internet sólo si se cuenta con los registros necesarios en alguna ubicación de la computadora.

A continuación se explicará brevemente cual es el funcionamiento y que hace cada uno de los procesos de esta aplicación.

7.1.1 MODO DE USO

Cuando abra el programa se mostrará la ventana principal de la aplicación, en ella encontrará habilitados los botones de minimizar, maximizar tamaño y cerrar, usuales de las aplicaciones de Microsoft Windows, así como los botones “Abrir Sesión”, “Descargar Archivo” y “Funciones de Transferencia”, los cuales también se encuentran contenidos en el menú “Archivo”.



Ventana principal de la aplicación.

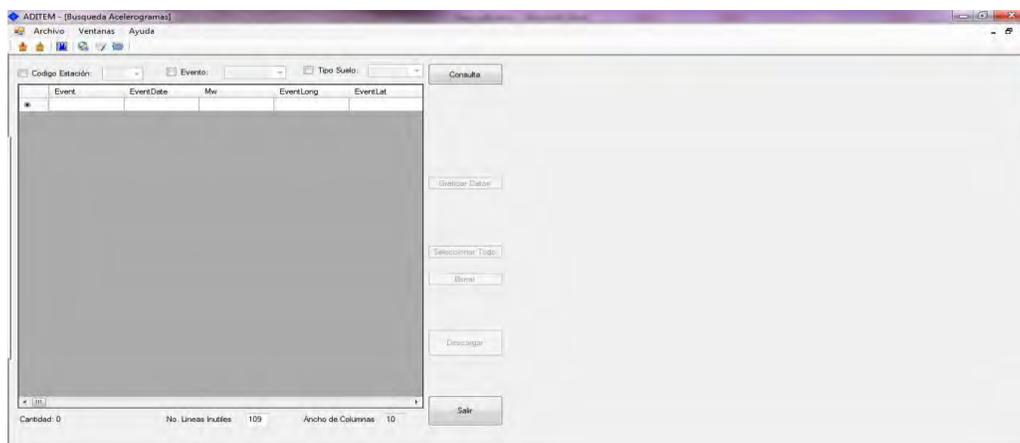
7.1.1.1 Abrir Sesión

Este botón nos permite abrir una sesión que ha sido previamente guardada en cualquier parte de nuestro disco duro o fuera de él. El formato de los archivos de inicio de sesión es (*.FT). Este botón es

de mucha ayuda cuando no ha sido posible terminar de realizar los cálculos y la cantidad de ellos es bastante considerable.

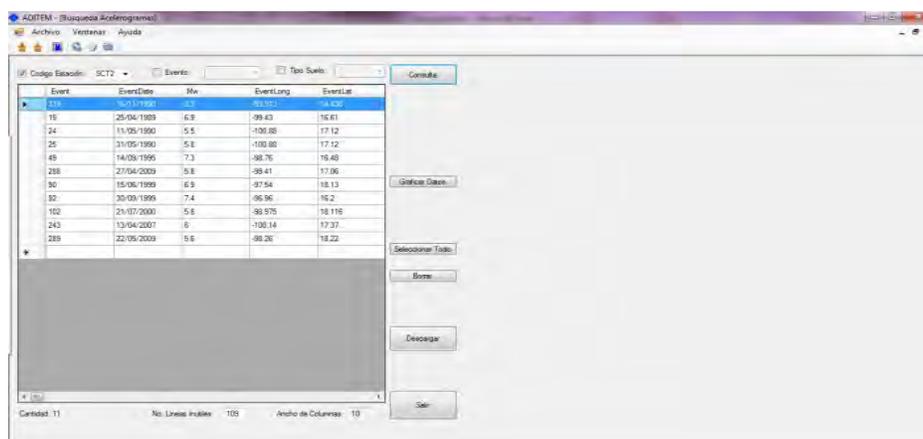
7.1.1.2 Descargar Archivo

Por medio de este botón podemos entrar en la base de datos y descargar cualquier registro que se encuentre contenido en ella. La búsqueda puede realizarse de tres maneras: por código de la estación, por evento ó por tipo de suelo. En este punto sólo se encuentran habilitados los botones de “Consultar” y “Salir”.



Descargar archivo

Una vez seleccionado el tipo de búsqueda pueden apreciarse los registros que se encuentran en la base de datos para el parámetro elegido, así como una serie datos propios de la estación, el evento y el registro. Se habilitan los botones “Graficar Datos”, “Seleccionar Todo”, “Borrar” y “Descargar”.

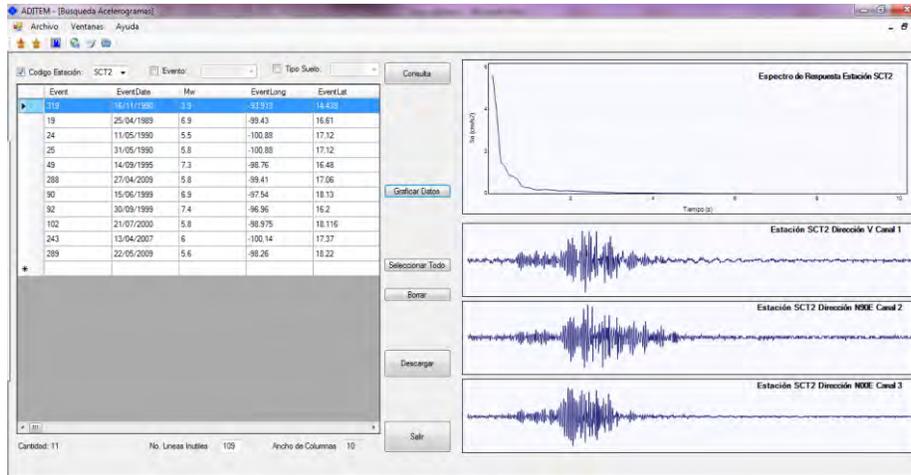


Descargar archivo, consulta.

"Graficar Datos" Como su nombre los dice, este botón nos permite visualizar los registros en sus tres componentes así como el espectro de respuesta. Es necesario seleccionar el evento que se quiera observar antes de oprimir sobre el botón.

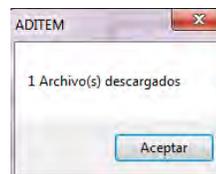
"Seleccionar Todo" Este botón nos permite seleccionar toda la tabla de consulta de modo que quisiéramos descargar todos los registros.

"Borrar Todo" Con este botón podemos eliminar todos los registros contenidos en la tabla de consulta.



Descargar archivo, graficar datos.

"Descargar" Al presionar sobre este botón automáticamente se descargarán a la computadora los registros que se encuentren previamente seleccionados en la tabla de consulta. El destino de descarga será la carpeta que el usuario seleccione, una vez allí aparecerá una carpeta con los registros solicitados. Al finalizar la descarga aparecerá una ventana en donde se indica la cantidad de archivos y el estado de la transferencia. El formato de los archivos es FORTRAN, 10 campos/dato (3F10.2).

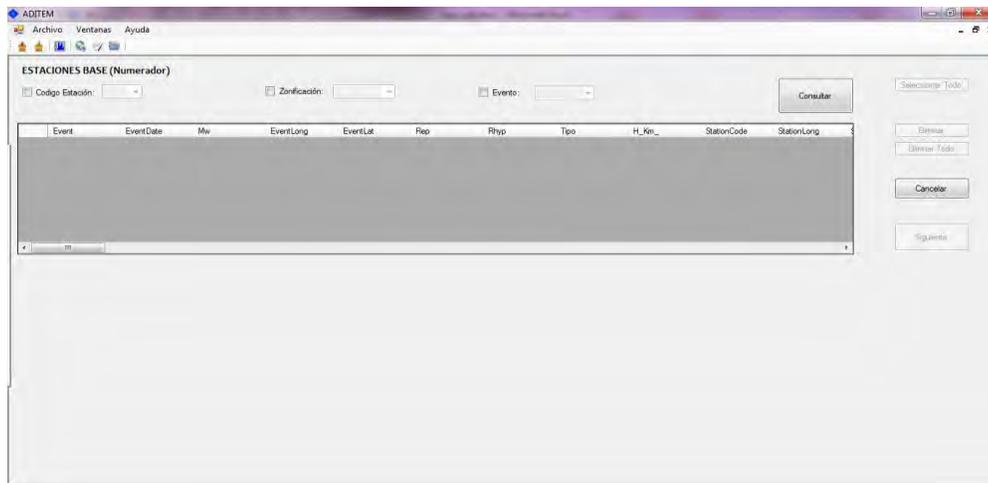


Ventana de estado descarga de registros

"Salir" Este botón cierra la ventana de descarga de archivo y volvemos a la ventana principal.

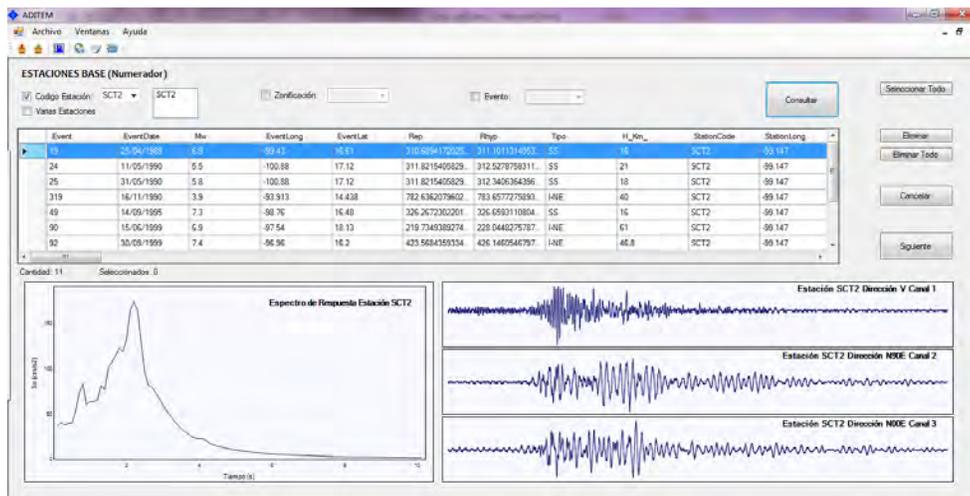
7.1.1.3 Funciones de Transferencia

Este es el botón más importante de la aplicación y con el cual vamos a obtener los cocientes espectrales. Después de un instante en donde se realiza la conexión con la base de datos, se muestra una ventana como la que sigue. En ella se aprecian dos botones habilitados, "Consultar" y "Cancelar". Con el último se cierra esta ventana después de aceptar en una contra pregunta. Para poder realizar la consulta es necesario seleccionar el parámetro requerido. En esta ventana se incluirán los registros correspondientes a las estaciones base, es decir, al numerador de las funciones de transferencia (las ubicadas en zona de lago, si es el caso).



Funciones de transferencia

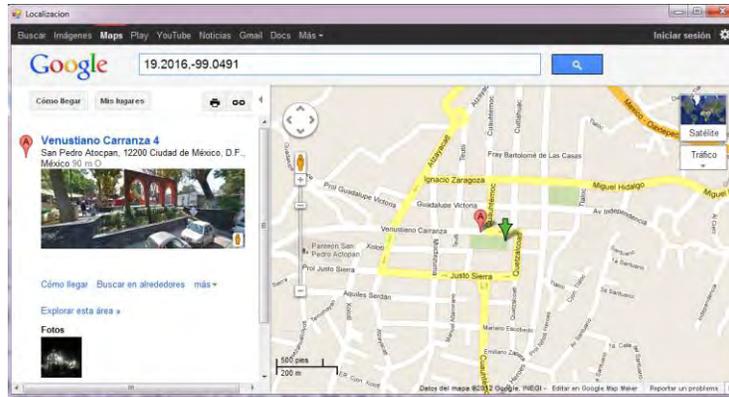
Una vez seleccionado un parámetro de búsqueda, aparecerán en la tabla de consulta los registros correspondientes, así como las gráficas de los registros y el espectro de respuesta del registro que se encuentre seleccionado en la tabla. Si quisiéramos visualizar otro registro basta con darle doble click en él, es decir, en la fila deseada.



Funciones de transferencia, estaciones base (numerador)

En la barra de menú, se encuentran 3 botones que se activan en este paso. , estos son en su orden, “Localización”, “Ver Archivo” y “Cargar Archivo”

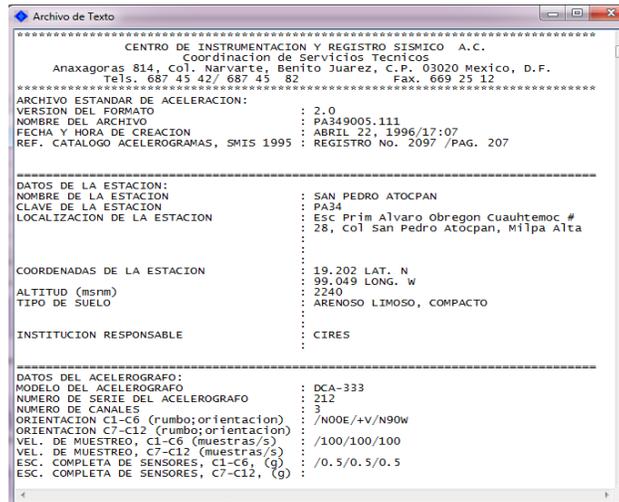
 **“Localización”** Una vez seleccionado un registro (fila) podemos observar cual es la localización de la estación seleccionada. Es necesario seleccionar la fila y luego oprimir el botón, aparecerá la siguiente ventana. La flecha verde indica la coordenada correspondiente a la estación.



Localización de estación seleccionada



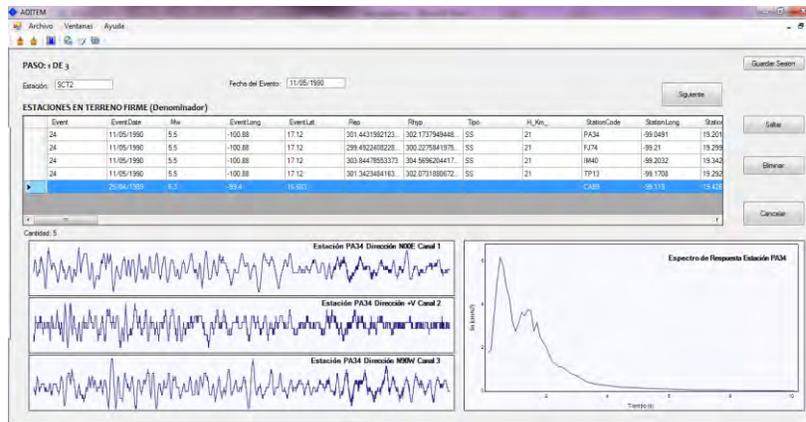
“Ver Archivo” Seleccionando la fila deseada y oprimiendo este botón podemos observar el archivo que contiene la información de los registros.



Archivo de texto estación seleccionada

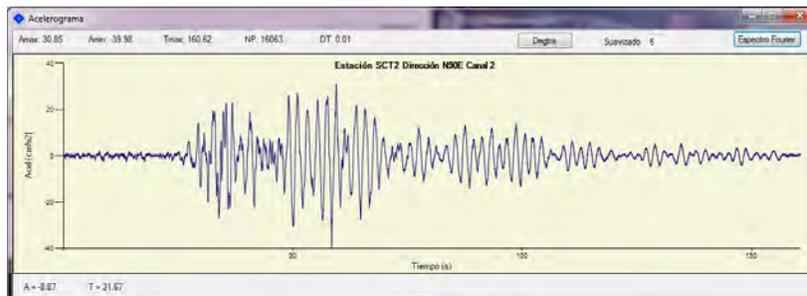


“Cargar Archivo” Con este botón podemos adicionar un nuevo registro a la tabla para ser tenido en cuenta en el análisis. Un aspecto importante es que el archivo de entrada debe tener el mismo formato de los archivos contenidos en la base de datos. El formato es el tradicional de los registros sísmicos, un encabezado de 110 líneas y luego los datos de las componentes. Luego de cargar el archivo, éste aparecerá en la parte final y se podrá diferenciar de los que están en la base de datos ya que varias celdas no tendrán información alguna.



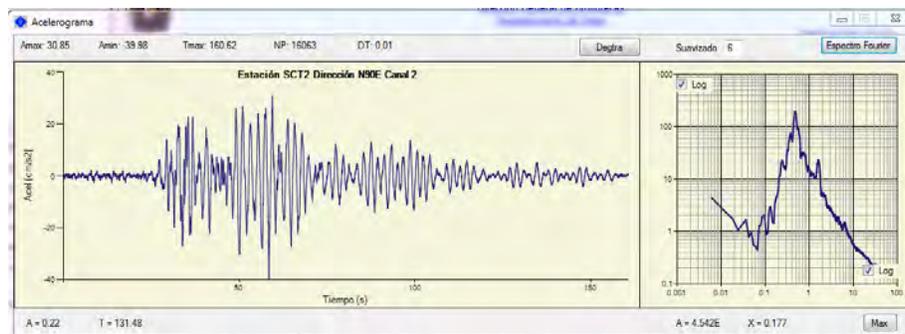
Funciones de transferencia, archivo cargado externamente

Para poder observar de una mejor manera un registro determinado podemos darle doble click sobre él y aparecerá en una nueva ventana.



Acelerograma seleccionado

Si pasamos el ratón por el registro, en la parte inferior izquierda de la ventana podremos observar la aceleración (A) y el tiempo (T) correspondiente a la coordenada seleccionada. En la parte superior de la ventana se encuentran algunos datos del registro como Amaz, Amin, Tmax, NP y DT. NP es el número de puntos que tenemos y DT el intervalo de muestreo. Si presionamos el botón "Espectro de Fourier" se graficará a un costado el espectro correspondiente al registro con el factor de suavizado que se indique en el cuadro "Suavizado".



Acelerograma con Espectro de Fourier.

Al igual que en el acelerograma, si movemos el ratón podemos apreciar en la parte inferior derecha de la ventana los valores correspondientes a la coordenada seleccionada del Espectro de Fourier.

Oprimiendo el botón “Max” aparecerán las coordenadas de máxima amplitud del espectro. Los Checkbox que dicen “Log” sirven para transformar la escala en lineal o logarítmica.

Esta ventana de muy útil para observar detalladamente algún registro en especial y decidir si se tendrá en cuenta o no en los análisis posteriores. Finalmente puede cerrarse o minimizar esta ventana con los botones convencionales de Microsoft Windows ubicados en la parte superior derecha.

Regresando a la ventana inicial de Funciones de Transferencia, podemos notar que se habilitan los botones “Seleccionar Todo”, “Borrar”, “Borrar Todo” y “Siguiente”. Con el último botón pasamos al siguiente paso, pero es necesario tener seleccionados los registros que se quieren incluir en el análisis. La ventana de información nos recuerda este hecho.



Ventana de información, botón “Siguiente”.

Una vez seleccionados los registros que formarán parte del numerador en las funciones de transferencia, aparecerá una nueva ventana en donde tendremos que eliminar o agregar los registros que se tendrán en cuenta para cada paso. Es decir, para cada una de las fechas que se eligieron en el paso anterior (fechas registros numerador) deben elegirse los registros de las estaciones en terreno firme (el denominador de los cocientes espectrales). El número de pasos será el número de registros seleccionados para el numerador. En la parte superior derecha puede apreciarse cual paso es, cual es la estación base y la fecha del evento sísmico.



Funciones de transferencia, estaciones en terreno firme (denominador)

A continuación se explican cada uno de los botones de esta nueva ventana.

“Siguiete” Continuamos con el siguiente paso teniendo en cuenta la información contenida en la tabla, no es necesario seleccionar los registros deseados solo hay que eliminar los que no queremos considerar.

“Saltar” Continuamos con el siguiente paso sin tener en cuenta ningún registro de esta fecha.

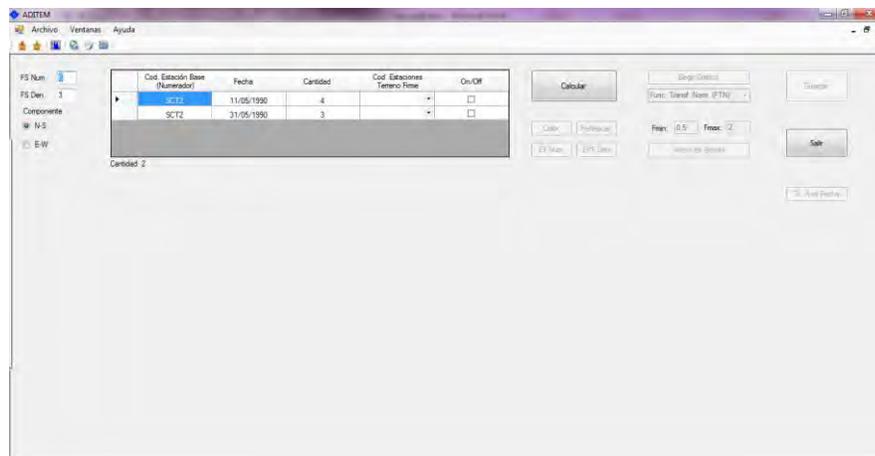
“Guardar Sesión” Se guarda la sesión teniendo en cuenta toda la información anterior a este paso, el archivo tiene formato (*.FT) y puede guardarse donde se desee.

“Eliminar” Elimina la fila ó filas seleccionadas en la tabla.

“Cancelar” Cancela el análisis después de una contra pregunta.

Al igual que para la ventana de Funciones de transferencia, estaciones base (numerador) los iconos “Localizar”, “Ver Archivo” y “Cargar Archivo” funcionan exactamente igual.

Finalmente, antes de realizar los cálculos se debe especificar el factor de suavizado tanto para los espectros de Fourier del numerador como del denominador, así como la componente que desearmos que calcule. En la tabla aparecen datos referentes a los criterios que se tendrán en cuenta en el análisis. Los botones habilitados son “Calcular” y “Salir”.



Ventana final de cálculos

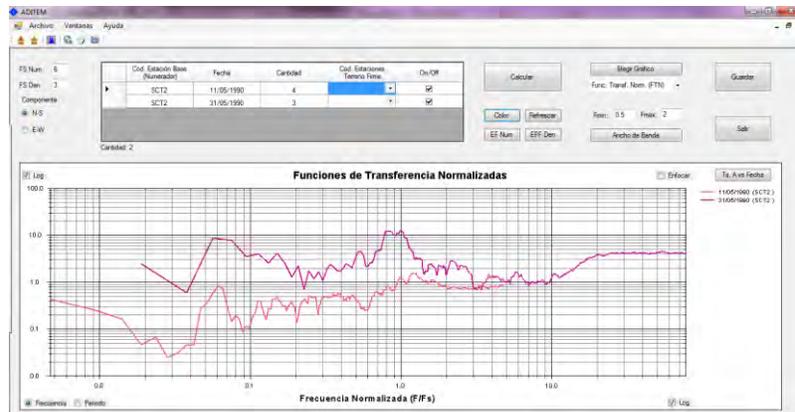
Luego de que la barra de progreso termine, aparecerá una gráfica con los resultados esperados. Adicionalmente, se habilitan una serie de botones que se explican a continuación.

“Color” Cambia el color de las líneas del gráfico, es útil cuando se tiene una gran cantidad de líneas y no logran diferenciarse.

“Refrescar” Si quisiéramos eliminar algún dato del análisis, bastará con quitarle la palomita en la tabla y luego oprimir este botón.

“EF Num” Nos muestra en una nueva ventana el espectro de Fourier del numerador, si fuese el caso sería el espectro de los sitios en zona de lago.

“EPF Den” Nos muestra el espectro promedio de Fourier del denominador, en este caso el de zona de lomas.

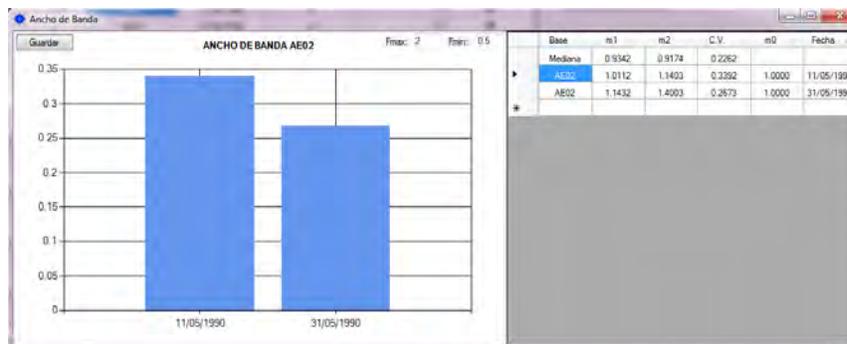


Ventana final con gráfico

“Elegir Gráfico” Seleccionando este botón podemos observar en el gráfico principal cualquiera de las opciones que se encuentran en el combo –box que esta debajo. Estas opciones son:

- Func. Transf. Norm. (FTN): Función de transferencia normalizada
- Func. Transf. (FT): Función transferencia
- FTN, Mediana y DesvEst: FTN, mediana y desviación estándar
- Mediana y DesvEst de FTN : Mediana y desviación estándar de FTN

“Ancho de Banda” Seleccionando la frecuencia mínima y máxima (Fmin y Fmax) encontramos el ancho de banda de la FT además de otros parámetros.



Ancho de Banda

“Guardar” Guarda los resultados en el lugar que nosotros le especifiquemos. El formato de salida es (*.FT) y contiene todos lo cálculos que se tuvieron en cuenta.

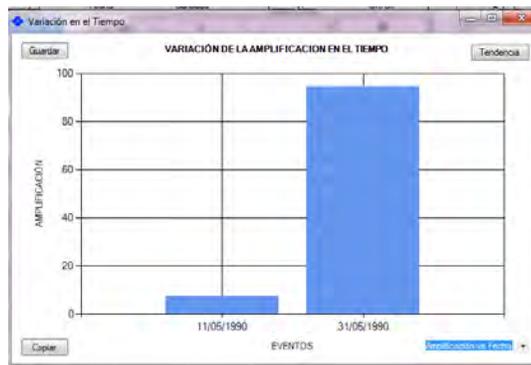
Sobre el gráfico principal encontramos otra serie de elementos que es importante aclarar. Si pasamos el ratón sobre alguna línea aparecerá información en relación al resultado que estamos viendo. Los otros elementos son:

- Frecuencia/Periodo: El eje de las abscisas dependerá de esta selección.
- Log: El eje correspondiente dependerá de esta selección.
- Enfocar: Si seleccionamos esta casilla se enfocará con base en los datos que se encuentren en Fmin y Fmax.

Por último tenemos otro botón, el cual nos permite ver como es la variación del periodo dominante del suelo y la amplificación dinámica del terreno.

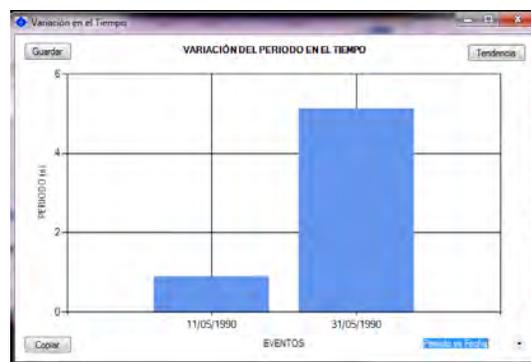
“Ts, A vs Fecha” Al seleccionar este botón aparecerá una nueva ventana con la información que se encuentre en el combo-box que esta en la parte inferior derecha. Los siguientes elementos son importantes en esta ventana.

- “Tendencia”: Con este botón observamos la tendencia lineal de los datos.
- “Guardar”: Guardamos el gráfico en cualquier lugar de la computadora.
- “Copiar”: Se copian las coordenadas y pueden pegarse en otro documento, por ejemplo, Microsoft Excel.



Ts, A vs Fecha. Variación Amplificación.

Si seleccionamos en el combo-box la opción “Período vs Fecha” obtendremos la variación del periodo en el tiempo.



Ts, A vs Fecha. Variación Periodo.

7.2 CÓDIGO PARA LA CONEXIÓN A LA BASE DE DATOS

Gracias a la asesoría del Dr. Danny Arroyo Espinoza fue posible elaborar el siguiente código de programación en Microsoft Visual Basic, con el cual es posible realizar la conexión a la base de datos, así como la descarga de los registros de aceleración y su lectura de la información.

```
Imports System
Imports System.Net
Imports System.Text
Imports System.IO
Imports ADITEM.ServiceReference1
Imports System.Data.Services.Client

Module Descarga

    Function FcnConectarABase() As BSADF2011Entities

        Dim base As BSADF2011Entities
        Dim urisvc As Uri

        urisvc = New Uri("http://mexcityad.azc.uam.mx/servicio/BSADFsvc.svc/")
        base = New BSADF2011Entities(urisvc)

        Return base

    End Function

    Function FcnDescargarDatos(ByVal datos As DataGridView)

        Dim i As Integer : Dim narchivosdescargados As Integer
        Dim wclient As New WebClient
        Dim origen As String = Nothing
        Dim destino As String
        Dim dir, arch As String
        Dim dirdestino, dirdestino0 As String
        Dim aux As String
        Dim fecha As String
        Dim y, y1, x As New ListBox()

        '***** Creando el directorio para guardar los acelerogramas

        Dim Ruta As String = ""
        Dim Ind As Integer = 0

        Dim FolderDlg As New FolderBrowserDialog
        Try
            With FolderDlg
                .Reset()
                .Description = "Seleccionar ruta para guardar los acelerogramas"
                .ShowNewFolderButton = True

                Dim ret As DialogResult = .ShowDialog
                If ret = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
```

```

Ruta = .SelectedPath
.Dispose()

fecha = Date.Now.Date.ToString
y.Items.AddRange(fecha.Split("/"))
dirdestino0 = Ruta + "\ConsultaRealizada" + "-" + Trim(y.Items(0))
+ "-" + Trim(y.Items(1)) + "-" + Date.Now.Year.ToString
dirdestino = dirdestino0

i = 0
Do
    i = i + 1
    Try
        Mkdir(dirdestino)
    Exit Do
    Catch ex As Exception
        dirdestino = dirdestino0 + "-" + Trim(i)
    End Try
Loop

'***** Descargando los archivos
narchivosdescargados = datos.RowCount

For i = 1 To narchivosdescargados

    If datos.SelectedRows.Contains(datos.Rows(i - 1)) Then
        origen = "http://mexcitad.azc.uam.mx/BSADF/"
        aux = datos.Item(116, i - 1).Value

        x.Items.Clear()
        x.Items.AddRange(aux.Split("\"))

        dir = Trim(x.Items(1))
        arch = Trim(x.Items(2))
        origen = origen + dir + "/" + arch
        destino = dirdestino + "\" + arch

        Try
            wclient.DownloadFile(origen, destino)
        Catch ex As Exception
        End Try

    End If

Next i

Ind = 1

Else

    Ind = 2

End If

End With

Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.Message, MsgBoxStyle.Critical)

```

```

End Try

Return Ind

End Function

Function FcnLeerEnDataGridViewSinDescargar(ByVal datagridServidor As DataGridView)

    Dim wclient As New WebClient
    Dim origen As String = Nothing
    Dim dir, arch As String
    Dim aux As String
    Dim x As New List(Of String)
    Dim destino As String
    Dim EventoDate As Date
    Dim codigoEstacion As String

    origen = "http://mexcityad.azc.uam.mx/BSADF/"
    aux = datagridServidor.CurrentRow.Cells(116).Value
    EventoDate = datagridServidor.CurrentRow.Cells(1).Value
    codigoEstacion = datagridServidor.CurrentRow.Cells(9).Value
    x.AddRange(aux.Split("\"))
    dir = Trim(x(1))
    arch = Trim(x(2))
    origen = origen + dir + "/" + arch

    destino = "c:\\" + arch

    Dim request As WebRequest = WebRequest.Create(origen)
    Dim respuesta As HttpWebResponse = CType(request.GetResponse(),
HttpWebResponse)
    Dim auxi = respuesta.StatusDescription
    Dim dataStream As Stream = respuesta.GetResponseStream()
    Dim reader As New StreamReader(dataStream,
System.Text.Encoding.GetEncoding(1252))
    Dim responseFromServer As String = reader.ReadToEnd()

    reader.Close()
    dataStream.Close()
    respuesta.Close()

    Dim Resultados(2) As String
    Resultados(0) = responseFromServer
    Resultados(1) = CStr(EventoDate)
    Resultados(2) = codigoEstacion

    Return Resultados

End Function

End Module

```