



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL CIIDIR – OAXACA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS NATURALES**

**ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LOS VALLES
CENTRALES DEL ESTADO DE OAXACA.**

T E S I S

**Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

CLAUDIA LUNA BARRAZA

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, Diciembre 2012.

RESUMEN

En este trabajo se muestra el uso combinado de técnicas geofísicas, de percepción remota y análisis de Fourier con la finalidad de estimar los efectos de sitio en los Valles Centrales del estado de Oaxaca a través del procesamiento de registros sísmicos, estimación de espesores de suelos no consolidados (aluvión) por resistividad eléctrica así como tratamiento digital de imágenes satelitales Landsat y modelos digitales de elevación Aster. Se determinaron las amplificaciones, frecuencias y períodos predominantes por medio de cocientes espectrales de Fourier y cocientes de aceleración absoluta para la ciudad de Oaxaca. Se estimaron las profundidades de suelo por medio de sondeos eléctricos verticales y pendientes topográficas derivadas de los modelos de elevación para estimar la respuesta sísmica en los Valles Centrales del Estado por medio de la correlación entre ambas asignando un cociente de aceleración absoluta que aproxime la respuesta en la zona delimitada de estudio permitiendo observar claramente las zonas que no son susceptibles a presentar efectos de sitio.

Se propusieron tres zonas de acuerdo con la profundidad del estrato rocoso: para zonas con espesores de 0 a 20 m, no existen efectos de sitio, mayores de 60m se asignan amplificaciones importantes y para espesores de 20 a 60 m, amplificaciones intermedias. Los resultados sugieren cambios bruscos en la estratigrafía los cuales no es posible observar claramente en el mapa de isopacas debido a la necesidad de una mayor resolución de la información en la región de estudio.]

Palabras Clave: Efectos de sitio, análisis de Fourier, sondeos eléctricos verticales, resistividad eléctrica, percepción remota, isopacas.

ABSTRACT

Use of techniques as Fourier analysis, geophysical interpretation and remote sensing in order to estimate site effects in the Central Valleys of Oaxaca, through the processing of seismic records, digital processing of Landsat satellite imagery and Aster digital elevation models and interpretation of geophysical data. The amplifications, frequencies and predominant periods were obtained from Fourier spectral ratios and absolute acceleration spectral ratios for Oaxaca City. Depths of soils were interpreted by vertical electrical soundings with electrical resistivity measures and topographic slopes derived from digital elevation models in order to estimate seismic response in the Central Valleys of Oaxaca through the correlation between both. Afterwards that, were assigned absolute acceleration spectral ratios were proposed as an estimation of response over the studied area, which the identification of areas not susceptible to site effects.

Three zones were proposed according to the rock depth: zones with depths between 0 to 20 m are interpreted as not vulnerable to site effects, for depths greater than 60 m are assigned strong amplifications and for depths from 20 to 60 m are assigned intermediate amplifications. Sudden changes of stratigraphy are suggested by obtained results, which are not possible to clearly observe in the isopach map, due to the importance of a best resolution in the information about the studied region.

Keywords: Fourier analysis, geophysical interpretation, electrical resistivity, remote sensing, isopach, spectral ratios.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por brindarme la oportunidad de formarme académicamente en esta maestría por medio del proyecto SIP 20120078 “Estimación en tiempo frecuencia de los efectos de sitio en la Ciudad de Oaxaca”.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por otorgarme una beca de estudio.

Un agradecimiento especial al Dr. Mario Ordaz Schroeder y M.I. Leonardo Alcántara Nolasco, investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por la información proporcionada para la elaboración de esta tesis (datos y software) así como su asesoría en el desarrollo de la misma.

A la NASA y al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), por los datos satelitales de adquisición gratuita por medio de <http://landsat.usgs.gov> para imágenes Landsat y http://lpdaac.usgs.gov/get_data para modelos digitales de elevación GDEM 2 (Global Digital Elevation Model Version 2) utilizados para el desarrollo de este trabajo.

A mis directores de tesis: Dr. Salvador I. Belmonte Jiménez y Dr. Francisco Castellanos León por su valiosa asesoría, ayuda, paciencia y todas las enseñanzas recibidas durante mi estancia en el CIIDIR.

A todos los docentes del CIIDIR Oaxaca que de alguna manera contribuyeron en mi formación académica, en especial a los miembros de mi comité tutorial y a mis profesores de Seminario de Investigación por su valiosa ayuda y comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

A Ivana por su amor, compañía, paciencia y ánimos.

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | i |
| ABSTRACT | ii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iii |
| CONTENIDO | iv |
| LISTA DE FIGURAS..... | vi |
| LISTA DE TABLAS..... | ix |
| | |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1 Generalidades..... | 1 |
| I.2 Planteamiento del problema..... | 6 |
| I.2 Justificación | 9 |
| I.3 Antecedentes..... | 10 |
| I.4 Objetivo | 17 |
| I.5 Hipótesis | 17 |
| I.6 Marco teórico | 18 |
| | |
| CAPÍTULO II..... | 32 |
| METODOLOGÍA..... | 32 |
| II.1 Datos..... | 32 |
| II.2 Metodología | 32 |
| | |
| CAPÍTULO III..... | 38 |
| RESULTADOS..... | 38 |
| III.1 Generalidades..... | 38 |
| III.2 Procesado de registros sísmicos para la obtención de las amplificaciones, períodos y frecuencias predominantes en la Ciudad de Oaxaca | 38 |
| III.3 Procesado de datos Geofísicos para la obtención de las profundidades de suelos..... | 68 |

| | |
|--|------------|
| III.4 Análisis digital de imágenes Landsat y GDEM para el estudio de la geología y características topográficas..... | 71 |
| CAPÍTULO IV | 81 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 81 |
| IV.1 Descripción general..... | 81 |
| IV.2 Pendientes y espesores de aluvión | 81 |
| IV.3 Extrapolación de los efectos de sitio por medio de asignación de cocientes espectrales en los Valles Centrales del Estado | 83 |
| CAPÍTULO V | 85 |
| CONCLUSIONES | 85 |
| REFERENCIAS..... | 87 |
| APÉNDICE A. Eventos seleccionados para el estudio de los efectos de sitio. | 92 |
| APÉNDICE B. Datos de sondeos eléctricos verticales realizados de los años 2007 a 2012 para la obtención de profundidades del aluvión..... | 98 |
| APÉNDICE C. Glosario de Términos | 101 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Placas Tectónicas en México. | 3 |
| Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y fallas en el marco de terrenos estratigráficos del Sur de México. (Tomada de la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2008)..... | 4 |
| Figura 3. Ubicación geográfica de la región de estudio. | 5 |
| Figura 4. Estaciones acelerométricas en la ciudad de Oaxaca..... | 7 |
| Figura 5. Geología de la zona de estudio. | 15 |
| Figura 6. Curva de histéresis deformación de corte γ , tensión de corte τ , y definición del módulo de corte máximo (G_{max}). | 19 |
| Figura 7. Arreglo electródico para la medida de la resistividad del suelo..... | 28 |
| Figura 8. Espectro electromagnético | 31 |
| Figura 9. Cocientes espectrales de Fourier estación OXAL/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d)..... | 43 |
| Figura 10. Cocientes espectrales de Fourier estación OAXM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d)..... | 45 |
| Figura 11. Cocientes espectrales de Fourier estación OXBJ/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d)..... | 47 |
| Figura 12. Cocientes espectrales de Fourier estación OXCU/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d)..... | 49 |
| Figura 13. Cocientes espectrales de Fourier estación OXPM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d)..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 14. Cocientes espectrales de Fourier estación OXTO/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d)..... | 53 |
| Figura 15. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXAL/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d). | 56 |
| Figura 16. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OAXM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d). | 58 |
| Figura 17. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXBJ/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d). | 60 |
| Figura 18. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXCU/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d). | 62 |
| Figura 19. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXPM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d). | 64 |
| Figura 20. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXTO/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d). | 66 |
| Figura 21. Localización de los SEV's en el mapa geológico. | 69 |
| Figura 22. Localización de las estaciones acelerométricas en la Ciudad de Oaxaca..... | 70 |
| Figura 23. Modelo Digital de Elevación (GDEM) de la zona de estudio indicando algunas poblaciones principales. Elevaciones en metros..... | 73 |
| Figura 24. Mapa de pendientes obtenidas del GDEM en la zona de estudio indicando algunas poblaciones principales. Pendientes en grados..... | 74 |
| Figura 25. Mapa de clasificación de pendientes de 0 a 6° para delimitar las zonas de bajas pendientes..... | 75 |
| Figura 26. Mapa de clasificación de pendientes mayores a 15° para delimitar las zonas de bajas pendientes. | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 27. Combinación de bandas espectrales de imagen Landsat 321 RGB color real y mapa de isopacas obtenido de la interpretación de los SEV's..... | 77 |
| Figura 28. Ubicación de las estaciones acelerométricas en la combinación 321 RGB asociadas a los espesores del aluvión. | 78 |
| Figura 29. Combinación de bandas espectrales de imagen Landsat 742 RGB falso color y mapa de isopacas obtenido de la interpretación de los SEV's..... | 79 |
| Figura 30. Ubicación de las estaciones acelerométricas en la combinación 742 RGB asociadas a los espesores del aluvión. | 80 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Estaciones acelerométricas dentro de la Ciudad de Oaxaca a cargo del Servicio Sismológico Nacional (IG) y del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II). | 34 |
| Tabla 2. Cocientes espectrales de Fourier no considerados en las amplificaciones promedio. 40 | |
| Tabla 3. Cocientes espectrales de aceleración absoluta no considerados en las amplificaciones promedio. | 41 |
| Tabla 4. Datos de frecuencias y amplificaciones máximas promedio obtenidas de los cocientes espectrales de Fourier..... | 54 |
| Tabla 5. Datos de amplificación y período promedio obtenidos de los cocientes de respuesta de aceleraciones absolutas..... | 67 |
| Tabla 6. Datos de pendientes, elevaciones y profundidades de suelos..... | 83 |
| Tabla 7. Estimación de efectos de sitio propuesta mediante la correlación entre pendientes y espesores de aluvión. | 86 |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades

La magnitud y distribución de los daños que pueden sufrir las estructuras con la ocurrencia de los sismos están directamente relacionados con la respuesta de los suelos ante este tipo de movimientos. Esta respuesta depende de las características geológicas y topográficas del lugar, y se presentan como amplificaciones del movimiento sísmico de distintos órdenes de magnitud dependiendo de las condiciones de sitio. A este fenómeno se le conoce como efecto de sitio.

El estudio de la respuesta sísmica del suelo es una parte muy importante para el diseño sísmico y ha sido objeto de diversos trabajos. Este fenómeno se agrava en regiones de alto riesgo sísmico, donde estos fenómenos ocurren con mayor magnitud ocasionando efectos indeseables.

Cuando ocurre un sismo se libera una gran energía de deformación almacenada. Esta energía se transmite por el interior de la tierra, principalmente a través de las rocas en forma de ondas que normalmente se atenúan con la distancia. Sin embargo, cuando las ondas atraviesan suelos blandos, no consolidados, el movimiento se amplifica. Este fenómeno no sólo produce un aumento de la amplitud de las ondas sino también prolonga la duración del movimiento.

La magnitud de dicha amplificación depende de las propiedades de los estratos de suelos por donde se propagan las ondas, dependiendo de la rigidez y densidad del medio que responde al movimiento generado por la liberación de energía cuando existe un reajuste en la corteza terrestre. Aun cuando las propiedades dinámicas de los suelos por donde viajan las ondas, determinan su comportamiento hasta su llegada a la superficie, es importante destacar que la profundidad de ellos es un factor de influencia directa en las amplificaciones que se presentan en la superficie. Estas profundidades pueden ser obtenidas con la interpretación de datos geofísicos, los cuáles pueden ser estimadas con relativa facilidad y bajo costo económico. Dichas profundidades también están relacionadas con la topografía del lugar, pues se ha demostrado que ésta última es un indicador de la geomorfología y litología del sitio (Wald y

Allen, 2007), específicamente con las pendientes topográficas presentes en cierta región, lo que sugiere zonas montañosas con pendientes pronunciadas compuestas por distintos tipos de rocas, áreas planas cercanas a la superficie compuestas por suelos y zonas de transición en pendientes intermedias.

La obtención de registros sísmicos es dependiente de las estaciones de medición que existan en cierta región, por lo que, para poder estimar las amplificaciones por efectos de sitio basados únicamente en los eventos ocurridos, sería necesario contar con una amplia red de medición sísmica. Actualmente las estaciones se encuentran concentradas en el Valle de Oaxaca, aun cuando haya planes de establecer más estaciones, esto no sería en un corto plazo. Sin embargo es posible establecer correlaciones entre registros, pendientes y profundidades de suelo para hacer estimaciones de las amplificaciones que podrían presentarse en aquellas zonas donde no existen registros sísmicos siempre que se cuente con información geofísica, geológica y topográfica que permita establecer dicha relación.

El territorio nacional se encuentra afectado por la movilidad de cuatro placas tectónicas: la de Norteamérica, Cocos, Rivera y del Pacífico (figura 1). La generación de los sismos más importantes en México se debe principalmente al movimiento generado por las placas de Rivera y Cocos que se deslizan por debajo de la placa Norteamericana, ocasionando el fenómeno de subducción. La línea donde comienza la subducción se encuentra a pocos kilómetros fuera de las costas de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán, y sobre dicha línea se localizan la gran mayoría de los epicentros. Aproximadamente el 70% de la actividad sísmica que afecta el territorio nacional se origina frente a las costas de Guerrero y Oaxaca.



Figura 1. Placas Tectónicas en México.

El estado de Oaxaca está localizado entre los 15° 30' y los 18° 40' de latitud Norte, y los 94° 07' y los 98° 30' de longitud Oeste; situado en el sureste de México. El estado de Oaxaca forma parte de 3 provincias: Sierra Madre del Sur, Llanura Costera del Golfo del Sur y Cordillera Centroamericana, a su vez se subdivide en 6 diferentes subprovincias: Sierras Plegadas del Noroeste, Tierras Altas de Oaxaca, Cuestas del Sur, Llanura Costera Veracruzana, Sierra Norte de Chiapas y Llanura del Istmo. La geología del estado de Oaxaca se considera una de las más complejas del país, con fallas y fracturas geológicas que prácticamente cruzan el territorio oaxaqueño (figura 2). Las fallas asociadas al fenómeno de subducción son responsables también de los movimientos sísmicos que se presentan en la región, éstas son principalmente: la falla Oaxaca (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 1996; Dávalos-Álvarez *et al.* 2007), la falla de Caltepec y la falla Chacalapa (Tolson, 2005).

La falla Oaxaca es la que tiene mayor influencia en los movimientos que se presentan en la región. Es un sistema de fallas normales, con una longitud de 250 km, su traza va desde el poblado de Miahuatlán, al sur de la ciudad de Oaxaca, hasta Tehuacán, Puebla (Nieto-Samaniego *et al.* 1995) (figura 2).



Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y fallas en el marco de terrenos estratigráficos del Sur de México. (Tomada de la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2008).

El estado de Oaxaca se encuentra rodeado por cadenas montañosas de formación geológica distinta con secuencias de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas de diversos orígenes y edades, así como valles con depósitos de materiales no consolidados intercalados indistintamente por arcillas, arenas, gravas o limos denominados aluvión.

El presente estudio se ubica en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, con un área limitada por las coordenadas 17.36° N y 96.97° W hasta 16.21° N y 96.29° W incluyendo los Valles de Oaxaca, ETLA, Tlacolula, Zimatlán-Ocotlán, abarcando San Francisco Telixtlahuaca y Miahuatlán de Porfirio Díaz. La figura 3 muestra la ubicación geográfica de la región de estudio.



Figura 3. Ubicación geográfica de la región de estudio.

I.2 Planteamiento del problema

Los efectos de los sismos están presentes no sólo en el daño que pueden ocasionar a las estructuras, sino también en las indeseables pérdidas humanas que causan. Para tener la posibilidad de reducir el riesgo sísmico actual en los Valles Centrales de Oaxaca es necesario tener una mejor estimación de los efectos de sitio que se presentan en las distintas zonas con similar amplitud generada durante la ocurrencia de estos movimientos.

En Oaxaca, los sismos que ocurren son producto de la subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana así como aquellos que se originan en el interior del continente producto de la ruptura de la placa ya subducida a profundidades entre 60 y 100 km y son los responsables de los daños que se han podido observar a lo largo de la historia sísmica de la región de estudio.

En la ciudad de Oaxaca existen diversos estudios que han permitido conocer la respuesta del sitio, sin embargo la superficie estudiada es muy pequeña en comparación con las zonas que por sus características geológicas y topográficas, se consideran de riesgo y para las cuales existen pocos o nulos estudios en este campo.

Los estudios previos de zonación sísmica fueron realizados por (León, 1976; Morales, 2003; Lermo *et al.*, 1991a y b; Pérez, 2002 y Castellanos *et al.*, 2003), en base a información geotécnica y registros sísmicos para la ciudad de Oaxaca básicamente, obteniendo zonaciones que presentan inconsistencias en los resultados debido a la limitada información que estaba disponible al momento de la realización de dichos trabajos.

Actualmente el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Servicio Sismológico Nacional cuentan con una red acelerométrica concentrada principalmente en la ciudad de Oaxaca (figura 4), lo cual limita la estimación de los efectos de sitio fuera de esta zona de cobertura en base a los registros sísmicos.

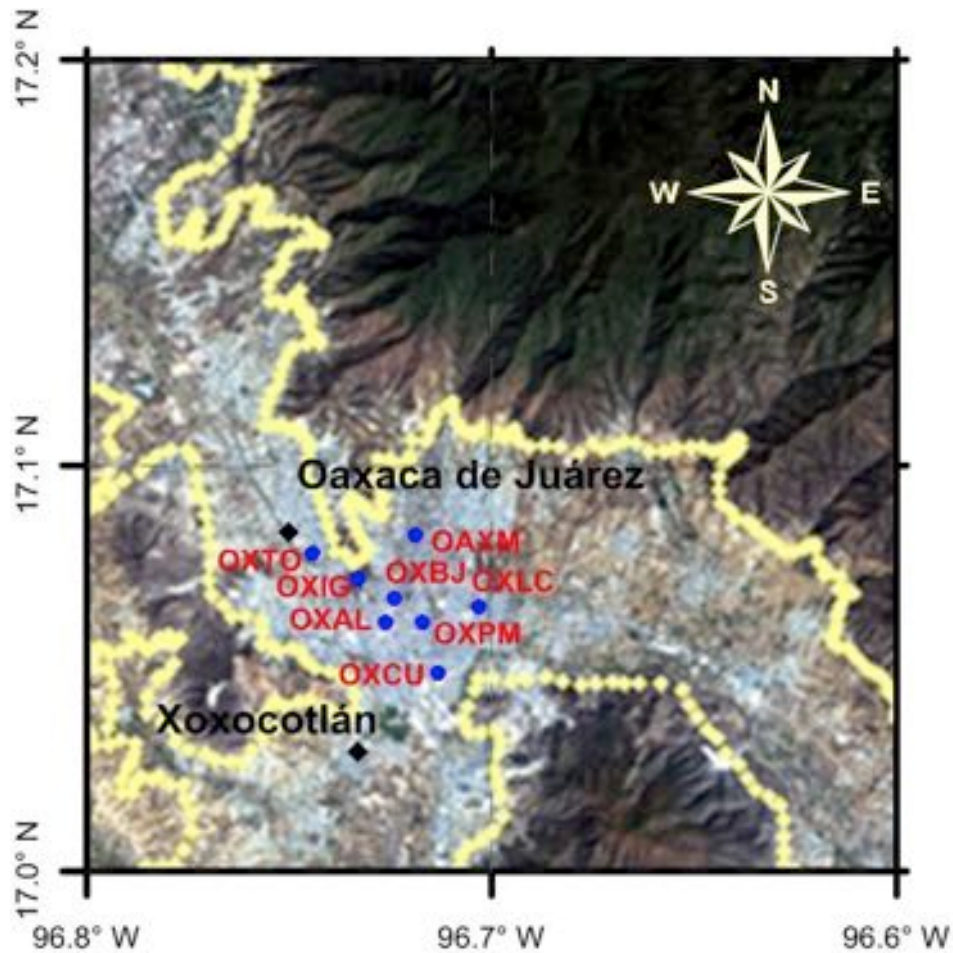


Figura 4. Estaciones acelerométricas en la ciudad de Oaxaca.

El hecho de no contar con una mayor cobertura de estaciones de registro sísmico es una limitante para poder estudiar los efectos de sitio en la zona considerada, sin embargo, partiendo de las investigaciones previas, desarrolladas por Boore (1972), Sánchez-Sesma *et al.*, (1991), y Geli *et al.* (1988), entre otros, es posible comprender la importancia de otras variables asociadas a la respuesta sísmica de los suelos y las cuales anteriormente no era sencillo considerar pues su obtención no era costeable o simplemente no existía la información completa de las zonas requeridas. Estas variables están definidas por la pendiente topográfica, la geología regional y la profundidad de los suelos no consolidados presentes en los valles.

Actualmente, con la existencia de datos satelitales obtenidos de modelos digitales de elevación (DEM's) es posible obtener las pendientes topográficas en cualquier parte del territorio nacional. La relativa facilidad en la obtención de los DEM's así como imágenes satelitales para identificación de geología junto con cartas geológicas ya existentes y estudios geofísicos de resistividad eléctrica para la obtención de las profundidades del aluvión, hace posible establecer correlaciones entre registros sísmicos, pendientes, geología y profundidades para poder abarcar los valles donde no existen estaciones y estimar su respuesta sísmica.

Tomando en cuenta las ventajas anteriormente descritas, este trabajo propone el uso de técnicas estudiadas por otros autores entre los más importantes Wald y Allen (2007, 2009) y Shafique (2011), utilizadas y modificadas de acuerdo con la información disponible, para la determinación de zonas que por su geología y pendiente no presentan amplificaciones, así como la estimación de una respuesta sísmica en aquellas zonas compuestas por espesores importantes de aluvión.

I.2 Justificación

Por la naturaleza dinámica de los sismos y el incremento del riesgo sísmico en algunos de los Valles de la zona de estudio, es necesario el desarrollo de estudios actualizados con nuevos datos disponibles o técnicas aplicables que permitan definir con mayor detalle las zonas de riesgo y aproximar valores de respuesta en zonas donde los estudios previos no muestran información pero que si son áreas susceptibles a presentar efectos de sitio importantes.

La alta sismicidad de la región de estudio en conjunto con el limitado conocimiento de la respuesta sísmica, así como la disponibilidad de datos determinantes en las amplificaciones por efectos de sitio que se pueden presentar, abre la pauta al desarrollo de nuevos trabajos más completos y actualizados.

Tomando en cuenta las ventajas anteriormente descritas, este trabajo propone el uso de técnicas estudiadas por otros autores entre los más importantes Wald y Allen (2007, 2009) y Shafique (2011), utilizadas y modificadas de acuerdo con la información disponible, para la determinación de zonas que por su geología y pendiente no presentan amplificaciones, así como la estimación de una respuesta sísmica en aquellas zonas compuestas por espesores importantes de aluvión.

I.3 Antecedentes

I.3.1 Zonaciones Previas

Morales (2003) propone una zonación analizando los estudios de mecánica de suelos que se han realizado dentro de la ciudad de Oaxaca. Este estudio recopila la información de estudios previos, incluyendo los resultados presentados por León (1976). Adicionalmente se analizan 90 estudios de mecánica de suelos realizados en la ciudad entre 1976 a 2002. Morales (2003) reporta solo 7 sondeos con profundidades mayores de 15 m. El resto de los estudios no permiten identificar de manera confiable los suelos subyacentes por su poca profundidad.

Lermo *et al.*(1991a) plantearon una zonificación basada en estudios previos relacionados con efectos de sitio producidos por el sismo de septiembre de 1985 que causó severos daños en la zona centro de la Ciudad de México, relacionando estos daños con los efectos producidos en la ciudad de Oaxaca debido al sismo de enero de 1931. Las microzonas se determinaron analizando los aspectos geológicos, geotécnicos y de ingeniería sísmica.

Lermo *et al.*(1991b) complementaron sus resultados con una campaña de monitoreo sísmico en la Ciudad de Oaxaca, instalando una red temporal de sismógrafos digitales durante los meses de julio y agosto de 1991 en la zona urbana de la ciudad de Oaxaca, permitiendo registrar 32 sismos en al menos dos estaciones. Los datos obtenidos fueron analizados utilizando la técnica de los cocientes espectrales, lo que permitió caracterizar 20 sitios sobre los depósitos sedimentarios de la ciudad en términos de amplificación relativa a un sitio en roca y de periodo dominante. La información anterior fue complementada con mediciones de microtemores. Estos últimos datos fueron analizados mediante dos técnicas diferentes: cocientes espectrales y técnica de Nakamura. Los resultados permitieron definir curvas de isoperiodos en la zona urbana de Oaxaca, valores de amplificación relativa en algunos sitios y el mapa de microzonificación sísmica para la Ciudad de Oaxaca. En general, esta microzonificación tiende a considerar el suelo que se encuentra al norte de la Ciudad más firme que el resto, disminuyendo su rigidez conforme se localiza más al sur. Adicionalmente, los valores estimados para las curvas de isoperiodos están definidos principalmente mediante mediciones de vibración ambiental, y ajustados mediante cocientes espectrales provenientes de mediciones de sismos pequeños obtenidos mediante la técnica de Nakamura. Las primeras mediciones suelen proporcionar una estimación relativa de los períodos del suelo en estudio,

sin embargo, los valores absolutos de éstos generalmente son diferentes a los esperados en movimientos fuertes, debido a diversos fenómenos entre los más importantes aquéllos asociados con efectos no lineales del suelo. La técnica de Nakamura estima el cociente espectral como la relación de los espectros correspondientes a una de las dos direcciones horizontales y el de la dirección vertical (Nakamura, 2000). Esta técnica proporciona resultados aceptables para suelos cuyas frecuencias dominantes sean altas, sin embargo la relevancia de los efectos de sitio se presenta en los suelos blandos (de baja frecuencia) en los cuales se presenta una mayor amplificación.

Pérez (2002) partió de las microzonas establecidas por Lermo (1991b), para después obtener las curvas de isoperiodos en la Ciudad de Oaxaca obtenidas en base a las mediciones de vibración ambiental en 29 sitios, el análisis de 74 registros sísmicos y los mapas de isosistas elaborados para los temblores del 15 de junio y 30 de septiembre de 1999. Los valores de isoperiodos estimados por Pérez se estimaron por los mismos métodos que (Lermo, 1991a, 1991b), y por lo tanto, presenta las ambigüedades mencionadas. El mapa de isoperiodos presentado por Pérez muestra una tendencia similar al de Lermo (aunque difiere de los valores y la distribución de los periodos del terreno), donde suponen que el terreno firme se encuentra al norte de la Ciudad, y disminuye de rigidez conforme se dirige al sur.

Castellanos *et al.* (2003) obtuvieron una zonación basada en los trabajos previos que estudian las características de los tipos de suelo subyacentes en la Ciudad y sus municipios conurbados a través de diversos métodos tales como registros de vibración ambiental, registros de sismos (Lermo *et al.* 1991a, 1991b; Pérez, 2002), evaluación de los daños sufridos en eventos previos (Unidad Estatal de Protección Civil, 1991 y 1999), y estudios de mecánica de suelos (León, 1976; Morales, 2003). Encontraron diferencias importantes entre los diversos estudios realizados sobre la distribución de las características de los tipos de suelo prevalecientes en la Ciudad sobre todo por la incertidumbre en la información proporcionada por registros de vibración ambiental (empleados para la estimación de mapas de isoperiodos de la Ciudad) y la escasez de información tanto de registros de sismos de magnitud intermedia a grande, como de exploración de los suelos mediante sondeos u otros métodos.

I.3.2 Información geofísica y geológica

León (1976), elaboró un plano geológico de la ciudad de Oaxaca, dividiéndolo en 7 zonas, para ello se basó en 25 sondeos y 31 pozos a cielo abierto realizados en la ciudad, de los cuales sólo 5 se sondearon a una profundidad mayor de 15 m. Para estos últimos, fue posible determinar la estratigrafía y propiedades mecánicas básicas como densidad de sólidos y número de golpes o resistencia a la penetración con ensayos de penetración estándar para determinar la velocidad de ondas de corte a través de una correlación con el número de golpes “N” medido. Describe la litología de la ciudad de Oaxaca de la siguiente manera:

Rocas metamórficas presentes al oeste de la ciudad. En la zona de los cerros de Monte Alban y al pie del cerro del Fortín, afloran rocas metamórficas, calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamórficos subyaciendo areniscas y lutitas sobre las cuales se ha desarrollado parte de la ciudad de Oaxaca en la zona Noroeste. Al Noreste de la ciudad se observan tobas andesíticas del terciario de color verde claro, explotada en la zona como piedra para cantera. En la parte baja de la ciudad se encuentran limos y arenas sueltos que provienen de los aluviones de los ríos que entran al valle. Estos materiales que en gran parte se localizan a lo largo del río Atoyac son objeto de explotación de agua subterránea. En las partes bajas del cerro del Fortín se observan algunos depósitos de abanico aluvial constituido por grava redondeada y angulosa en una matriz limo-arenosa.

Samouëlian *et al.* (2005), hicieron una revisión de varios estudios de resistividad eléctrica, para exponer las teorías y los principios básicos del método, así como mostrar una visión general de la variabilidad de la resistividad eléctrica en función de las propiedades del suelo. Se describen los principios para la interpretación de datos y se resalta la ventaja de estos métodos pues son pruebas no destructivas y confiables en la determinación de la profundidad del estrato rocoso, sin embargo, resalta también la dificultad en la interpretación de los datos cuando las heterogeneidades o anisotropía del medio son cada vez mayores.

Chaplot *et al.* (2010), evaluaron la importancia de establecer las relaciones existentes entre características geofísicas y algunas propiedades mecánicas de los suelos para una mejor interpretación de los resultados, pues la anisotropía del medio muchas veces dificulta la comprensión de los resultados obtenidos y conduce a interpretaciones erróneas.

Belmonte (2008) empleó gravimetría y magnetometría con métodos de resistividad de corriente directa para estimar algunas propiedades del acuífero de Zaachila como extensión, geometría, espesor y tipo de unidades hidrogeológicas para inferir el comportamiento regional de la falla de Oaxaca y su posible relación con el acuífero.

I.3.2.1 Geología de la zona de estudio

La geología de Oaxaca es considerada una de las más complejas del país principalmente por los diferentes eventos tectónicos a que ha estado sujeta y por medio de los cuales se han formado las grandes discontinuidades como la falla Oaxaca considerada como la de mayor extensión en México y que cruza gran parte de la zona de estudio. Importantes estudios acerca de la geología del estado de Oaxaca se deben a Ortega – Gutiérrez (1976, 1981a y 1981b), Alaniz–Álvarez (1994 y 1996), Nieto–Samaniego *et al.* (1995), entre otros.

Los Valles Centrales de Oaxaca se ubican en el sureste de México dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, que abarca desde el Centro del Estado hasta las costas del Pacífico y hacia el extremo sur Oriental de la Sierra Madre Occidental. Hacia el nororiente se eleva la Sierra Madre de Oaxaca desde el pico de Orizaba hasta el Istmo de Tehuantepec. La complejidad de la geología regional parte de su composición, formada por terrenos tectonoestratigráficos que son bloques limitados por fallas que tienen una historia geológica diferente a los bloques adyacentes (Coney *et al.*, 1989).

La estratigrafía general que compone los Valles Centrales del Estado, comprende:

El complejo Oaxaqueño formado por rocas metamórficas de alto grado de facies de granulita. La mayor parte del basamento del precámbrico aflora al norte y al poniente del Valle de Zaachila y al oriente de Zimatlán.

El complejo milonítico Sierra Juárez que está formado por rocas máficas y ultramáficas.

La formación Teposcolula de edad cretácica media formada por calizas y dolomías con nódulos de sílex que afloran en el anticlinal Coyotepec e inmediaciones de Ánimas Trujano.

Una secuencia terciaria discordante con las anteriores formada por: conglomerados y secuencia volcánica constituida por derrames andesíticos y conglomerados de las formaciones Suchilquitongo y Telixtlahuaca (Wilson y Clabaugh, 1970).

La formación Suchilquitongo al noroeste del Valle de Oaxaca consiste en una secuencia volcanosedimentaria constituida por conglomerados, tobas, calizas silicatadas, limonitas y areniscas tobáceas e ignimbritas afloran en San Juan del Estado, ETLA y al oriente de San Bartolo Coyotepec. En la parte superior de la formación, hay derrames de ignimbrita de color verde (Centeno – García, 1988).

La formación Jaltepetongo que esta formada por una secuencia de lutitas apizarradas, areniscas calcáreas, calizas y margas que afloran en el sinclinal de Monte Albán. Los materiales del cuaternario están constituidos por fragmentos de gneises, calizas y rocas volcánicas y por gravas, arenas y arcillas cuyo espesor varía entre 10 y 150 m, siendo más profundos en los Valles de Zaachila y Oaxaca que en los Valles de ETLA, Tlacolula y Zimatlán – Ocotlán (Belmonte, 2005).

En la carta geológica obtenida del Servicio Geológico Mexicano (2000) se detalla la composición geológica los Valles de Oaxaca, ETLA, Tlacolula, Zaachila y Zimatlán-Ocotlán. En color amarillo se representan los suelos aluviales compuestos por gravas, arcillas y arenas intercaladas, de principal importancia en el objeto de estudio del presente trabajo y que pueden observarse en la figura 5.

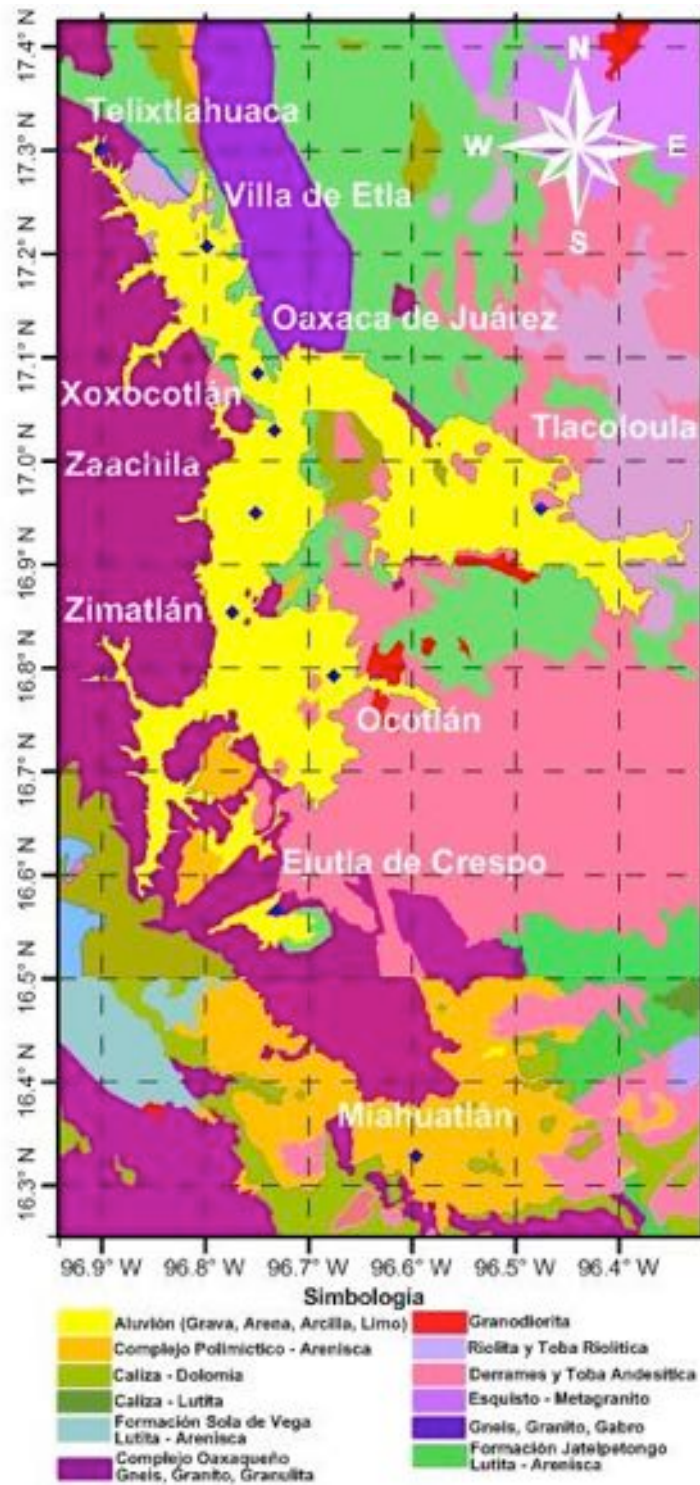


Figura 5. Geología de la zona de estudio.

I.3.3 Percepción Remota

Wald y Allen (2007 y 2009) estudiaron la pendiente topográfica para inferir las amplificaciones por efecto de sitio en distintas regiones de Estados Unidos por medio del tratamiento digital de Modelos de Elevación a una resolución de 90 m, concluyendo que la pendiente es un factor determinante en las amplificaciones y obteniendo las correlaciones entre ésta y velocidades de onda de corte por debajo de los 30m pues se considera que profundidades menores a ésta no provocan modificaciones en las propiedades dinámicas de los suelos que atraviesan las ondas debidas a un movimiento sísmico.

Shafique (2011) estudió el impacto de las resoluciones espaciales de los Modelos de Elevación Digital en la amplificación sísmica, considerando la altura relativa, velocidad de onda de corte por debajo de los 30m y pendiente topográfica, considerando resoluciones de 1,5, 10, 20, 30, 60 y 90 m, concluyendo que resoluciones de 20 a 90 m son fuentes confiables para la obtención de las pendientes topográficas pues en estas resoluciones las variaciones de los datos obtenidos son mínimas.

Los estudios antes mencionados son de gran importancia para la realización de este trabajo pues en cada uno de ellos muestra aspectos relevantes acerca del estudio de los efectos de sitio y las correlaciones entre las variables mencionadas en el planteamiento del problema.

I.4 Objetivo

Estimar las amplificaciones por efectos de sitio en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca empleando información geológica, topográfica, geofísica y datos sísmicos de la región de estudio.

I.4.1 Objetivos específicos

- Determinar períodos y frecuencias predominantes en la Ciudad de Oaxaca.
- Construir el mapa de isopacas con la interpretación de datos geofísicos para identificar los espesores del aluvión.
- Extrapolar los efectos de sitio por medio de la relación entre profundidades, geología y topografía en las zonas de pendientes bajas determinadas en un rango de 0 a 6°.

I.5 Hipótesis

Por medio de la correlación entre el espesor del aluvión, la pendiente topográfica y los cocientes de respuesta de aceleración absoluta para la ciudad de Oaxaca es posible aproximar los efectos de sitio en los Valles Centrales del Estado.

I.6 Marco teórico

I.6.1 Efectos de sitio

Cuando la energía de las ondas generadas por un sismo ha alcanzado los suelos cercanos a la superficie, se producen importantes amplificaciones que son las responsables de los graves daños que han podido ser observados a lo largo de la historia en la mayoría de las zonas sísmicas. Estas amplificaciones que son dependientes de las propiedades del medio de propagación son las que definen los efectos de sitio. A continuación se describen algunas de las propiedades más importantes.

El movimiento causado por un sismo es una carga cíclica rápida que provoca en el suelo un comportamiento tenso-deformacional no lineal, como el descrito en la figura 5, que corresponde a la curva de histéresis deformación de corte y tensión de corte τ . Las propiedades dinámicas más importantes son el módulo de corte G y la razón de amortiguamiento λ . El módulo de corte se define como la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva de la figura 5 y es una medida de la dureza del material. Se obtiene calculando la pendiente de la curva tensión- deformación y en función de dónde se evalúa la pendiente se distingue entre el módulo de corte tangente (G_{tan}), secante (G_{sec}) o máximo (G_{max}). En la figura 5 se ilustran dichos módulos: el módulo de corte máximo (G_{max}), calculado como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva, y el módulo de corte secante (G_{sec} ó G) que se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva.

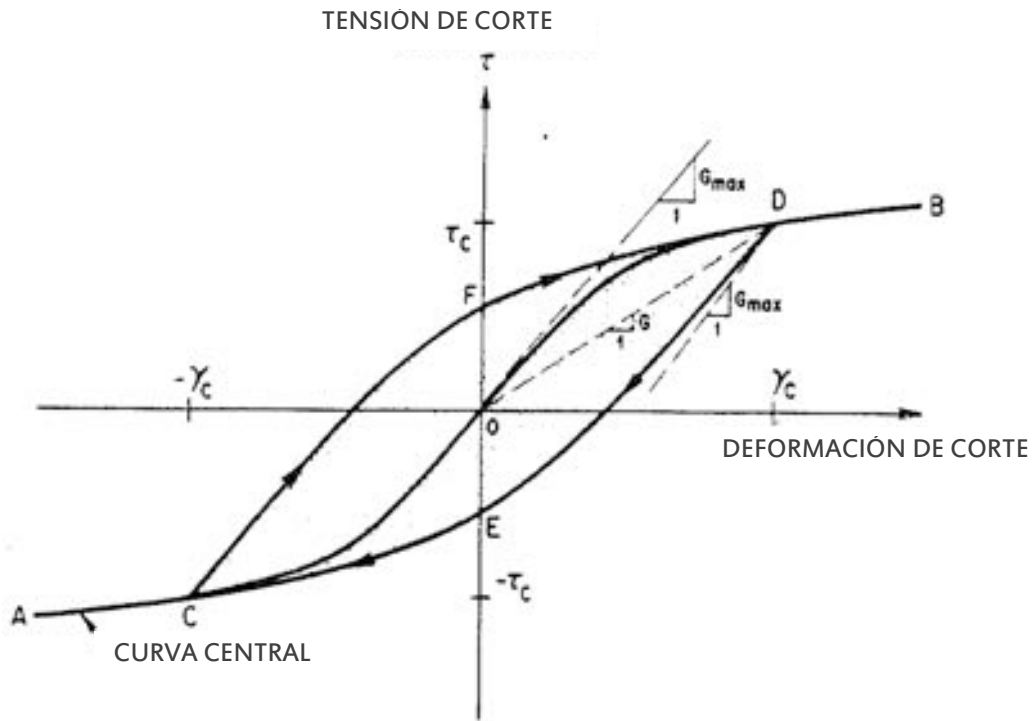


Figura 6. Curva de histéresis deformación de corte γ , tensión de corte τ , y definición del módulo de corte máximo (G_{max}).

La tensión τ se expresa en unidades de esfuerzo y la deformación γ es adimensional. (Seed e Idriss 1970; Hardin y Drnevich, 1972a, b; Richart, 1975)

De la figura 6 se obtiene:

Módulo de corte secante:

$$G = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \tag{1}$$

donde:

τ_c = Tensión de corte

γ_c = Deformación de corte

Módulo de corte máximo:

$$G_{\text{máx}} = \rho V_s^2 s \quad (2)$$

donde:

ρ = Densidad natural del suelo y se define como:

$$\rho = \frac{m \cdot g}{V \cdot g} = \frac{W}{V \cdot g} \quad (3)$$

V_s^2 = Velocidad de onda de corte, medida en campo por métodos geofísicos (*Hoar and Stokoe, 1977*) o en laboratorio con ensayos dinámicos aplicados a muestras inalteradas.

m = Cantidad de masa contenida en cierto volumen V .

g = Aceleración de la gravedad

Razón de amortiguamiento:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \frac{E}{G \gamma_c^2} \quad (4)$$

donde:

E = Energía disipada del suelo por ciclo y por unidad de volumen que corresponde al área formada por CEDF en la figura 6.

G = Módulo de corte secante.

La aproximación de la respuesta y magnitud de las amplificaciones que se presentan cuando ocurre un sismo, es dependiente principalmente de las propiedades mecánicas del medio, así como del espesor de las capas y de la profundidad a la que se encuentra el estrato rocoso (Aki, 1967). La estimación de los efectos de sitio se realiza en este trabajo en base a historias de aceleraciones que se han presentado a lo largo de los años con la ocurrencia de los fenómenos sísmicos y representadas por registros de aceleración obtenidos de los acelerómetros existentes, así como en base a las profundidades del estrato rocoso en las zonas de muestreo geofísicos realizadas para fines de aguas subterráneas.

I.6.2 Propagación de ondas

La energía liberada por el reacomodo de la corteza terrestre, produce distintos tipos de ondas que viajan por el interior de la tierra de diferentes formas. Los principales tipos de ondas son las de cuerpo (ondas “P” y “S”) y superficiales éstas últimas asociadas con los mayores daños que se observan tras la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

I.6.3 Amplificación del movimiento

La amplificación del movimiento se define como el aumento en las amplitudes de las ondas sísmicas que ocurre cuando éstas pasan de un medio a otro con menor rigidez (suelos blandos que normalmente forman la superficie de la tierra y se encuentran sobre lechos rocosos). Esta amplificación se debe a la baja impedancia de los estratos de suelo cercanos a la superficie (Aki, 1988). La impedancia se define como el producto de la densidad del suelo y la velocidad de propagación de ondas. En la práctica, se utiliza la amplificación de sitio para estimar el incremento en el movimiento entre dos sitios cercanos, independientemente de si estas amplificaciones son producto o no de los contrastes de impedancia.

Es bien conocido que las amplitudes de las ondas sísmicas se incrementan al atravesar suelos blandos cercanos a la superficie. La impedancia puede calcularse partiendo del principio de la conservación de la energía. Si se desprecia la pérdida de energía debida al amortiguamiento, la energía $E(t)$ se puede definir como.

$$E(t) = \frac{1}{2} \rho V x^2(t) \quad (7)$$

Donde ρV es la impedancia del medio ρ y V representan la densidad de la masa de suelo y la velocidad de ondas respectivamente y $x(t)$ es la velocidad del movimiento sísmico. El principio de conservación de la energía también establece que la energía debe permanecer constante durante toda la propagación, cualquier reducción en la impedancia debe ser compensada con un incremento en la velocidad del movimiento sísmico. Si la impedancia cambia gradualmente de ρV_1 a ρV_2 la amplificación se define de la siguiente forma (Joyner, 1988).

$$A = \sqrt{\frac{(\rho V_1)}{(\rho V_2)}} \quad (8)$$

Cuando el cambio de impedancia es repentino como cambios estratigráficos, la amplificación se determina por medio de la siguiente ecuación (Safak, 1995).

$$A = \frac{(\rho V_1)}{(\rho V_2)} \quad (9)$$

La amplificación por efectos de resonancia es otro factor que tiene fuerte influencia en los incrementos de las amplitudes de las ondas que se propagan a través del suelo.

La respuesta de los suelos está fuertemente relacionada con el modo de vibrar de éstos. Estos modos son características intrínsecas del suelo que no dependen de ninguna otra característica externa a él. Si se considera el suelo como un sistema y éste es excitado cuando ocurre un sismo, el suelo, por sus propiedades, amortiguará el movimiento y si las deformaciones no son lo suficientemente grandes, naturalmente vibrará sin perder rigidez (Lathi, 1998).

El modo característico de un suelo se representa por su frecuencia natural asociada a un periodo característico que pueden obtenerse de la siguiente forma.

$$f_n = \frac{1}{4h} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (10)$$

Donde h corresponde al espesor del suelo, G es el módulo de corte y ρ es la densidad del material.

El período es:

$$T = \frac{1}{f_n} \quad (11)$$

El efecto de resonancia, se produce cuando la frecuencia de la excitación sísmica se acerca a la frecuencia fundamental del suelo, produciendo importantes amplificaciones. El incremento

de las amplitudes producto de la resonancia, varía de acuerdo con la impedancia del suelo a mayor impedancia menor amplificación.

La frecuencia estimada supone que la deformación de la columna del suelo se da en una dirección y no hay acoplamiento con las vibraciones en las otras direcciones.

I.6.4 Estudio de los efectos de sitio

Los registros de aceleración en este trabajo se procesan para obtener los espectros de Fourier y los espectros de aceleración absoluta, con la finalidad de calcular los cocientes espectrales para determinar la respuesta del sitio y se describen a continuación.

I.6.4.1 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier permite proyectar una función mediante coordenadas de frecuencia utilizando valores complejos en ejes exponenciales presentando así el espectro de amplitudes de una función que en su forma original se encuentra en el dominio del tiempo o espacio y mediante esta transformación se proyecta al dominio de la frecuencia, donde se encuentran contenidas las amplitudes del movimiento presente en el registro de aceleración. Anteriormente se mencionó que todos los medios presentan una frecuencia predominante que es dependiente tanto de su rigidez como de su masa, por medio de la transformada de Fourier, es posible identificar las frecuencias predominantes en cada uno de los sitios a través de los cocientes espectrales que más adelante se describen.

La transformada de Fourier se define como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt \quad (12)$$

donde:

$F(\omega)$ = Transformada de Fourier.

$f(t)$ = Registro de aceleración en el dominio del tiempo.

$e^{-i\omega t}$ = Se define como la base para proyectar $f(t)$ en el dominio de la frecuencia (ω).

La transformada inversa de Fourier:

La transformada inversa de Fourier permite la reconstrucción de la señal al dominio del tiempo y se representa como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w)e^{iwt} dw \quad (13)$$

donde:

$f(t)$ = Registro de aceleración en el dominio del tiempo.

$F(w)$ = Transformada de Fourier.

e^{iwt} = Se define como las bases para proyectar la función en el dominio del tiempo.

I.6.4.2 Función de transferencia y respuesta de sitio

Un sistema cualquiera descrito por una función dada, sujeto a una excitación denominada como función de entrada, generará una salida cuyo comportamiento depende tanto de la entrada como del sistema.

Consideremos la ecuación siguiente que representa un oscilador amortiguado y excitado en su base:

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\Omega\dot{x}(t) + \Omega^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (14)$$

Donde $x(t)$ es el desplazamiento del sistema, $\dot{x}(t)$ representa la velocidad, $\ddot{x}(t)$ la aceleración, ξ es el % de amortiguamiento, Ω frecuencia radial de vibración y $\ddot{x}_g(t)$ representa la excitación (aceleración del terreno).

La respuesta asociada al desplazamiento del sistema, puede determinarse aplicando la transformada de Fourier a la ecuación (14) (Lathi, 1998), e identificando la relación existente entre desplazamiento, velocidad y aceleración se obtiene:

$$-\omega^2\hat{x}(\omega) + 2\xi\Omega i\omega\hat{x}(\omega) + \Omega^2\hat{x}(\omega) = -\hat{\ddot{x}}_g(\omega) \quad (15)$$

Aquí $\hat{x}(\omega)$ representa la transformada de Fourier del desplazamiento $x(t)$. La relación que existe entre la transformada de Fourier asociada al desplazamiento del sistema $\hat{x}(\omega)$ y la transformada de Fourier de la excitación $\hat{x}_g(\omega)$, se denomina función de transferencia definida por $\hat{H}(\omega)$.

$$\hat{x}(\omega) = \frac{\hat{x}_g(\omega)}{\omega^2 - \Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega} \quad (16)$$

$$\hat{H}(\omega) = \frac{\hat{x}(\omega)}{\hat{x}_g(\omega)} = \frac{1}{\omega^2 - \Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega} \quad (17)$$

La relación que existe entre la transformada de Fourier del desplazamiento, velocidad y aceleración es:

$$\hat{\dot{x}}(\omega) = i\omega \hat{x}(\omega) \quad (18)$$

$$\hat{\ddot{x}}(\omega) = -\omega^2 \hat{x}(\omega) \quad (19)$$

La función de transferencia y la respuesta asociada a la velocidad del sistema son:

$$\hat{H}(\omega)v = \frac{\hat{\dot{x}}(\omega)}{\hat{x}_g(\omega)} = -\frac{i\omega}{\omega^2 - \Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega} \quad (20)$$

$$\hat{\dot{x}}(\omega) = i\omega \frac{\hat{x}_g(\omega)}{\omega^2 - \Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega} \quad (21)$$

Y las asociadas a la aceleración relativa al sistema:

$$\hat{H}(\omega)a = \frac{\hat{\ddot{x}}(\omega)}{\hat{x}_g(\omega)} = \frac{\omega^2}{\omega^2 - \Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega} \quad (22)$$

$$\hat{\ddot{x}}(\omega) = -\omega^2 \frac{\hat{x}_g(\omega)}{\omega^2 - \Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega} \quad (23)$$

La aceleración absoluta puede definirse con la siguiente expresión:

$$\hat{\ddot{x}}(\text{abs}) = \hat{\ddot{x}}(\omega) + \hat{\ddot{x}}_g(\omega) \quad (24)$$

La función de transferencia de aceleración absoluta se describe con la expresión:

$$\hat{H}(\omega)_{abs} = \frac{\hat{x}(\omega) + \hat{x}_g(\omega)}{\hat{x}_g(\omega)} = \frac{\hat{H}(\omega) a \hat{x}_g(\omega) + \hat{x}_g(\omega)}{\hat{x}_g(\omega)} = \frac{-\Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega}{\omega^2 - \Omega^2 - 2\xi\Omega i\omega} \quad (25)$$

Por medio de la ecuación (24) se determina la respuesta del medio y se obtienen los cocientes espectrales con que se estiman los efectos de sitio (Lathi, 1998; Castellanos, 2008).

I.6.5 Amplificaciones por efectos de sitio

Las amplificaciones del movimiento descritas en 1.4.3 se determinan en este trabajo mediante cocientes espectrales de Fourier y cocientes espectrales de aceleración absoluta. Estos cocientes representan en la práctica la función de transferencia que define las amplificaciones de los estratos superficiales con respecto a un sitio de referencia en el caso del análisis de Fourier (Romo y Seed, 1986; Safak, 1997) y muestran los períodos predominantes en un sitio dado para el caso de los cocientes de aceleración absoluta.

I.6.5.1 Cocientes espectrales obtenidos con los espectros de amplitudes de Fourier (EAF)

Los espectros de amplitudes de Fourier se obtienen analizando los registros sísmicos por medio de la transformada de Fourier tal como se describe en 1.4.4.1, y con ello se determinan los cocientes espectrales como la relación entre los EAF del sitio de estudio (EAF_s) con respecto al EAF de un sitio de referencia (EAF_{ref}) presente en suelo firme, específicamente en roca, donde se sabe no se presentan efectos de sitio y de esta forma se obtiene la amplificación del medio. Los cocientes espectrales de Fourier (CEF) se obtienen de la siguiente manera:

$$CEF = \frac{EAF_s}{EAF_{ref}} \quad (26)$$

1.6.5.2 Cocientes espectrales de aceleración absoluta (CEAA) obtenidos con los espectros de aceleración absoluta (EAA)

Los espectros de aceleración absoluta, se obtienen analizando los registros sísmicos por medio de la solución a la ecuación de un oscilador amortiguado y excitado en su base tal como se describe en 1.4.4.2, y con ello se determinan los cocientes espectrales como la relación entre los EAA del sitio de estudio (EAA_s) con respecto al EAA del sitio de referencia (EAA_{ref}) determinados por la siguiente expresión:

$$CEF = \frac{EAF_s}{EAF_{ref}} \quad (27)$$

1.6.6 Resistividad eléctrica en suelos

La resistividad eléctrica del subsuelo se obtiene por medio de la toma de mediciones utilizando geofísica, es un método que sirve para determinar los espesores y resistividad verdadera de estratos, entre otras propiedades. La finalidad de los estudios de resistividad eléctrica es determinar la distribución de la resistividad a su paso por el suelo por medio de corrientes eléctricas que se suministran al suelo para medir las diferencias de potencial resultante. Estas diferencias de potencial proporcionan información sobre las heterogeneidades del subsuelo y de sus propiedades eléctricas (Kearey *et al.*, 2002). Cuanto mayor es el contraste eléctrico entre la matriz del suelo y la heterogeneidad, más fácil es la detección. La resistividad eléctrica del suelo puede ser considerada como una aproximación de sus propiedades físicas (Banton *et al.*, 1997).

La resistividad ρ en (Ω m) puede describirse con la siguiente expresión:

$$\rho = R \left(\frac{S}{L} \right) \quad (28)$$

Donde, R es la resistencia eléctrica (Ω), L es la longitud de la sección y S el área.

La resistencia eléctrica de un cuerpo cilíndrico, regido por la ley de Ohm es:

$$R = \frac{V}{I} \quad (29)$$

Donde, V es el potencial e I es la corriente.

El potencial puede expresarse de la siguiente manera:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (30)$$

La medida de la resistividad eléctrica requiere de cuatro electrodos, dos llamados A y B, utilizados para inyectar corriente y otros dos llamados M y N utilizados para registrar la diferencia de potencial (figura 7). Por tanto la diferencia de potencial medida entre los electrodos M y N puede expresarse de la siguiente manera:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (30)$$

Donde AM, BM, AN y BN representa la distancia entre los electrodos A y M, B y N, A y N y B y N respectivamente. La resistividad eléctrica es calculada:

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \right] \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (31)$$

Donde K es un coeficiente geométrico que depende del arreglo de los electrodos A, B, M, y N.

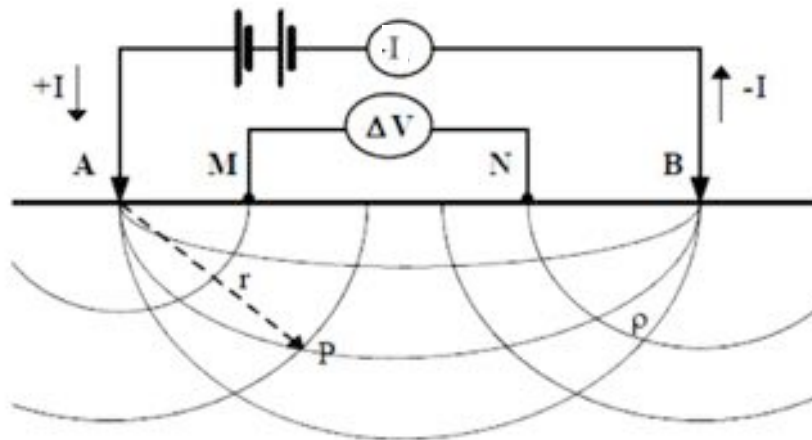


Figura 7. Arreglo electrónico para la medida de la resistividad del suelo.

I.6.7 Interpretación de la resistividad eléctrica

I.6.7.1 Resistividad aparente

Cuando el suelo es homogéneo, la resistividad calculada por medio de la ecuación (31) es constante e independiente del espaciado de los electrodos y de la localización superficial. Cuando el suelo es heterogéneo, la resistividad varía de acuerdo con la posición relativa de los electrodos (Bertrand, 1967). La resistividad calculada entonces se conoce como “resistividad aparente” porque es una estimación de los parámetros del medio pero no da la resistividad verdadera (Meheni *et al.*, 1996).

I.6.7.2 Modelado directo

La modelación directa consiste en determinar numéricamente los espesores y resistividades reales de los horizontes determinados mediante la modelación cualitativa y ajustarlos de tal manera que la curva teórica producto del modelado sea similar a la curva de campo. El modelo final será aquel que de acuerdo al intérprete sea representativo de las condiciones del subsuelo (Belmonte, 2005).

I.6.7.3 Inversión de datos

La inversión es un proceso no lineal y su solución comienza por medio de un modelo inicial cuyos parámetros se van actualizando por medio de métodos iterativos. Para simular la distribución de la resistividad eléctrica, el modelo del medio debe ser discretizado en celdas ($j=1$ a m), la resistividad en cada celda es fija (m_j , con $j=1$ a m). Los datos de resistividad eléctrica aparente pueden describirse como una función matemática con las propiedades del medio como variables:

$$d_i = F_i(m_1, m_2, \dots, m_m) + e_i \quad (32)$$

Donde d_i son los datos observados ($i=1$ a n), F_i es un operador variable que permite calcular el modelo respuesta para un conjunto de parámetros dados (m_j , con $j=1$ a m) en cada punto ($i=1$ a n) y e_i son los errores en el conjunto de datos observados (Sharma, 1997).

Los datos teóricos del modelo inicial c_i son calculados en cada punto ($i=1$ a n) como:

$$d_i = F_i(m_1, m_2, \dots, m_m) + e_i \quad (33)$$

La finalidad es encontrar un conjunto de datos de resistividades (m_j) que minimice las diferencias entre los datos teóricos y observados.

$$e_i = d_i - c_i \quad (34)$$

1.6.8 Características topográficas

Las variaciones topográficas son un indicador de la geomorfología y la litología de una región. Con montañas pronunciadas que sugieren un material rocoso, zonas planas o valles indicando suelos (tales como materiales aluviales en el caso de Oaxaca) y zonas de transición en pendientes intermedias (Wald y Allen, 2009). La pendiente es un factor que determina directamente la respuesta del sitio pues este parámetro es un estimador del tipo de material geológico que es posible encontrar en cierta región (Wald y Allen, 2007; Shafique, 2011), menores pendientes sugieren mayores espesores de suelos no consolidados. Las pendientes son calculadas de forma convencional por medio de la resolución de ángulos a través de elevaciones en diferentes puntos.

1.6.9 Percepción remota

La percepción remota o teledetección es una técnica de adquisición de datos en forma de imágenes que son tomadas por medio de sensores espaciales o aéreos que registran y almacenan la energía existente entre la superficie terrestre y el sensor para poder así interpretar la información para diversas aplicaciones (Chuvienco, 2008).

Los tres principales elementos que componen un sistema de teledetección son el sensor, el objeto y la energía que permite captar ese objeto. El sol ilumina la superficie terrestre y esta energía se refleja dependiendo de las características físicas del objeto.

De los tres procesos de transferencia de energía: convección, conducción y radiación, éste último es la base de los sistemas de teledetección debido a que el flujo de energía existente entre la superficie y el sensor es una forma de radiación electromagnética. Según la teoría ondulatoria propuesta por Huygens y Maxwell la energía electromagnética se propaga en forma de ondas sinusoidales indefinidamente a través del espacio con campos magnéticos y eléctricos generándose continuamente.

1.6.9.1 Espectro electromagnético

La radiación electromagnética se clasifica en términos de su longitud de onda o frecuencia, el espectro muestra la distribución de energía de todas las ondas electromagnéticas que van desde los de menor longitud de onda como los rayos X o gamma hasta las ondas de mayor longitud como las de radio. El espectro se divide en bandas definidas por su longitud de onda de la siguiente manera:

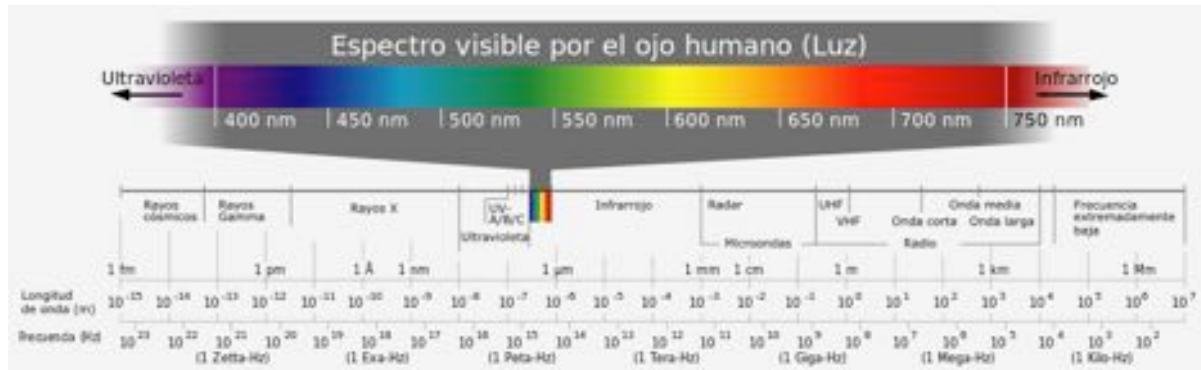


Figura 8. Espectro electromagnético

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

II.1 Datos

En este trabajo se realizan correlaciones entre amplificaciones estimadas a partir de registros sísmicos, datos de profundidades del estrato rocoso, pendientes topográficas y geología para estimar la respuesta sísmica de la zona de estudio.

La información utilizada consiste de: registros sísmicos proporcionados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, datos geofísicos de sondeos eléctricos verticales (SEV's) proporcionados por el CIIDIR Oaxaca, imágenes satelitales Landsat 7, cortesía de U.S. Geological Survey (USGS) obtenidos de <http://landsat.usgs.gov>, modelos digitales de elevación GDEM 2 (Global Digital Elevation Model Version 2) obtenidos gratuitamente desde http://lpdaac.usgs.gov/get_data propiedad de la NASA y de Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) y de USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Los datos son tomados desde el satélite ASTER con una resolución de 30 m.

Los software utilizados para la construcción de resultados son: Degtra versión 9.0.0 desarrollada por Ordáz (2012) del Instituto de Ingeniería de la UNAM para el procesado de datos sísmicos y obtención de cocientes espectrales, Idrisi para el procesado digital de los datos satelitales, IPWIN para determinar los espesores de suelos y el Surfer para la obtención del mapa de isopacas así como la presentación final de las figuras.

II.2 Metodología

Para estimar los efectos de sitio en los Valles Centrales de Oaxaca, se realiza lo siguiente:

- 1) Selección de registros sísmicos.
- 2) Obtención de los Espectros de Amplitudes y espectros de respuesta de aceleración absoluta.
 - 2.1) Espectros de Amplitudes de Fourier (EAF).

2.2) Espectros de aceleraciones absolutas (EAA).

3) Cocientes espectrales.

3.1) Obtenidos mediante EAF.

3.2) Obtenidos mediante EAA.

4) Determinación de Amplificaciones y Períodos fundamentales.

5) Correlaciones entre geología, pendientes y datos de amplificación, período y frecuencia para extrapolar los efectos de sitio a los Valles Centrales e identificar las zonas que no presentan amplificaciones.

5.1) Modelado directo e inversión de datos para obtener las profundidades del estrato rocoso por medio de los sondeos eléctricos verticales (SEV's).

5.2) Cálculo de pendientes a partir de datos de elevación ASTER obtenidos para la zona de estudio.

5.3) Identificación de características geológicas de acuerdo a pendiente y ubicación de estaciones sísmicas por medio de las cartas geológicas y datos Landsat existentes para la región.

II.2.1 Selección de registros sísmicos

Se seleccionaron aquellos eventos registrados únicamente dentro de la Ciudad que corresponden a 8 estaciones acelerométricas que se encuentran a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II) y del Instituto de Geofísica o Servicio Sismológico Nacional (IG), de acuerdo con la tabla 1:

Tabla 1. Estaciones acelerométricas dentro de la Ciudad de Oaxaca a cargo del Servicio Sismológico Nacional (IG) y del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II).

| CLAVE | ESTACION | LATITUD °N | LONGITUD °W | TIPO DE SUELO | INSTITUCION RESPONSABLE |
|-------|-------------------------|------------|-------------|---------------|-------------------------|
| OAXM | FACULTAD DE MEDICINA | 17.0829° | -96.7187° | ALUVIAL | II |
| OXAL | ALAMEDA DE LEON | 17.0614° | -96.7261° | ALUVIAL | II |
| OXBJ | ESC. BENITO JUAREZ | 17.0673° | -96.7240° | ALUVIAL | II |
| OXCU | C.U. | 17.0489° | -96.7133° | ARCILLA | II |
| OXLC | LAS CANTERAS | 17.0650° | -96.7033° | ROCA | II |
| OXPM | ESCUELA PRIMARIA MÚJICA | 17.0614° | -96,7169° | ALUVIAL | II |
| OXTO | INSTITUTO TECNOLOGICO | 17.0784° | -96.7442° | ALUVIAL | II |
| OXIG | OAXACA | 17.0720° | -96.7330° | ROCA | IG |

II.2.2.1 Eventos

La selección está basada en fecha y hora de ocurrencia, se consideran aquellos eventos que estén registrados en al menos dos estaciones, lo cual permite estimar los cocientes espectrales. Una de estas estaciones debe ser el sitio de referencia elegida como el instrumento ubicado sobre el terreno más duro a partir del cual se calcularán las amplificaciones que definen los efectos de sitio. Ver apéndice A.

II.2.2 Espectros de amplitudes de Fourier y Espectros de respuesta de aceleración absoluta

Aplicando el análisis de Fourier y empleando el software Degtra, los registros de aceleración seleccionados para su análisis, que originalmente se encuentran en el dominio del tiempo se proyectan al dominio de la frecuencia al aplicar la transformada de Fourier obteniendo los espectros de amplitudes (EAF) correspondientes. Una vez que se tienen los EAF se definen los espectros que representan la zona donde se localiza terreno firme (estación OXLC), éstos son considerados como los espectros de referencia por estar libres de amplificaciones por efectos de sitio.

Los espectros de respuesta de aceleraciones absolutas (EAA), se obtienen por medio de las aceleraciones máximas obtenidas para un período dado, cada una de estas aceleraciones se coloca en una gráfica, formando una historia de aceleraciones máximas asociadas a distintos períodos. Se obtiene un espectro para el registro que representa el terreno firme y otro para los estratos de suelo.

II.2.3 Cocientes espectrales de Fourier y Cocientes de respuesta de aceleración absoluta

Una vez obtenidos los espectros para todos los sismos por analizar, se obtienen los cocientes espectrales determinados por la relación entre los EAF para un sitio de estudio con respecto a un EAF de referencia. Teniendo en cuenta que uno de los espectros contiene las amplificaciones por efectos locales y el otro no, los efectos de sitio presentes en la superficie son el resultado de realizar el cociente entre los dos espectros. Los cocientes obtenidos se suponen independientes del origen del sismo, por lo tanto se considera que las amplificaciones estimadas son generadas por todos los sismos que se presentan en el lugar.

Los cocientes de respuesta de aceleraciones absolutas se obtienen por la relación entre los EAA para un sitio de estudio con respecto a un EAA de referencia. Teniendo en cuenta que uno de los espectros contiene las amplificaciones por efectos locales y el otro no, los efectos de sitio presentes en la superficie son el resultado de realizar el cociente entre los dos espectros.

II.2.4 Determinación de Amplificaciones y Períodos fundamentales

Por ser el análisis de Fourier una herramienta que estudia sistemas invariantes en el tiempo asume que el medio es homogéneo, isotrópico y lineal. Los efectos de sitio entonces se calculan a partir de la función de transferencia definida por los cocientes espectrales. La frecuencia fundamental del suelo se obtiene de estos cocientes y corresponde a la frecuencia asociada a la amplitud máxima. Lo mismo ocurre con los cocientes de aceleración absoluta, el período predominante corresponde a aquel asociado con la mayor amplitud.

II.2.5 Correlaciones entre geología, pendientes y datos de amplificación, período y frecuencia para extrapolar los efectos de sitio a los Valles Centrales e identificar las zonas que no presentan amplificaciones

II.2.5.1 Modelado directo e inversión de datos para obtener las profundidades del estrato rocoso por medio de los sondeos eléctricos verticales (SEV's)

Por medio de la de los sondeos eléctricos verticales SEV's se interpretó el espesor del aluvión, con el uso de la modelación directa e inversión de datos en el software IPWIN. Los espesores obtenidos para cada localización de sondeo, y a través de interpolaciones lineales realizadas en el software Surfer se obtiene el mapa de isopacas para identificar la profundidad aproximada del aluvión en cualquier punto deseado de las áreas de pendientes de 0 a 6°.

II.2.5.2 Cálculo de pendientes a partir de datos de elevación ASTER obtenidos para la zona de estudio

Las pendientes son calculadas de forma convencional por medio de la resolución de ángulos a través de elevaciones en diferentes puntos. Para determinar el mapa de pendientes de la región de estudio se utilizó el programa Idrisi así como para los mapas booleanos para rangos de pendientes de 0 a 6 ° y mayores a 15°. Con este procedimiento es posible identificar la pendiente en cualquier punto deseado del área abarcada.

II.2.5.3 Identificación de características geológicas de acuerdo a pendiente y ubicación de estaciones sísmicas por medio de las cartas geológicas y datos Landsat existentes para la región

Por medio del mapa geológico obtenido del Servicio Geológico Mexicano se delimitan las zonas aluviales, que son directamente obtenidas a partir de esta información. Adicionalmente, los datos satelitales Landsat, se tratan digitalmente para obtener composiciones de color por medio de las bandas espectrales en el software Idrisi para identificar la geología por medio de un análisis visual y verificar que tanto los datos obtenidos con los mapas geológicos tanto los obtenidos mediante este análisis sean consistentes.

De acuerdo con los pasos descritos anteriormente, para cada una de las estaciones acelerométricas, habiendo obtenido las amplificaciones, frecuencias y períodos predominantes, se asocia cada una a su pendiente topográfica y espesor de aluvión; esta información permite extrapolar los efectos de sitio a los Valles Centrales, por medio de la consideración de los espesores de aluvión. Las zonas con espesores de aluvión similares a alguna de las estaciones sísmicas podrían presentar efectos de sitio muy cercanos, de esta forma es posible aproximar las amplificaciones que podrían esperarse en las zonas aluviales donde no existen registros de aceleración.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

III.1 Generalidades

Los resultados fueron obtenidos mediante el procesado de datos sísmicos para obtener las amplificaciones, períodos y frecuencias predominantes, y a partir de los SEV's se determinó la profundidad del estrato rocoso o espesor del aluvión. Los mapas de pendientes para determinar zonas de suelos no consolidados se obtuvieron a partir de imágenes raster tomadas del satélite Landsat.

III.2 Procesado de registros sísmicos para la obtención de las amplificaciones, períodos y frecuencias predominantes en la Ciudad de Oaxaca

Cada uno de los sismos que se incluyen en la tabla 2 se procesaron con ayuda del programa DEGTRA versión 9.0.0 en sus componentes este-oeste (EW) y norte-sur (NS), para obtener los espectros de Fourier y de respuesta de aceleración absoluta que permitieron calcular los cocientes espectrales respectivos, considerando la estación OXLC como referencia por localizarse en terreno firme donde se considera no existe amplificación por efecto de sitio.

Los cocientes espectrales de Fourier se presentan en las figuras 9 a 14. Se observan amplificaciones promedio en el terreno de hasta 10 veces en la estación OXTO para la componente este-oeste con respecto a la estación de referencia OXLC. Para las estaciones OAXM, OXTO y OXCU se observan más de una cresta que sugieren más de un modo de vibrar, que puede deberse principalmente a los cambios bruscos de estratigrafía que dominan la región.

En la tabla 4 se muestran las frecuencias predominantes en la localización de cada una de las estaciones, así como su amplificación y desviación estándar, obtenidos de analizar los cocientes de los espectros de Fourier.

En algunos casos de la tabla 4 e indicados con (*), la frecuencia predominante fue obtenida mediante el cálculo de promedio pesado considerando las amplitudes por medio de la siguiente expresión:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i a_i)}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (35)$$

Y la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2 a_i}{\sum_{i=1}^N a_i}} \quad (36)$$

Estas consideraciones se tomaron en las estaciones donde se presenta más de un modo de vibrar así como en las estaciones donde las amplificaciones oscilan alrededor de la unidad en todo el dominio de la frecuencia.

Los cocientes de respuesta de aceleración absoluta se presentan en las figuras 15 a 20. Los resultados obtenidos en estas gráficas muestran amplificaciones promedio de hasta 6.5 veces con período de 0.55 en la estación OXTO para la componente este-oeste con respecto a la estación de referencia OXLC. En la tabla 5 se muestran los periodos predominantes de los distintos sitios registrados, así como la amplificación asociada a estos períodos y su desviación estándar, obtenidos de analizar los cocientes de los espectros de aceleración absoluta.

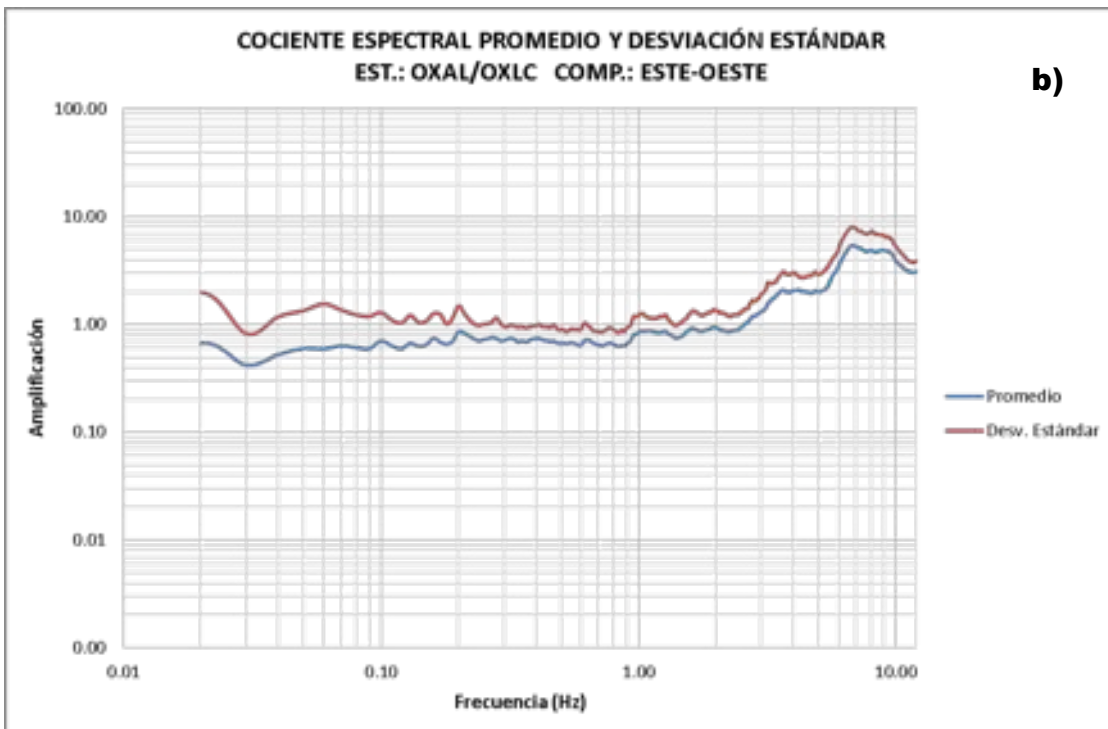
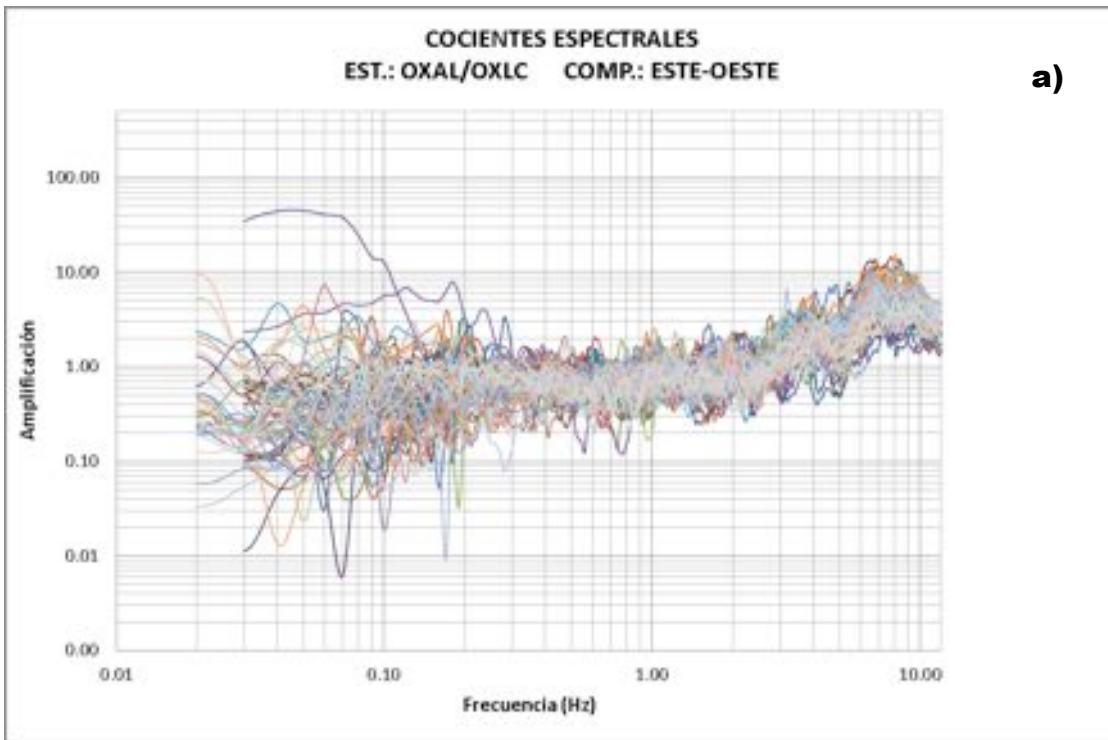
Para el cálculo de las gráficas promedio, no fueron considerados algunos sismos pues sus cocientes muestran perturbaciones que alteran el comportamiento tanto de las amplificaciones promedio como de las frecuencias naturales (ver tabla 2 y tabla 3).

Tabla 2. Cocientes espectrales de Fourier no considerados en las ampliaciones promedio.

| ESTACION | COMPONENTE (E-W) AAMMDDE | COMPONENTE (N-S) AAMMDDE |
|-----------------|---|---|
| OAXM | 9906152 0003011 0201301 1100311 | 9906152 0003011 0201301 0412101 1100311 |
| OXAL | 0802121 0807301 | 0802121 0807301 |
| OXBJ | 0608191 1006252 | 0812151 0908191 1103261 |
| OXCU | 0706021 0904171 0905221 0908191 1102111 | 0902181 0904071 0905221 |
| OXPM | 0902181 0905221 1011262 | 0806221 0902181 0904071 0905221 |
| OXTO | | 0805171 1006091 1106031 |

Tabla 3. Cocientes espectrales de aceleración absoluta no considerados en las amplificaciones promedio.

| ESTACION | COMPONENTE (E-W) AAMMDDE | COMPONENTE (N-S) AAMMDDE |
|-----------------|---|--|
| OAXM | 9906152 9909301 9911061 0003011 | 9906152 9909301 9911061 0003011 |
| OXCU | 0902181 0904071 0905221 0908191 1102251 | 0810161 0902181 0904071 0905221 |
| OXPM | 0402181 0905221 | 0109081 0902181 0904071 0905221 |
| OXTO | 0901171 1004201 1005131 | 0805171 0806011 0806221 0807301 1004121 1004161 1004201 1005131 1005311 1006081 1006082 1006091 |



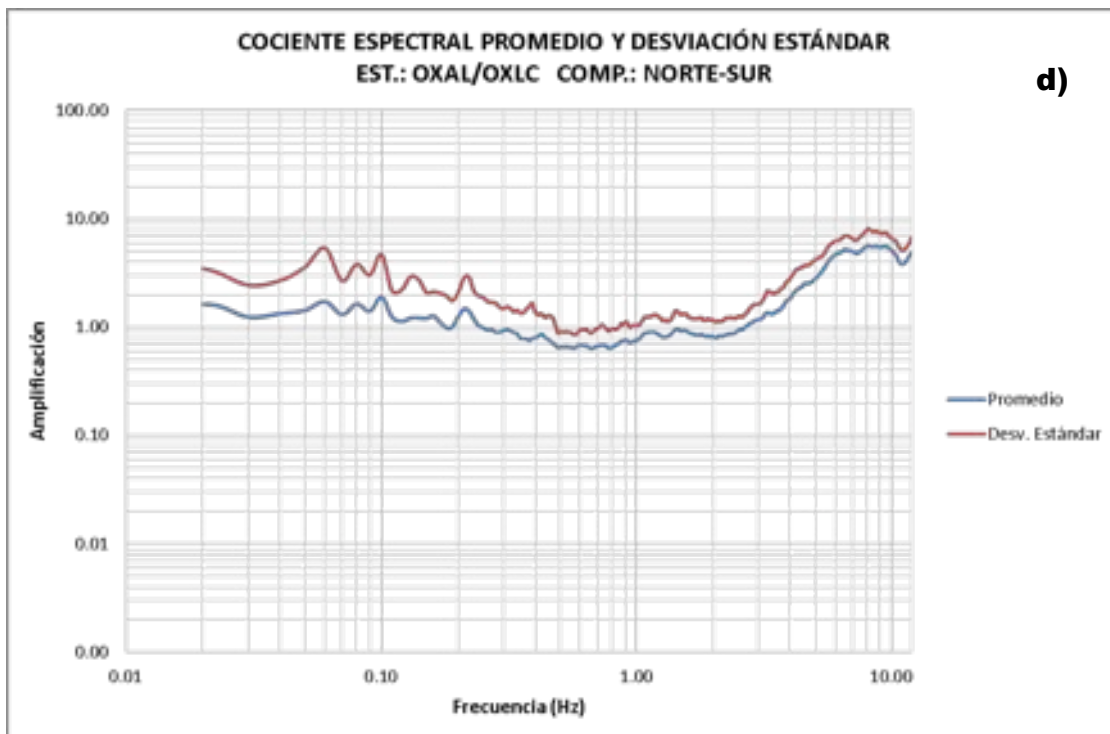
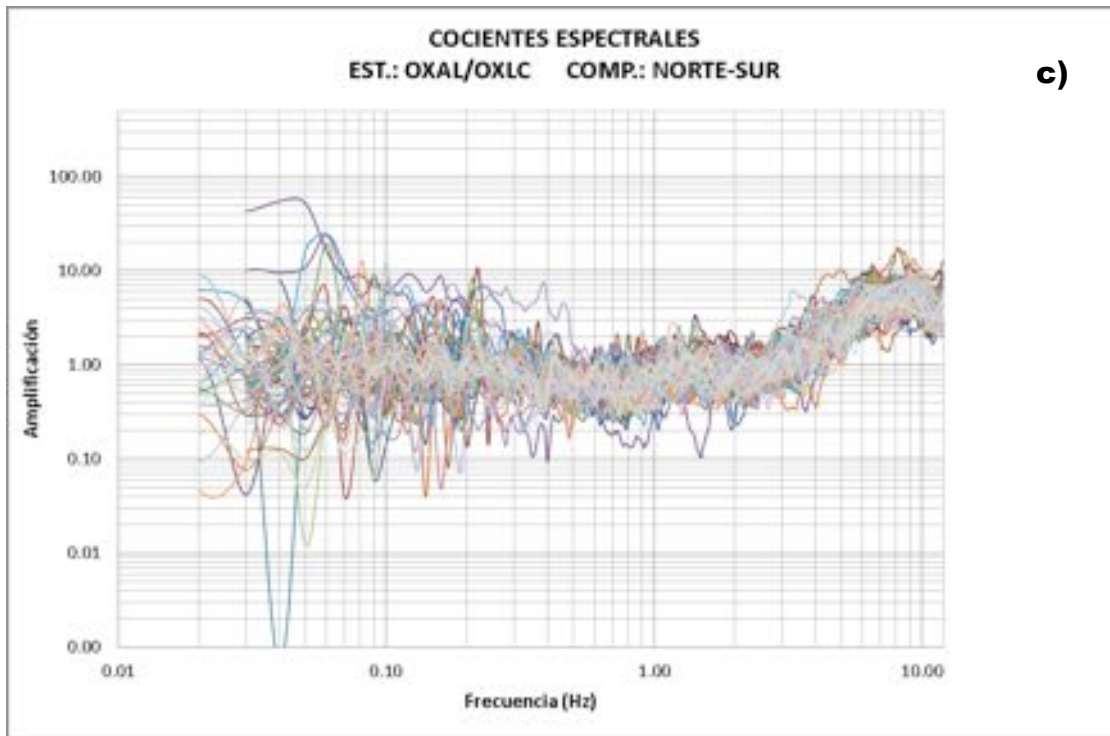
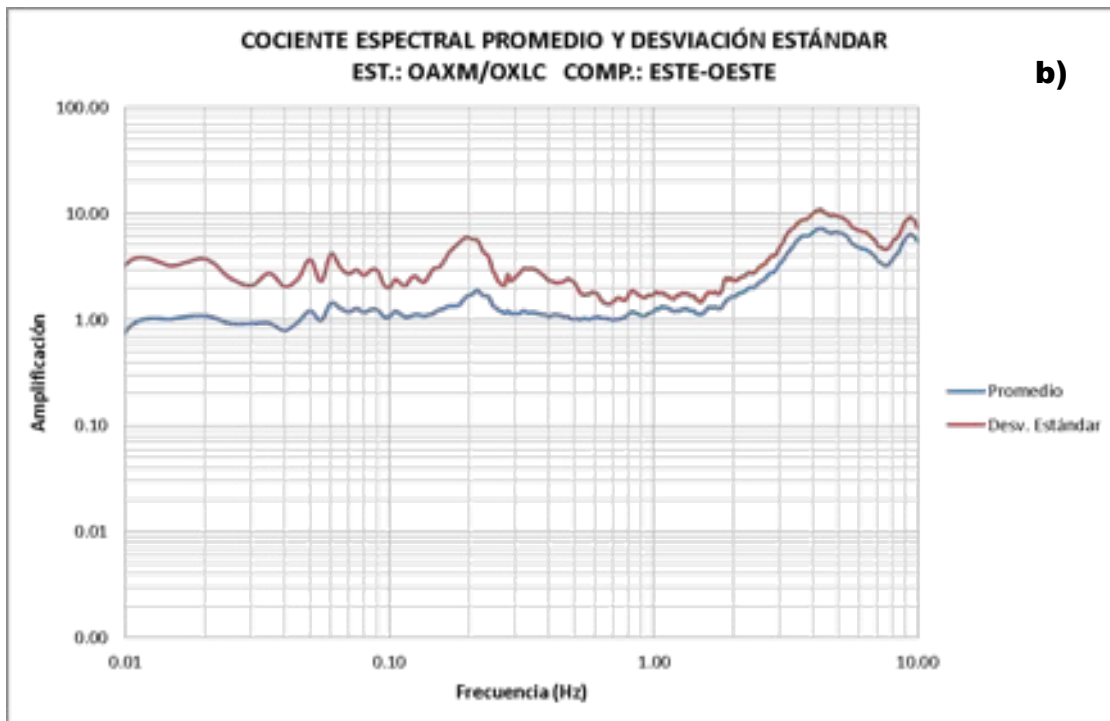
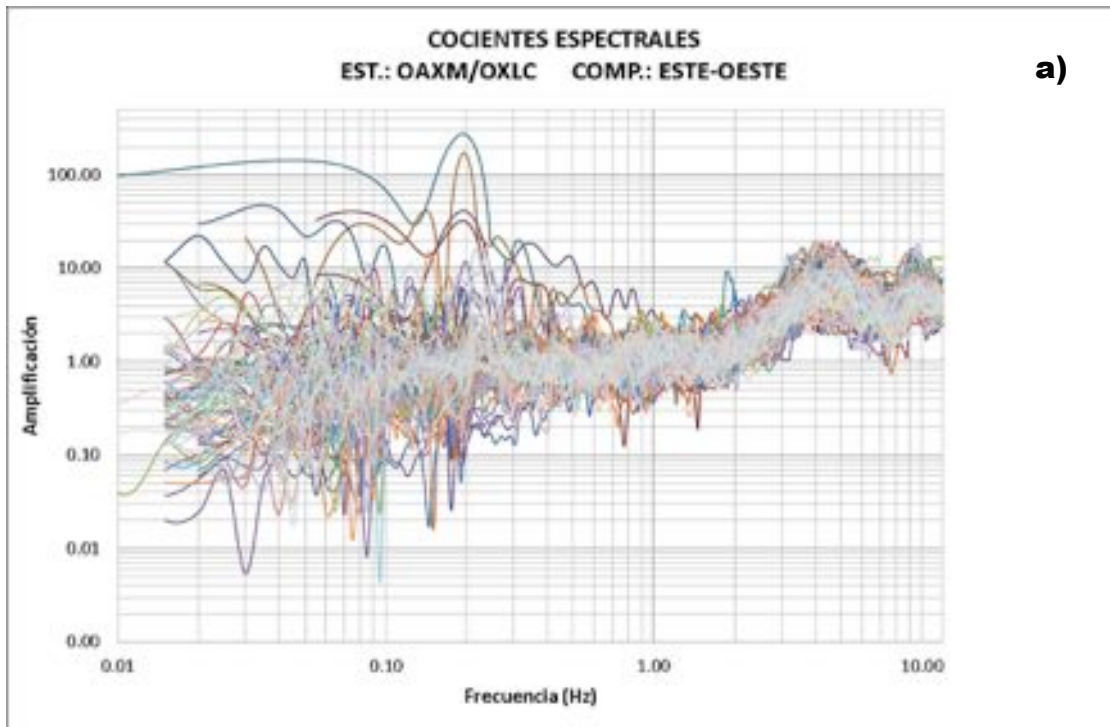


Figura 9. Cocientes espectrales de Fourier estación OXAL/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



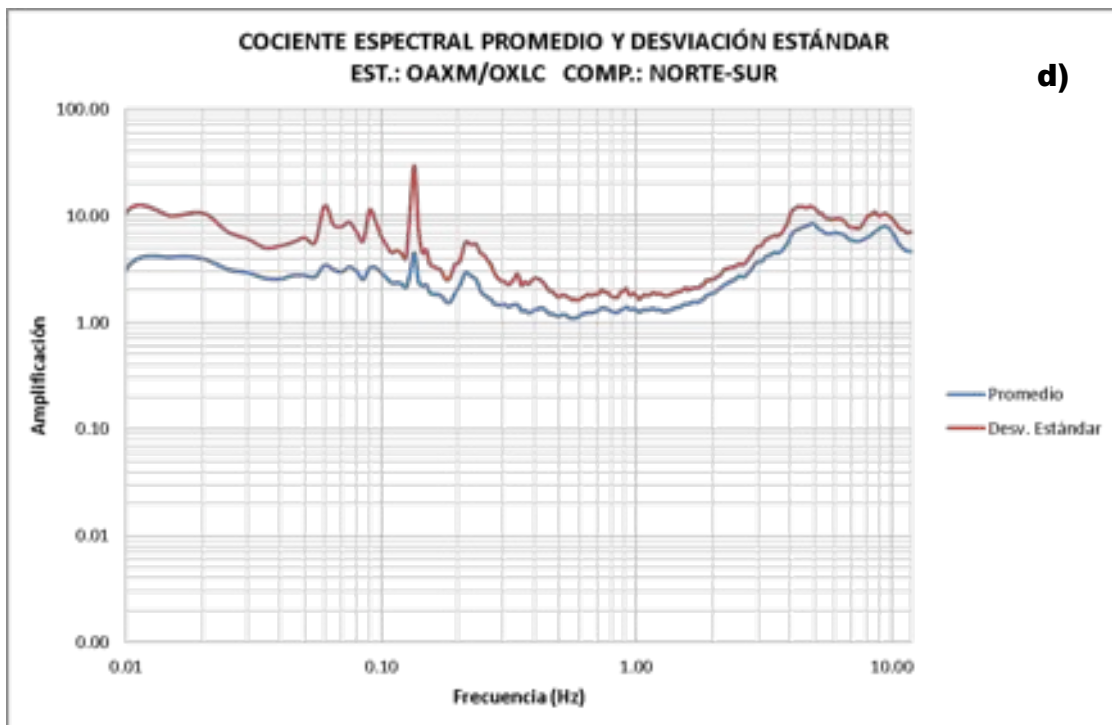
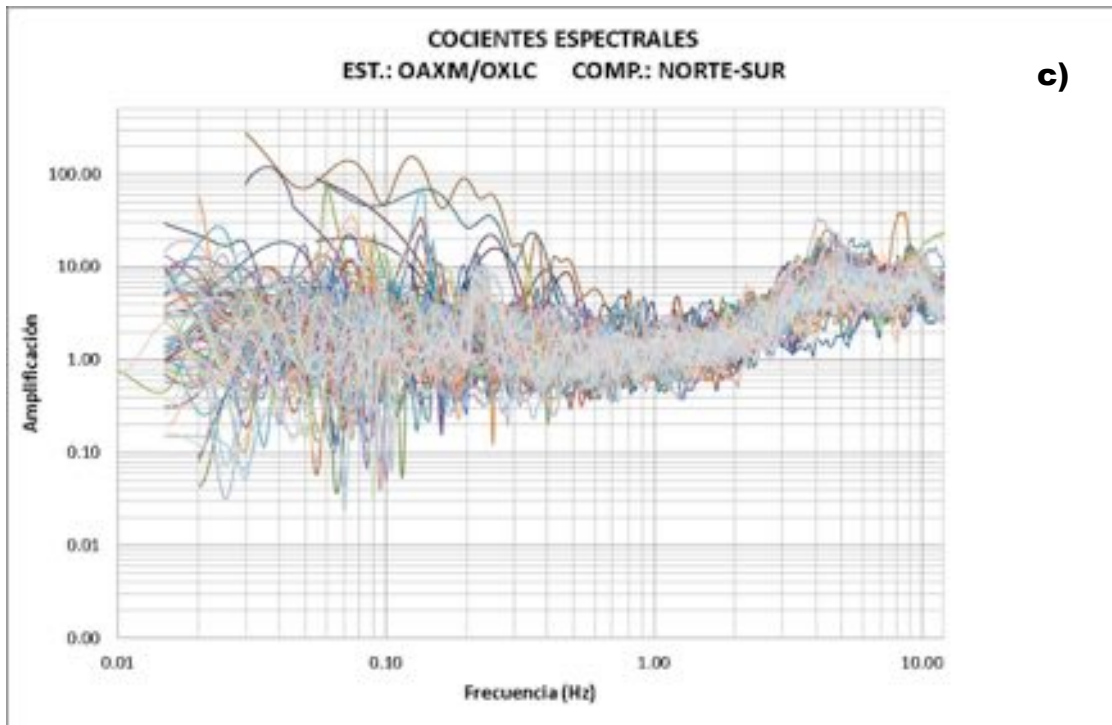
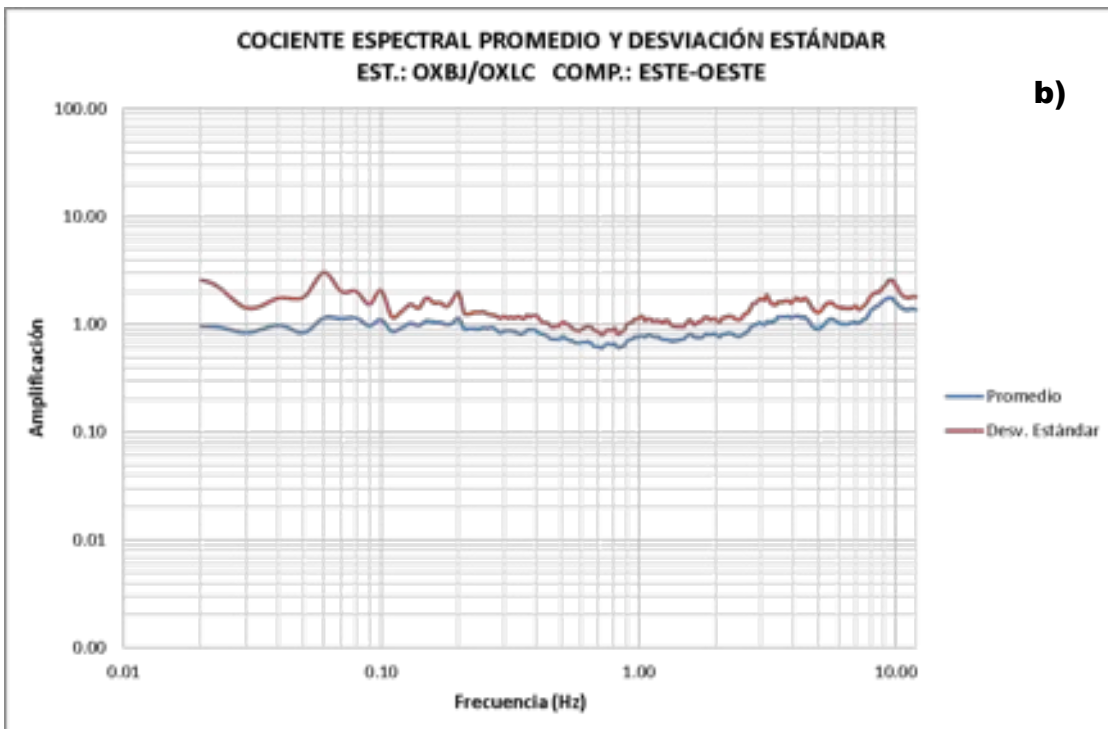
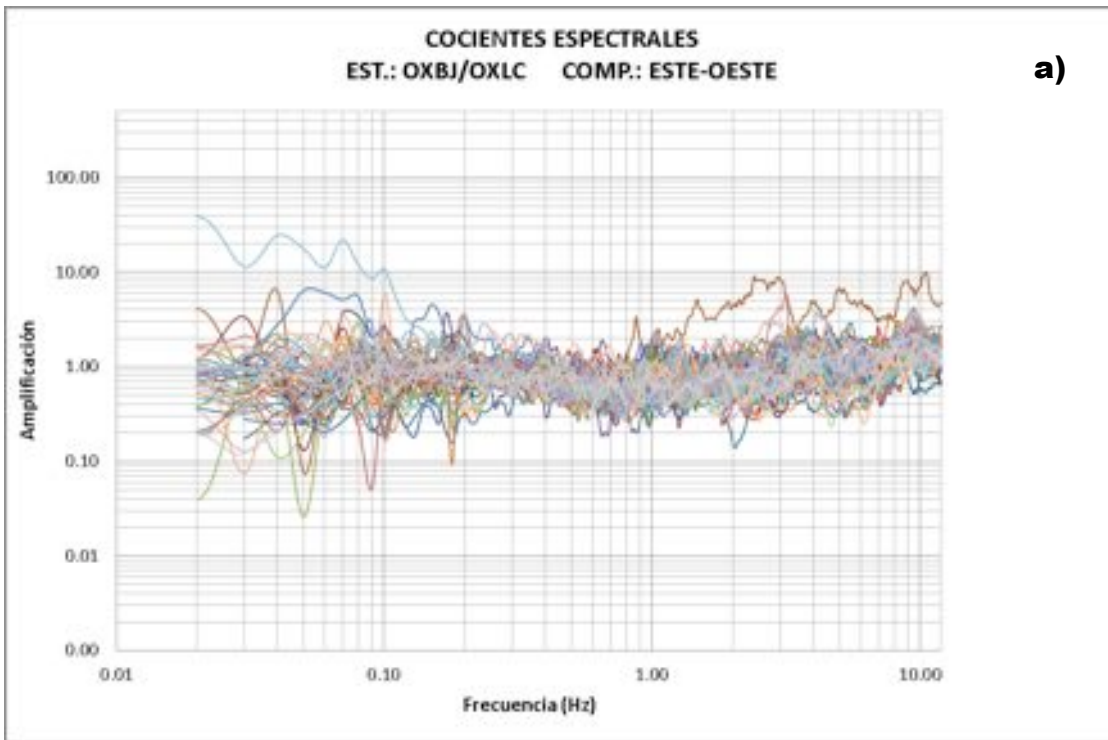


Figura 10. Cocientes espectrales de Fourier estación OAXM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



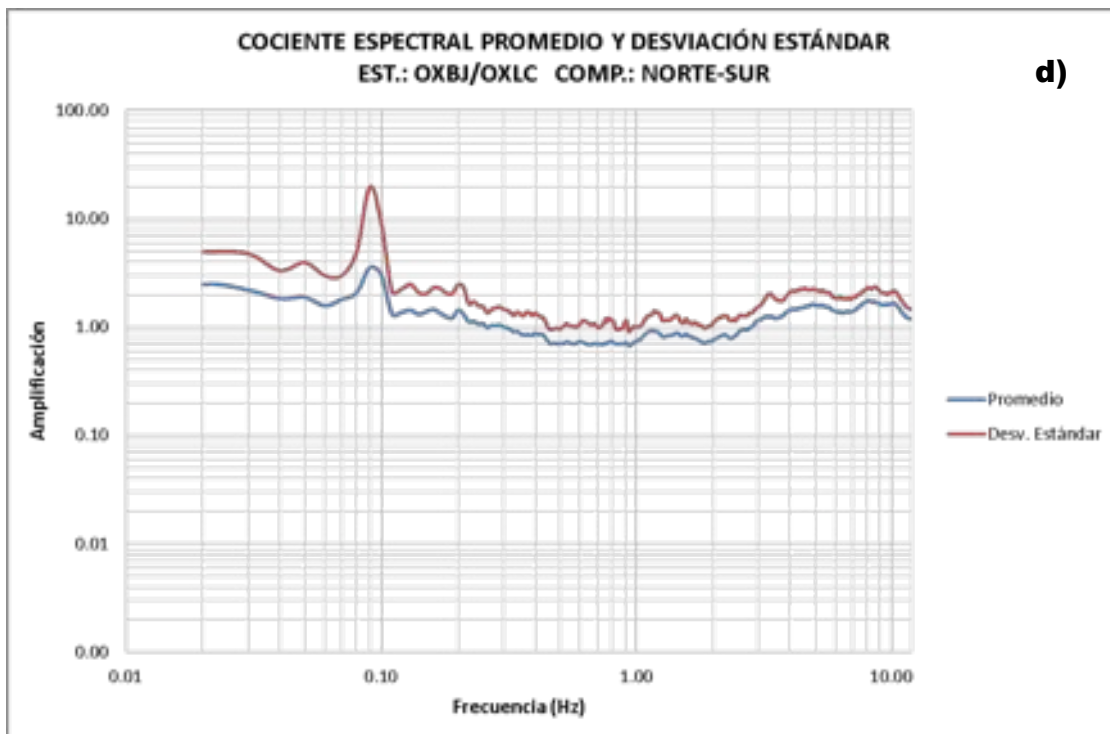
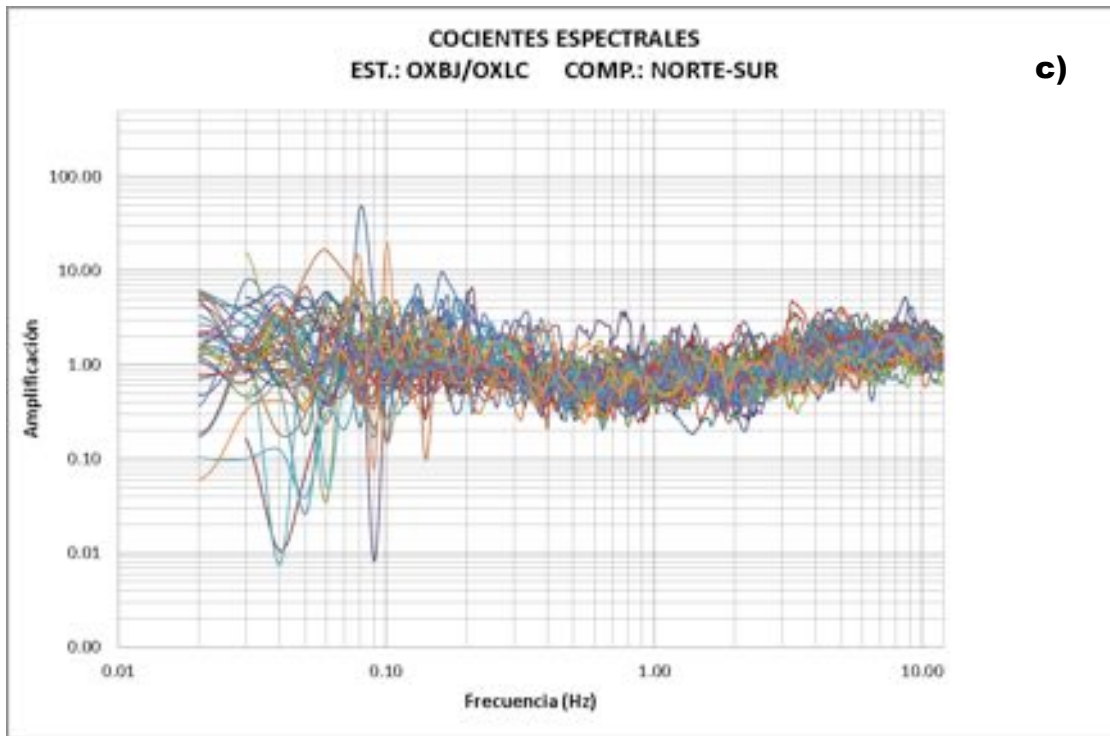
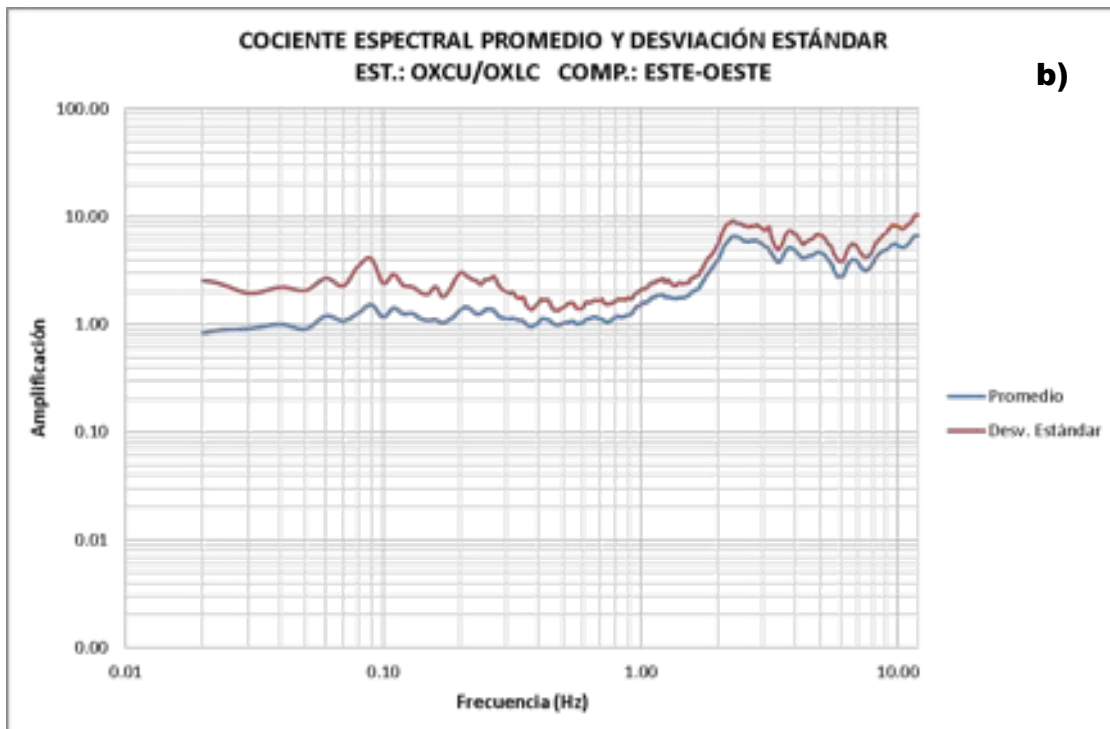
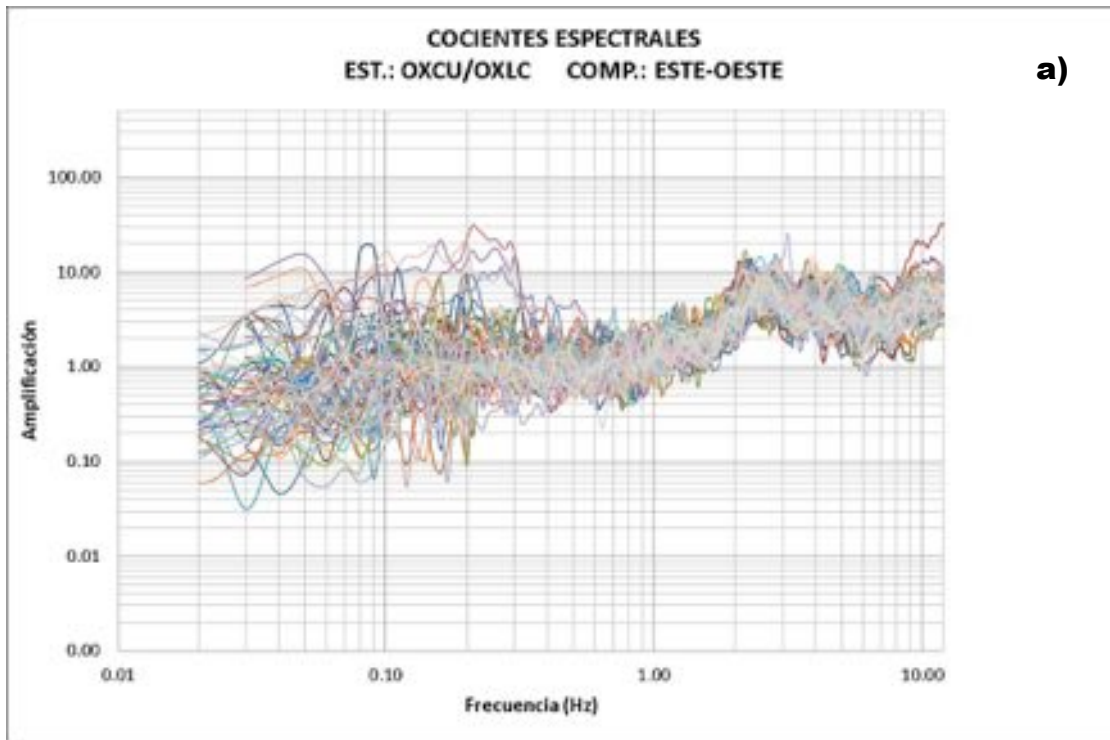


Figura 11. Cocientes espectrales de Fourier estación OXBJ/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



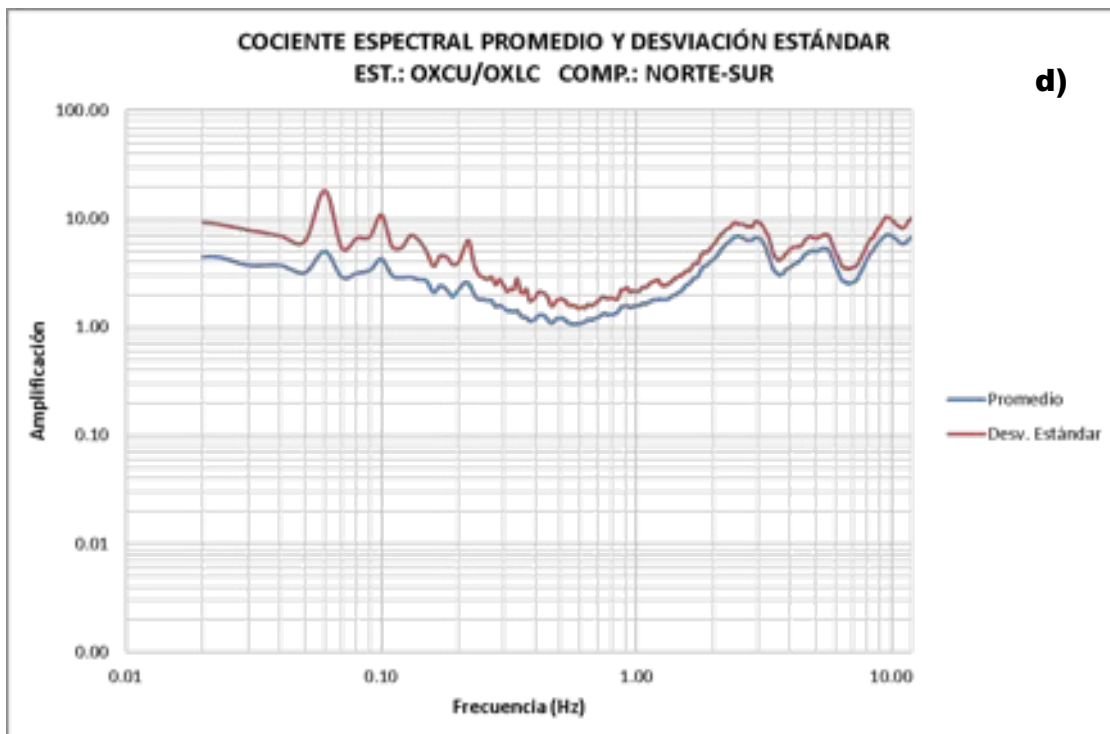
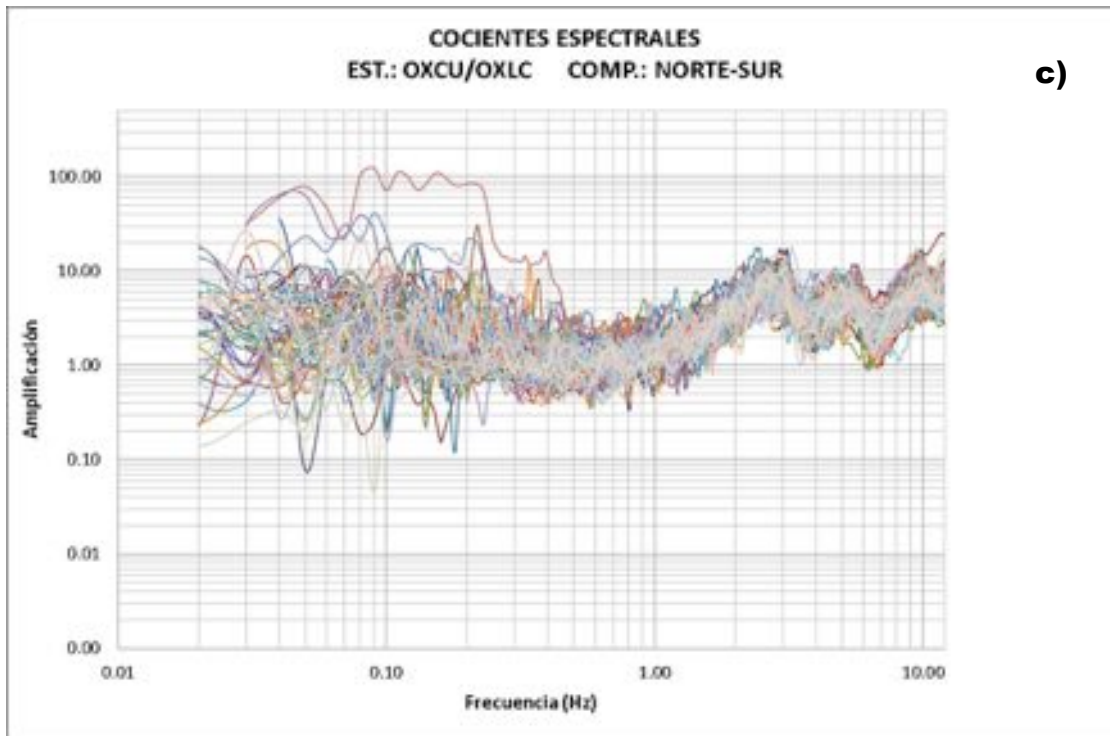
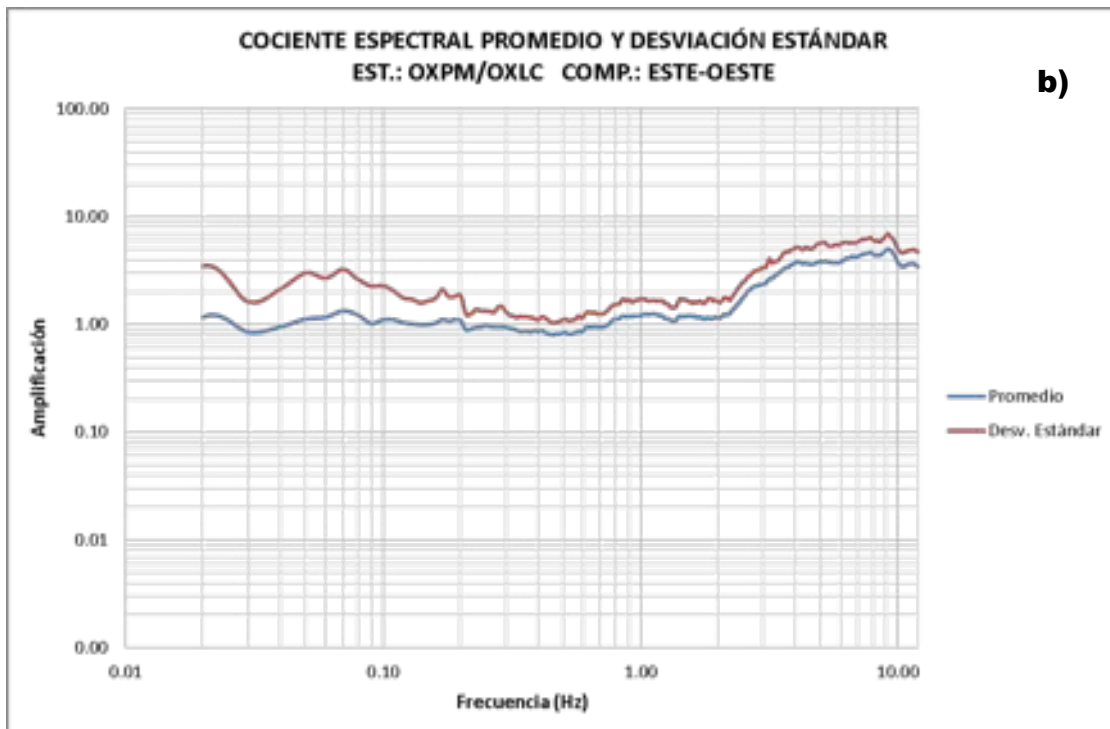
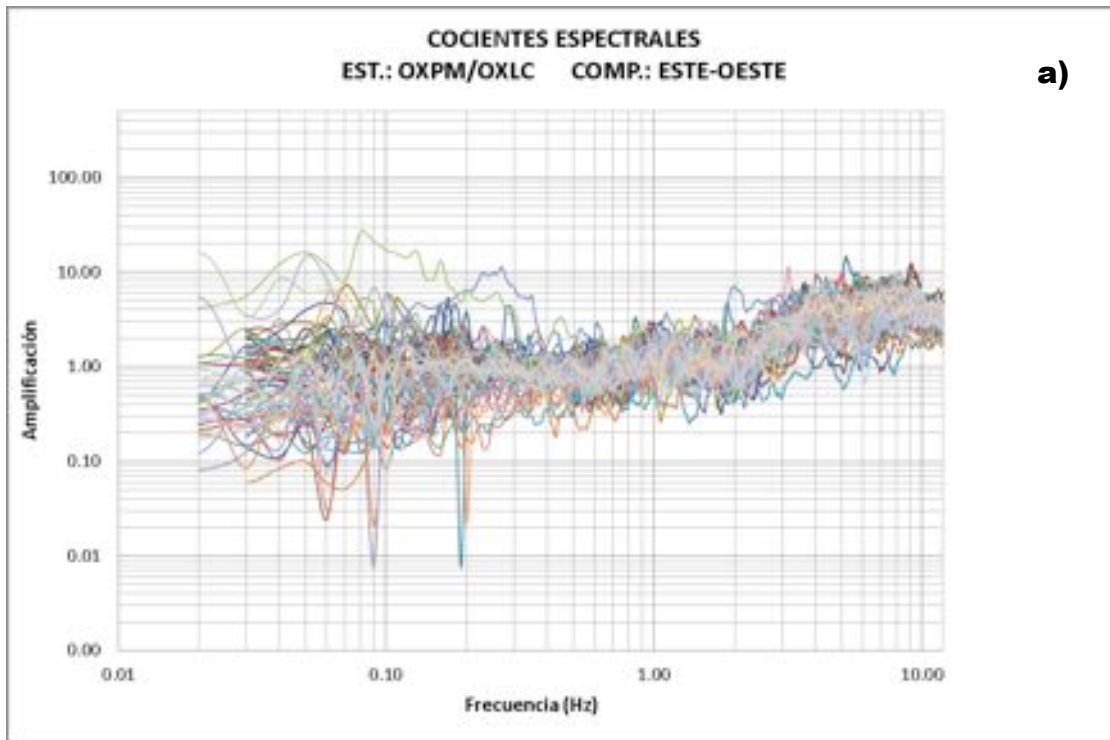


Figura 12. Cocientes espectrales de Fourier estación OXCU/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



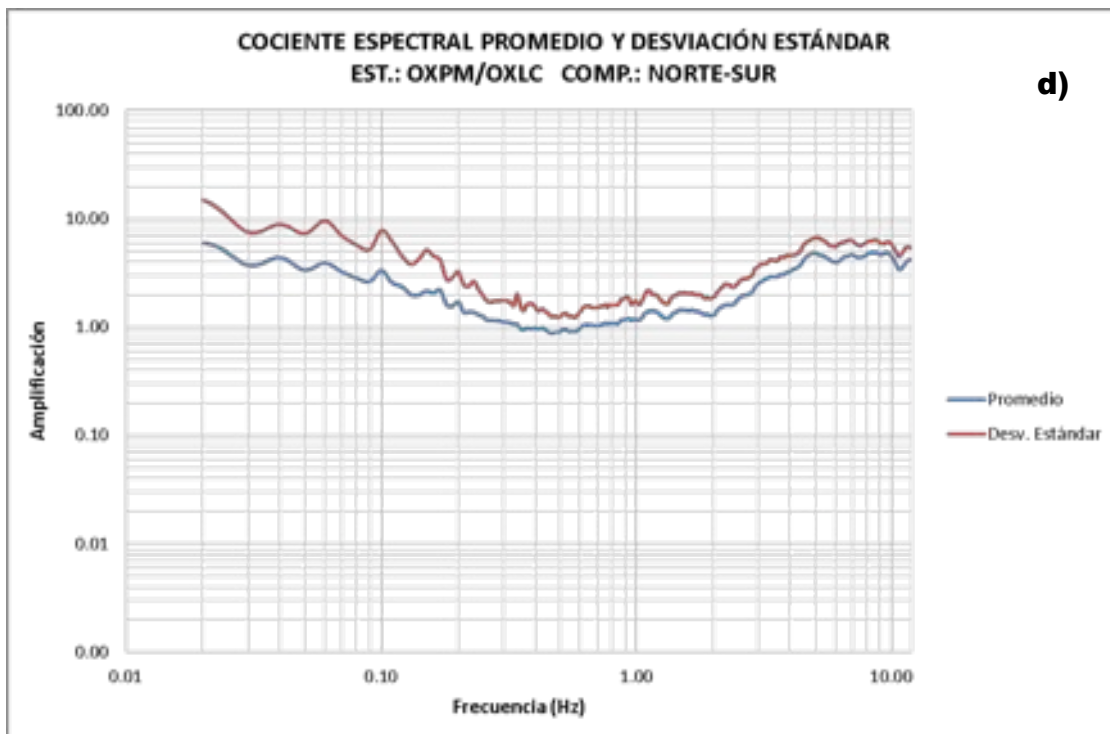
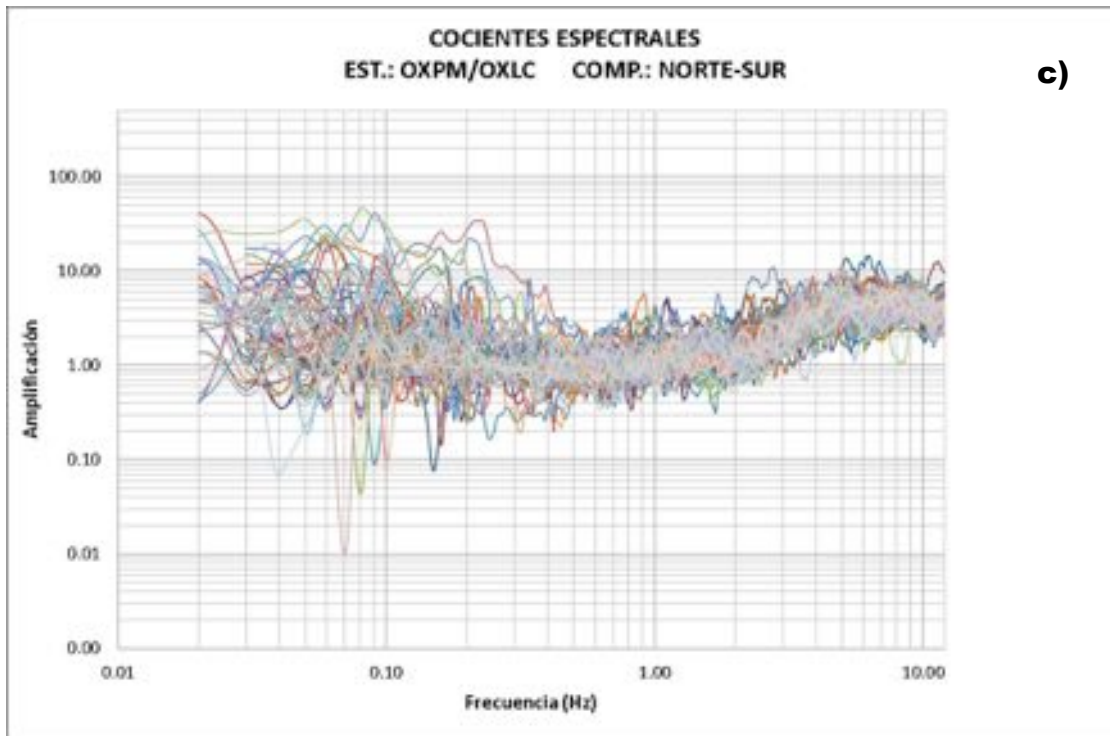
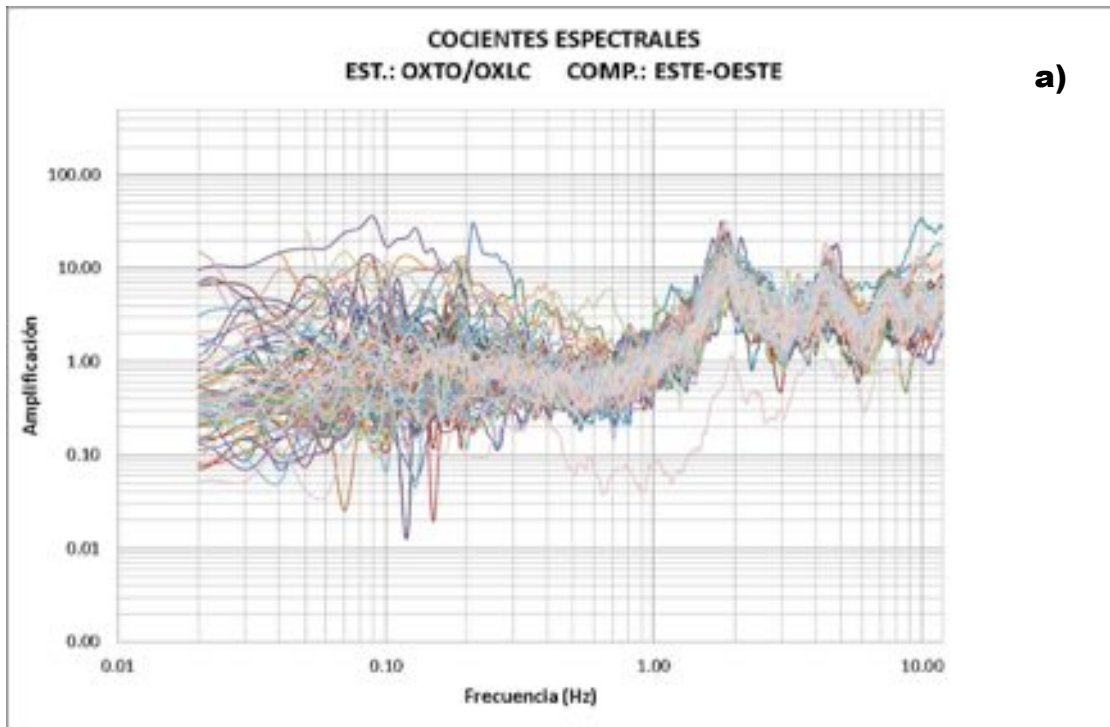


Figura 13. Cocientes espectrales de Fourier estación OXPM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



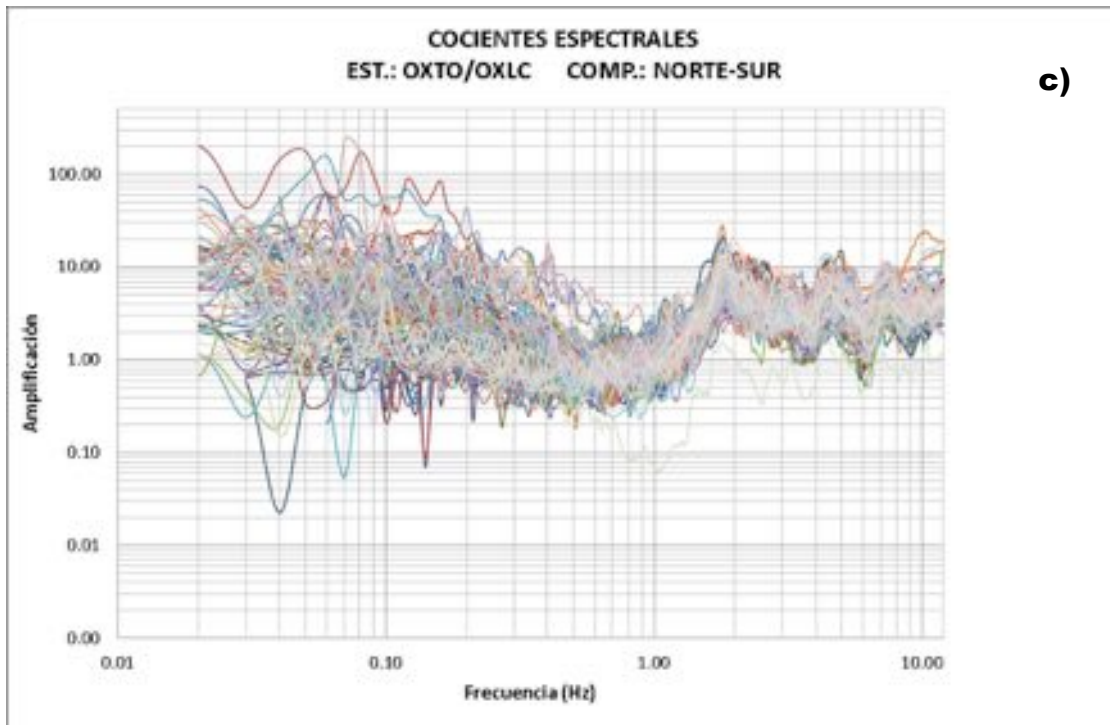
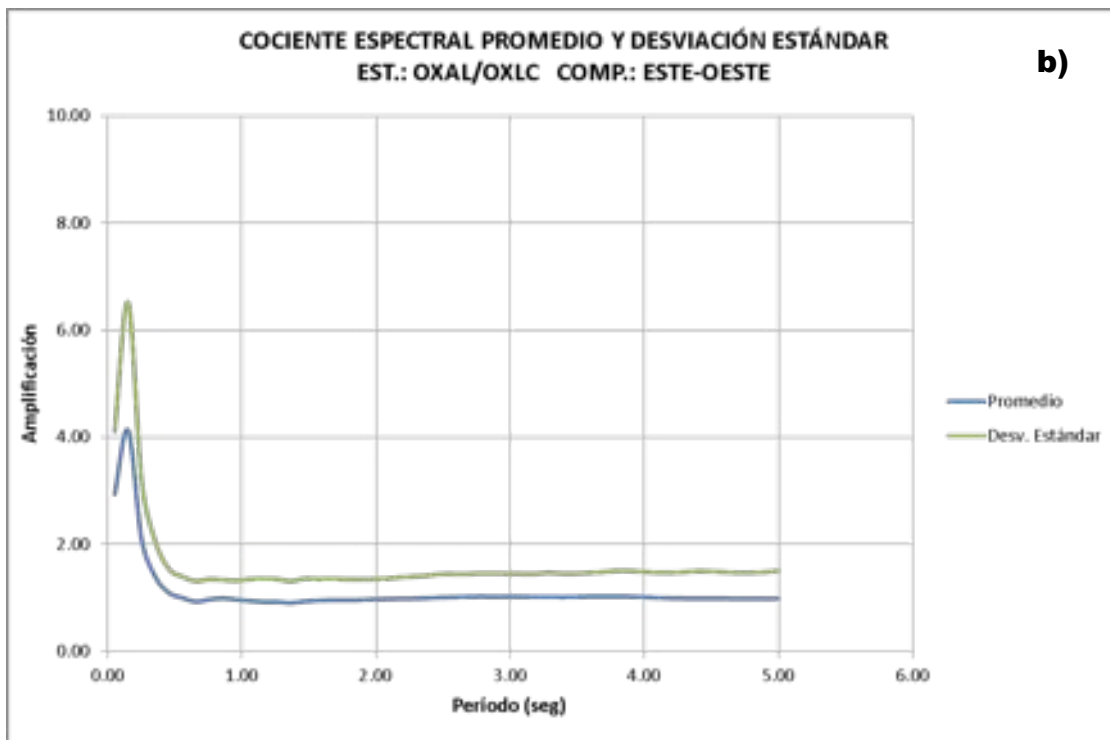
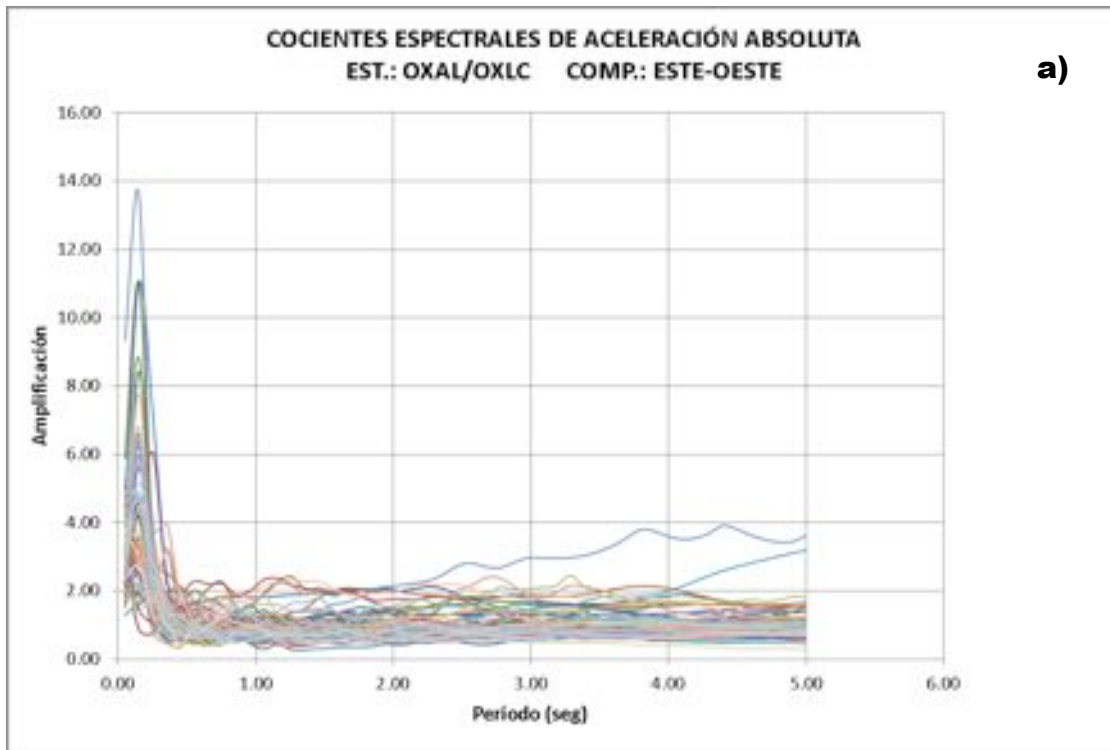


Figura 14. Cocientes espectrales de Fourier estación OXTO/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).

Tabla 4. Datos de frecuencias y amplificaciones máximas promedio obtenidas de los cocientes espectrales de Fourier.

| EST. REF. | EST. SUELO | COMP. | AMPLIFICACIÓN (FRECUENCIA PREDOMINANTE) | FRECUENCIA PREDOMINANTE | DESVIACIÓN ESTANDAR (AMPLIFICACIÓN) |
|-----------|------------|-------|---|-------------------------|-------------------------------------|
| OXLC | OXTO | EW | 10.28 (2.40*) | 1.84 (6.42*) | 4.83 (3.37*) |
| | | NS | 8.63 (2.34*) | 1.81 (6.29*) | 4.23 (3.43*) |
| | OXPM | EW | 3.77 (4.27*) | 10.00 (7.02*) | 1.24 (2.94*) |
| | | NS | 4.84 (4.69*) | 5.02 (6.97*) | 1.82 (3.01*) |
| | OXCU | EW | 1.53 (3.96*) | 0.09 (6.78*) | 2.57 (3.36*) |
| | | NS | 5.02 (2.54*) | 0.06 (6.83*) | 13.19 (3.39*) |
| | OXBJ | EW | 1.15 (1.03*) | 0.06 (6.75*) | 1.89 (3.37*) |
| | | NS | 3.56 (1.37*) | 0.09 (6.51*) | 16.25 (3.25*) |
| | OXAL | EW | 5.42 (4.93*) | 6.75 (7.46*) | 2.56 (2.72*) |
| | | NS | 5.67 (5.14*) | 8.04 (7.64*) | 2.50 (2.73*) |
| | OAXM | EW | 7.29 (4.01*) | 4.25 (6.84*) | 3.71 (3.01*) |
| | | NS | 8.47 (5.93*) | 4.87 (6.93*) | 3.73 (2.89*) |

* Datos en paréntesis obtenidos por medio de promedio pesado (ecuación 9.1) considerando las amplitudes, así como la desviación estándar (ecuación 9.2) de dicha frecuencia.



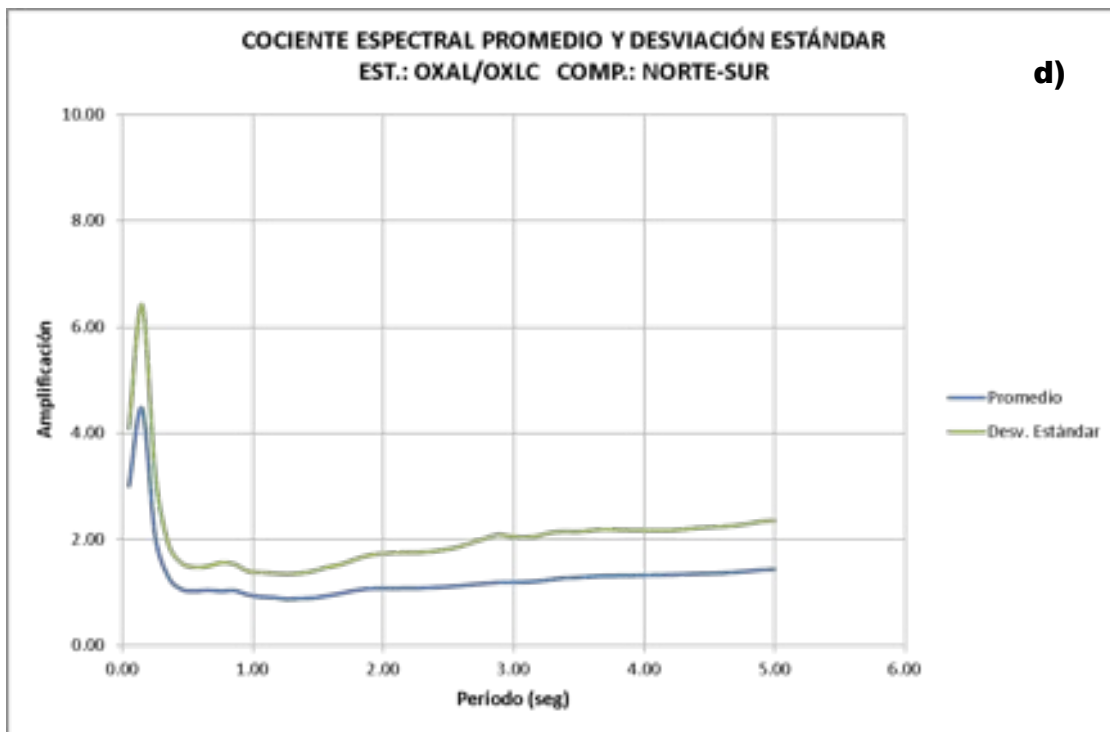
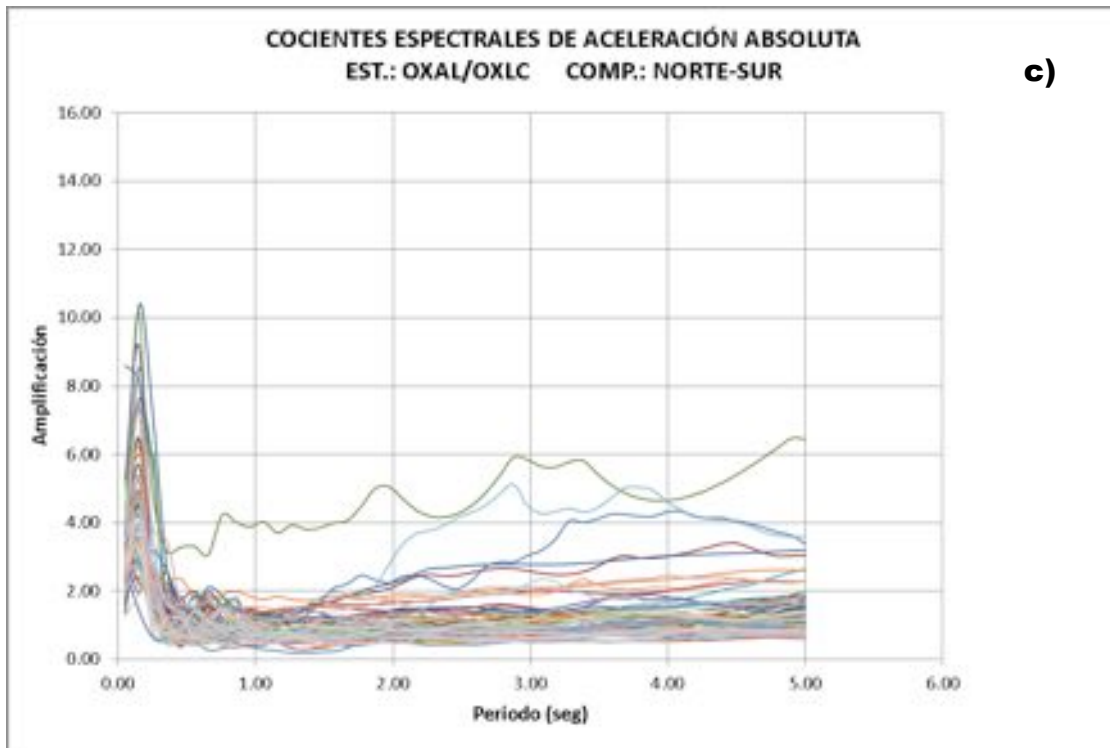
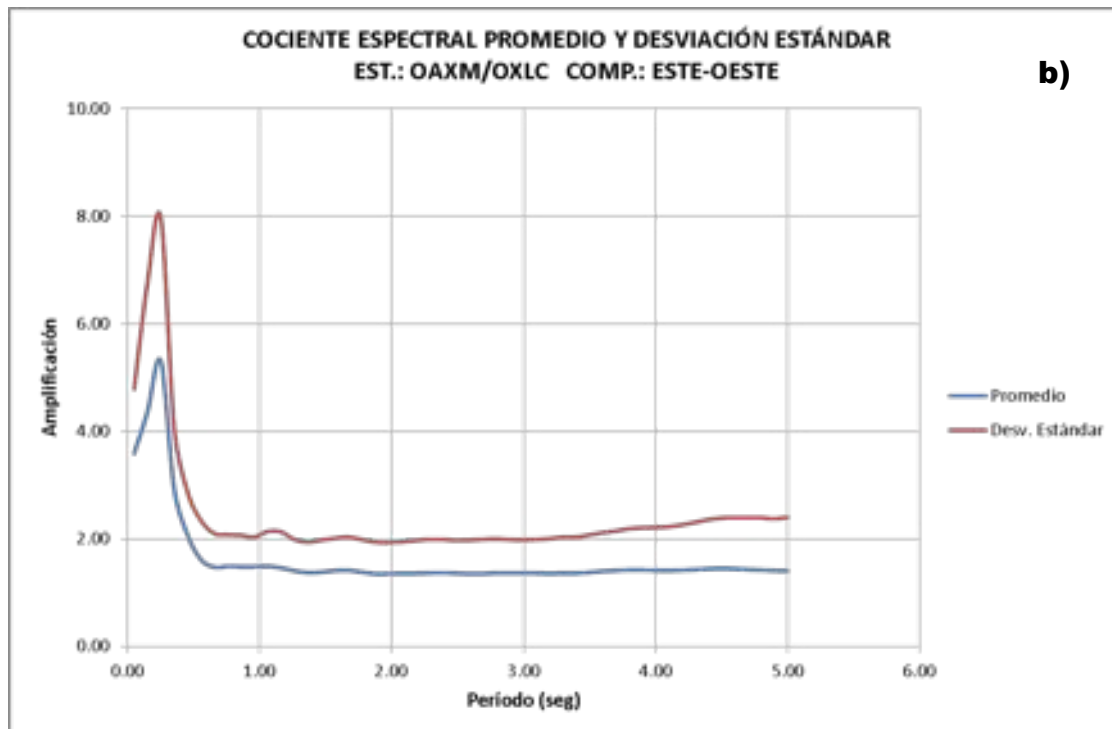
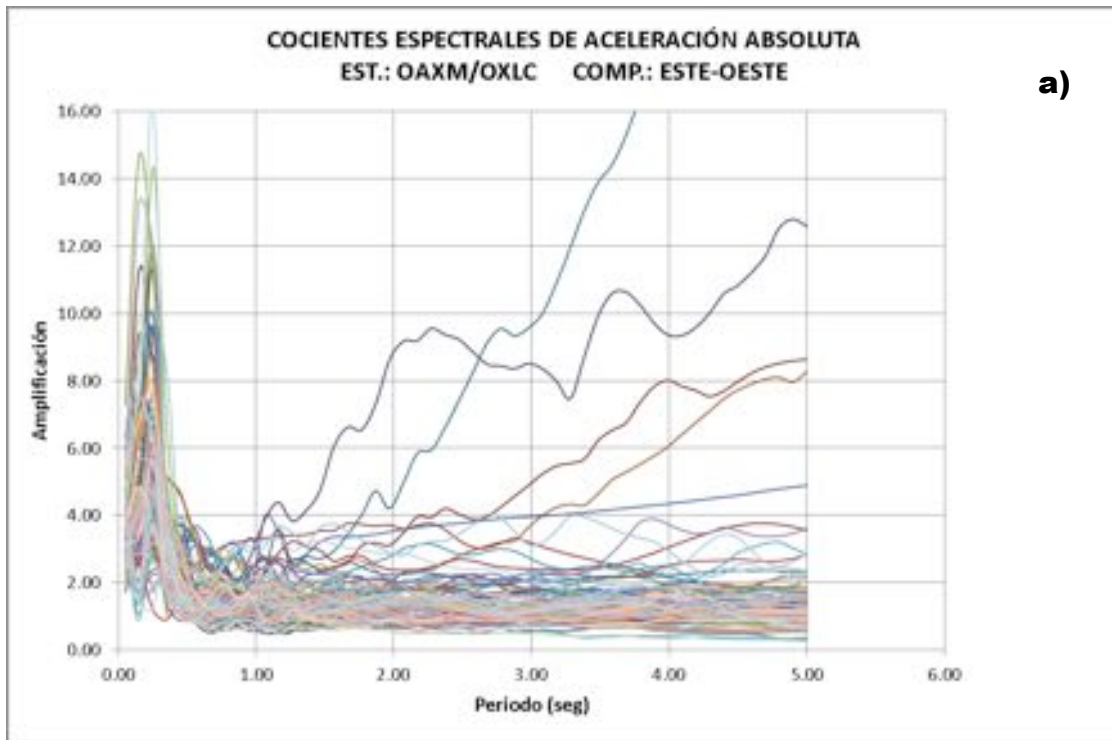


Figura 15. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXAL/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



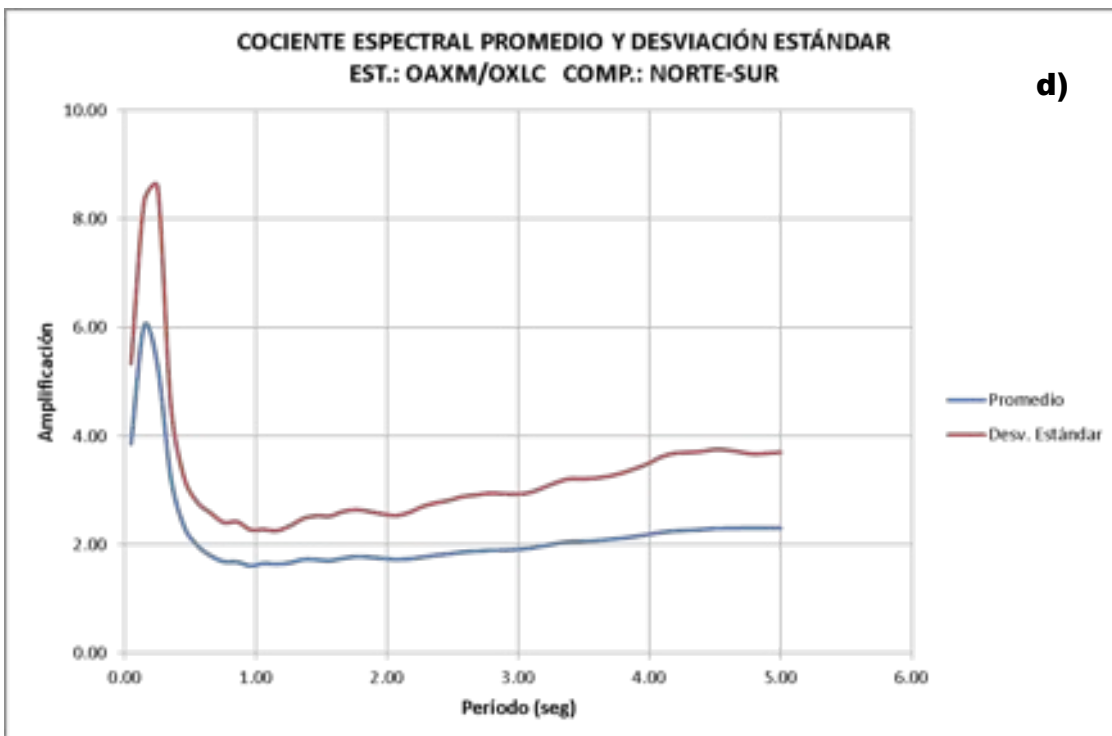
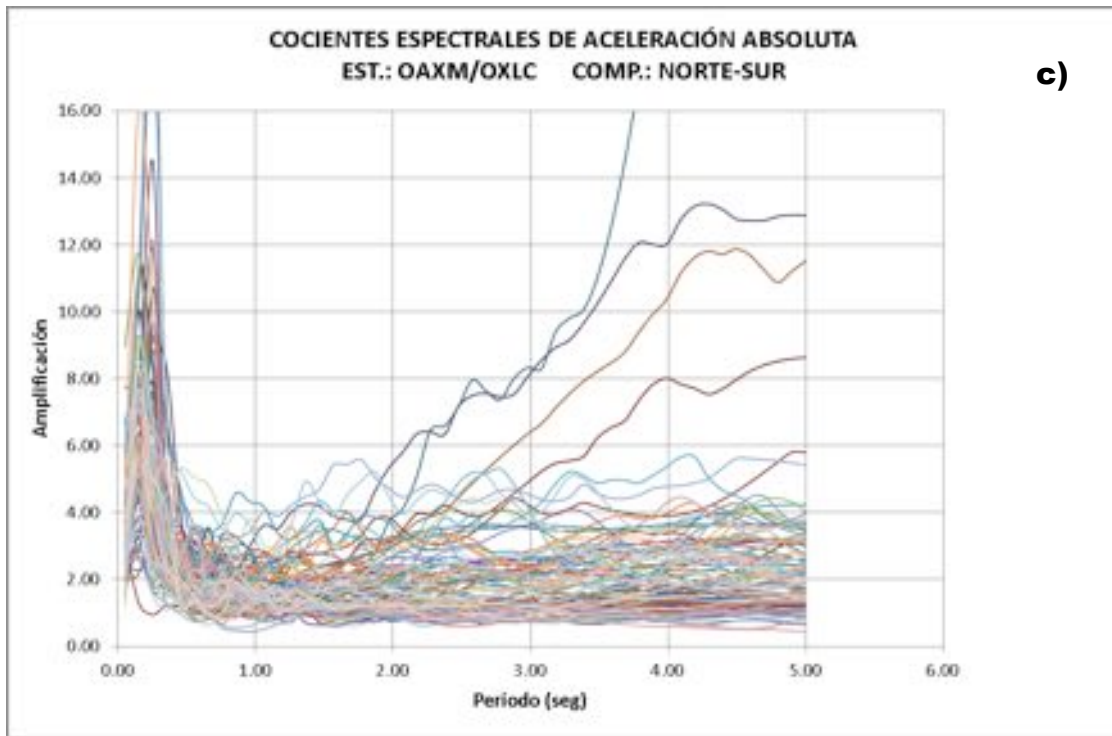
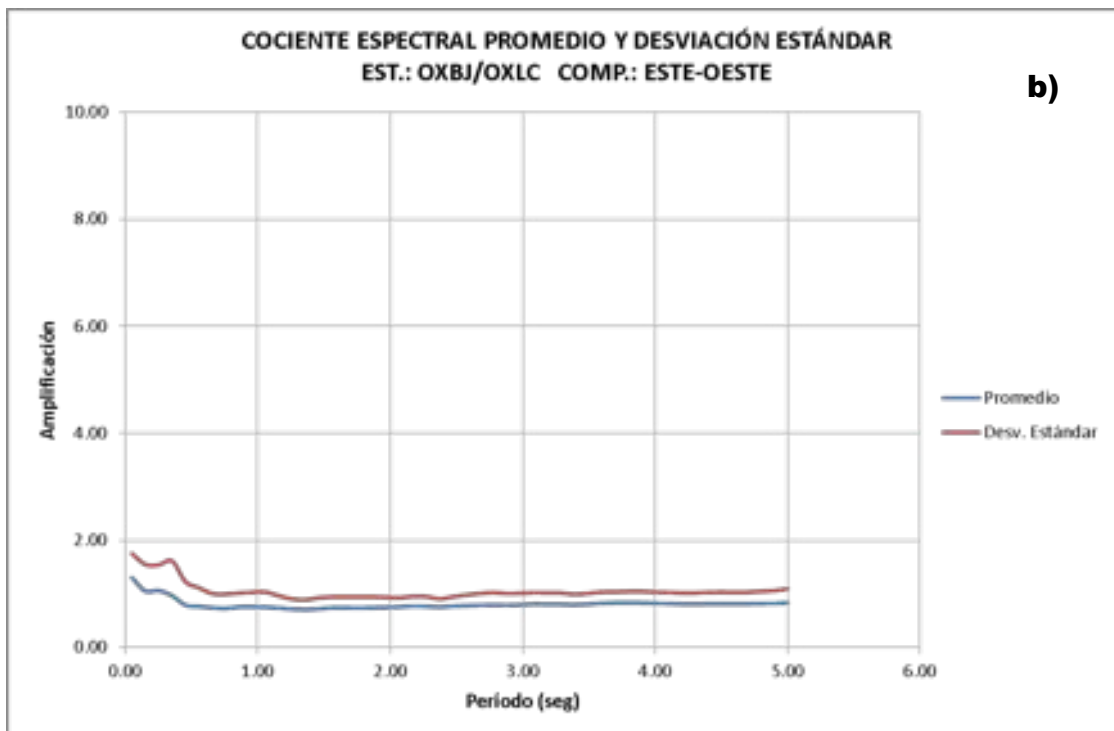
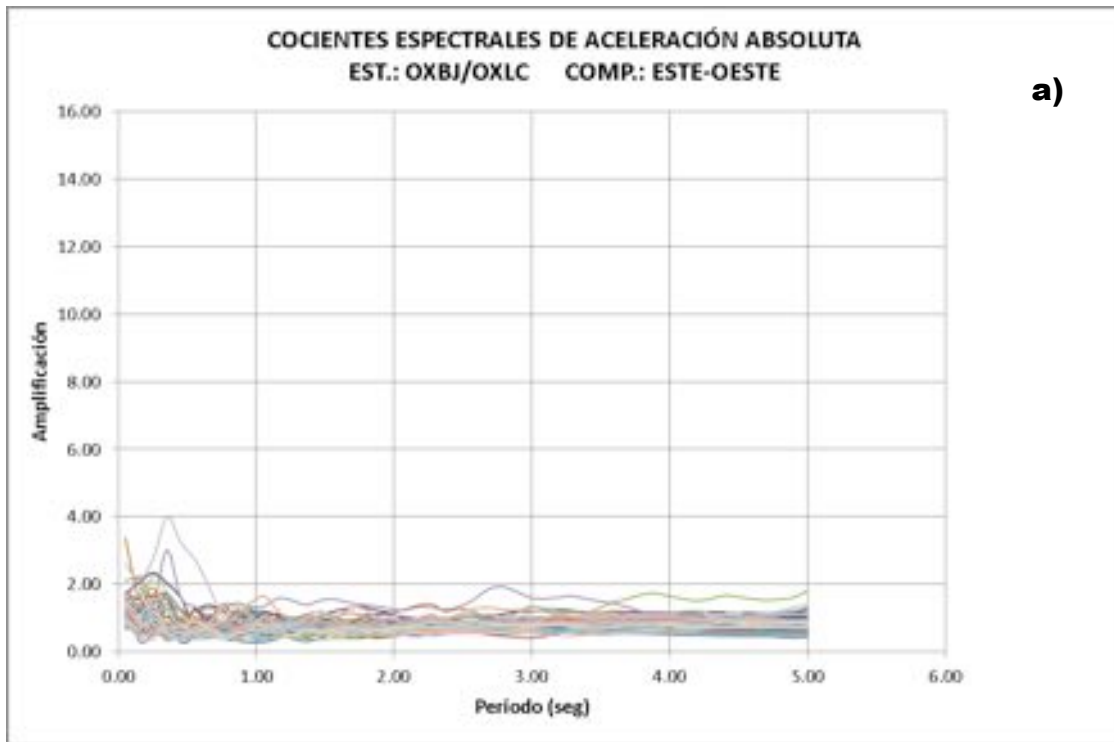


Figura 16. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OAXM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



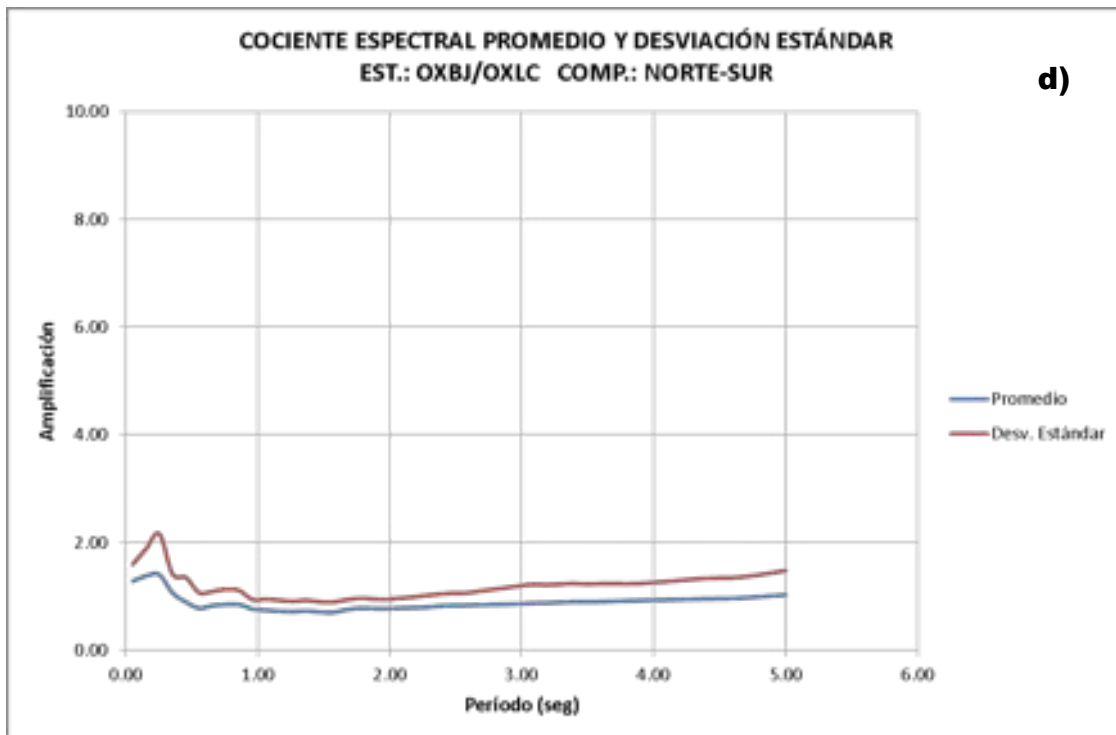
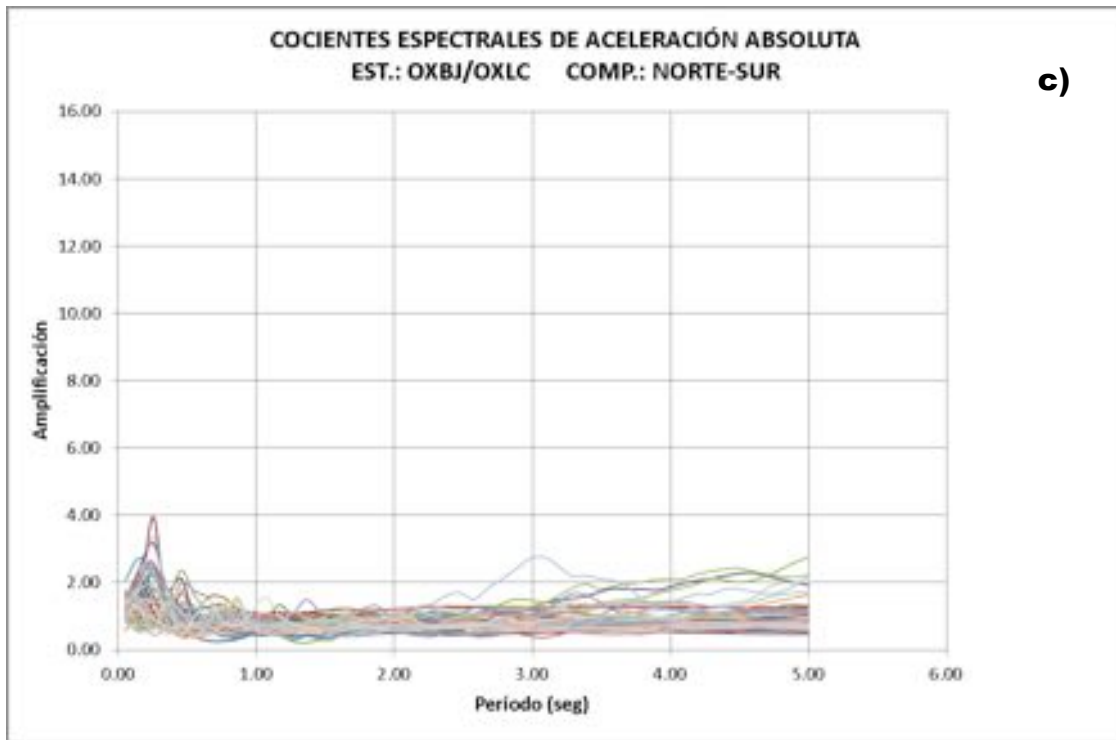
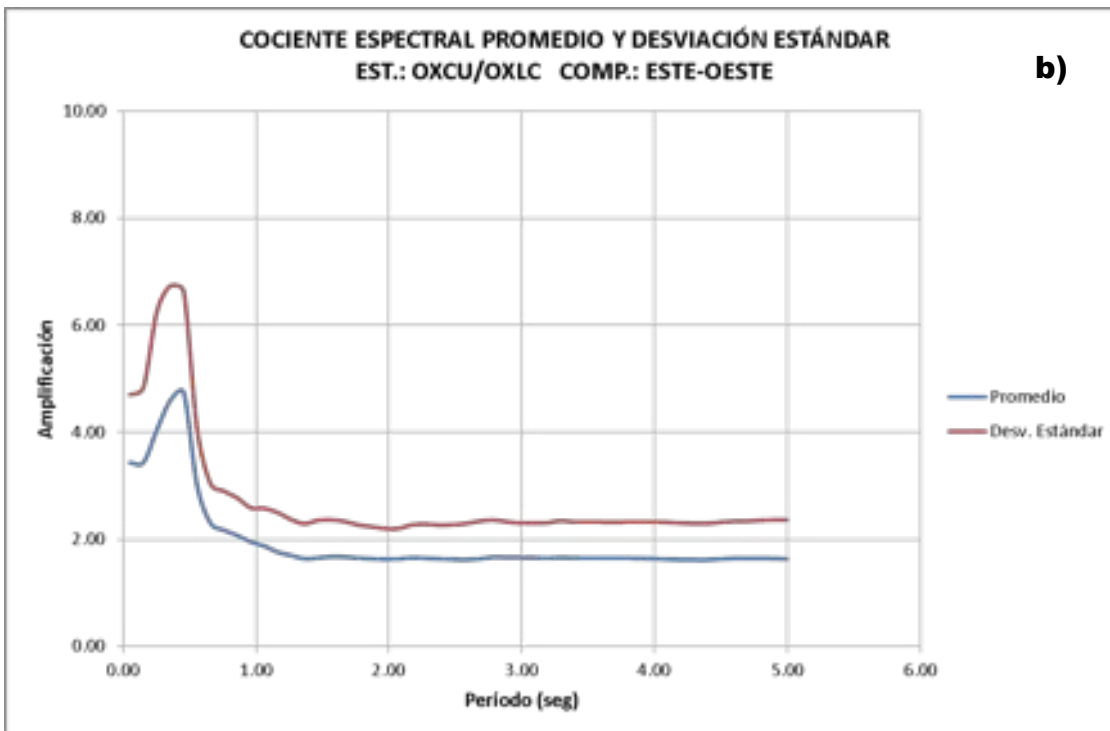
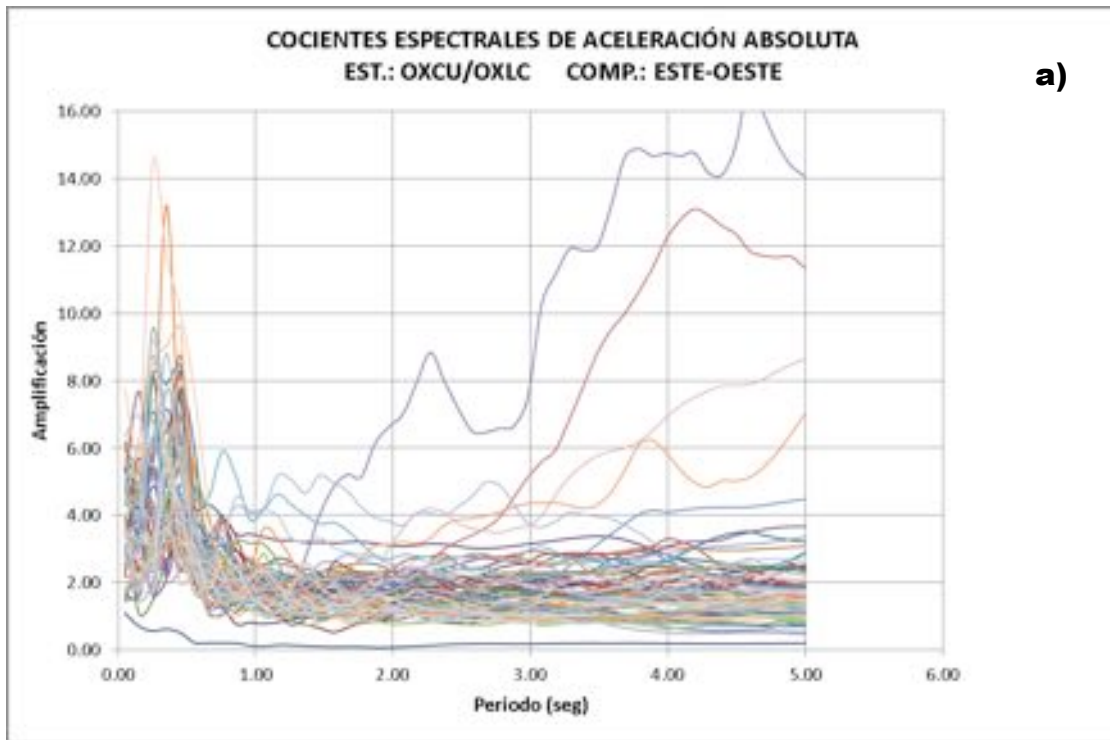


Figura 17. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXBJ/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



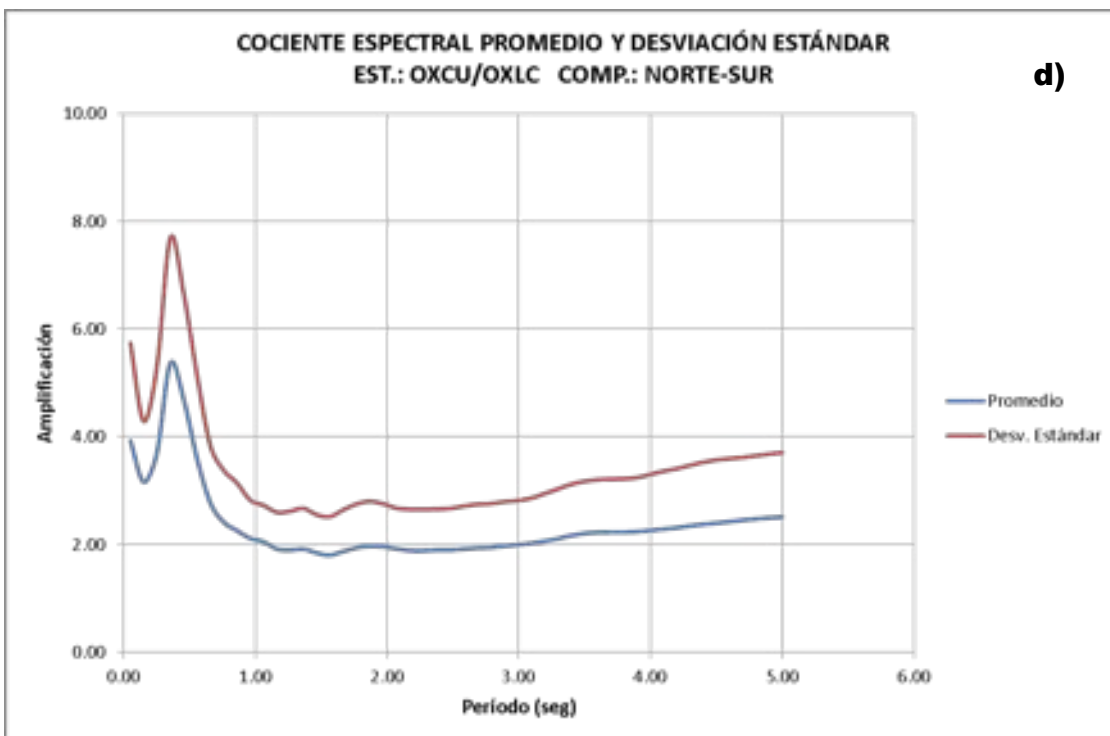
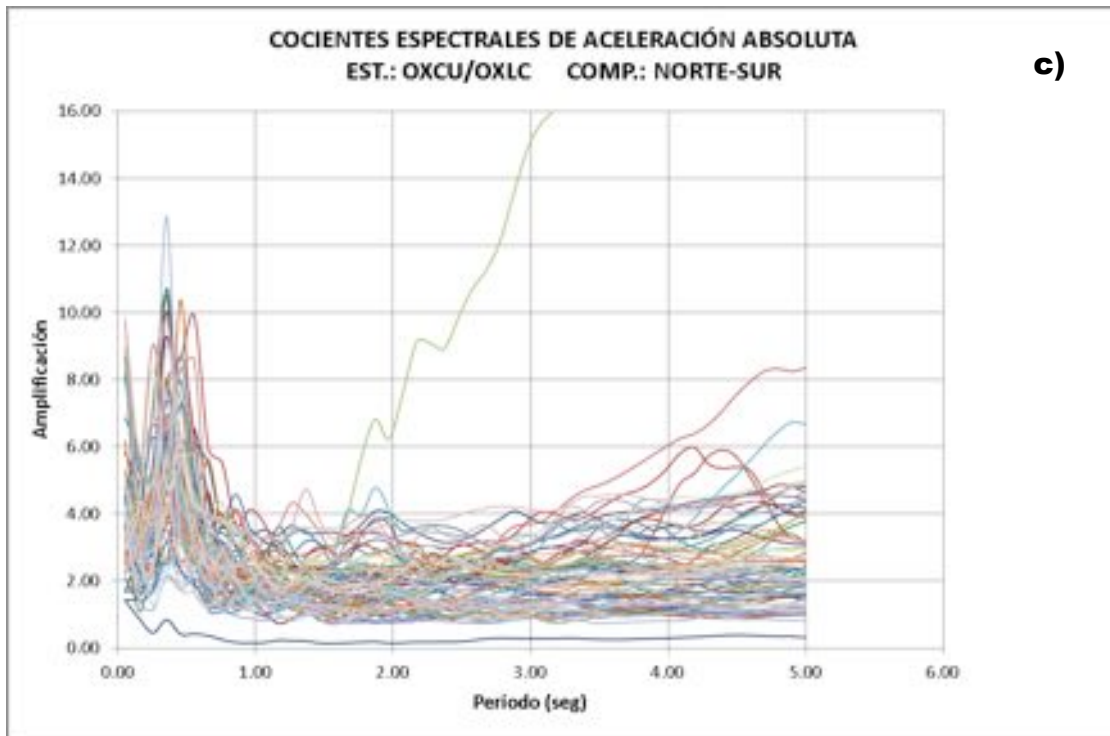
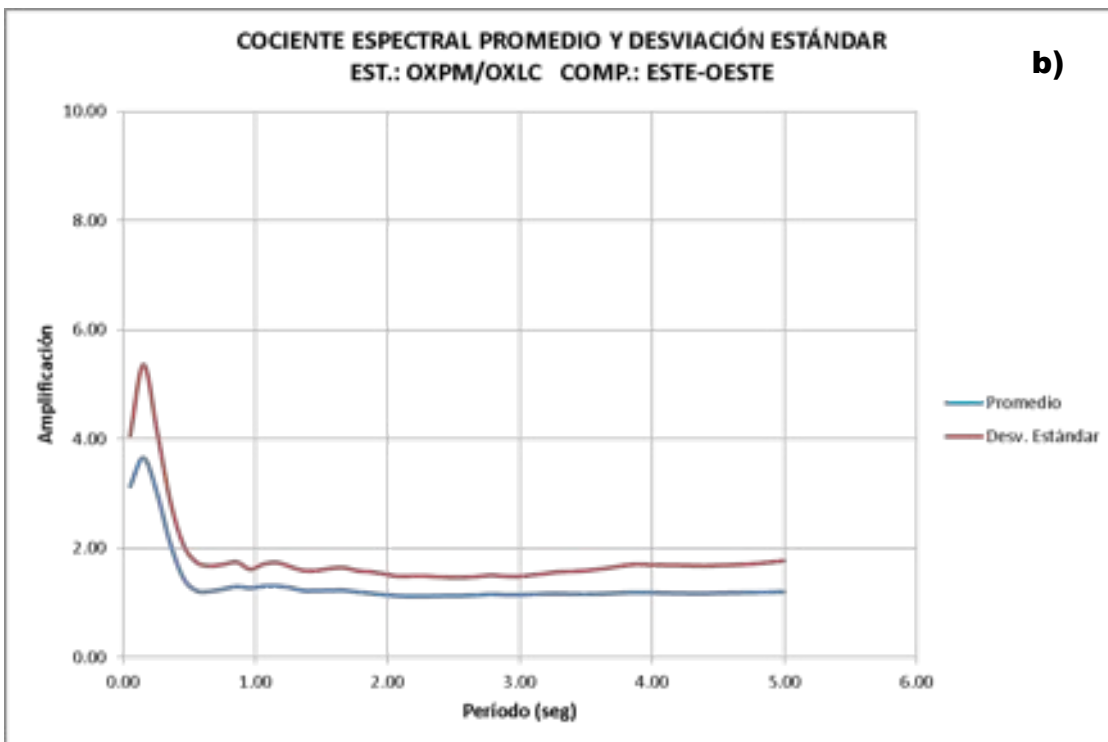
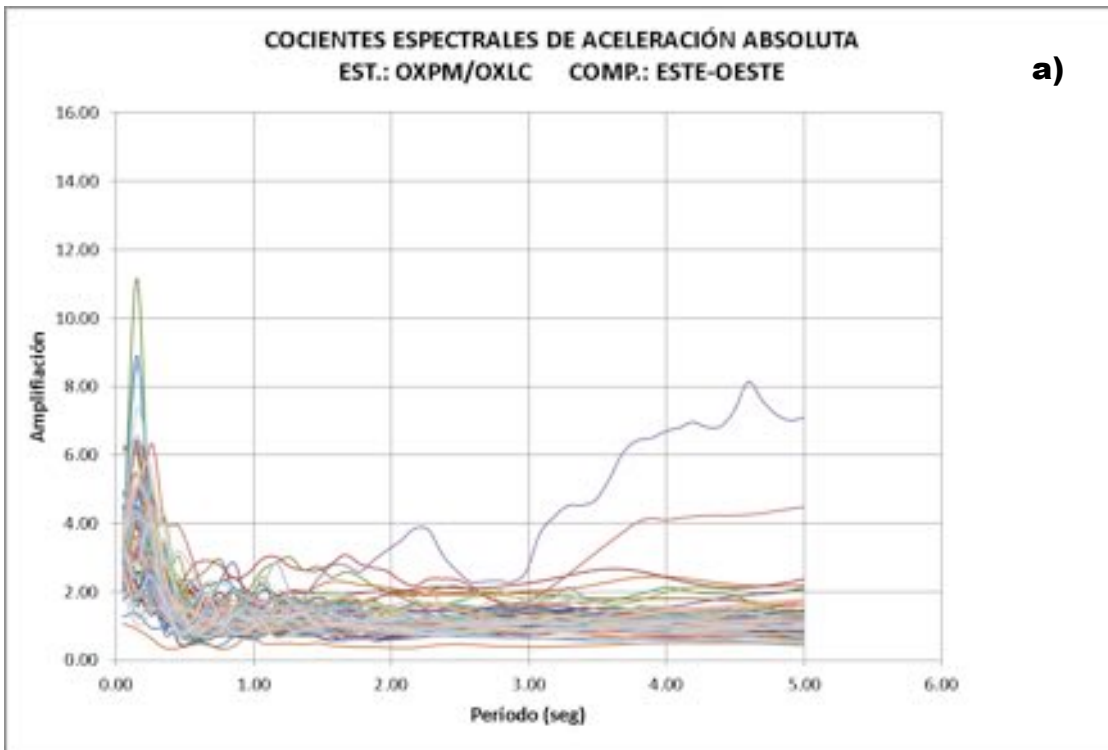


Figura 18. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXCU/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estándar correspondientes (b y d).



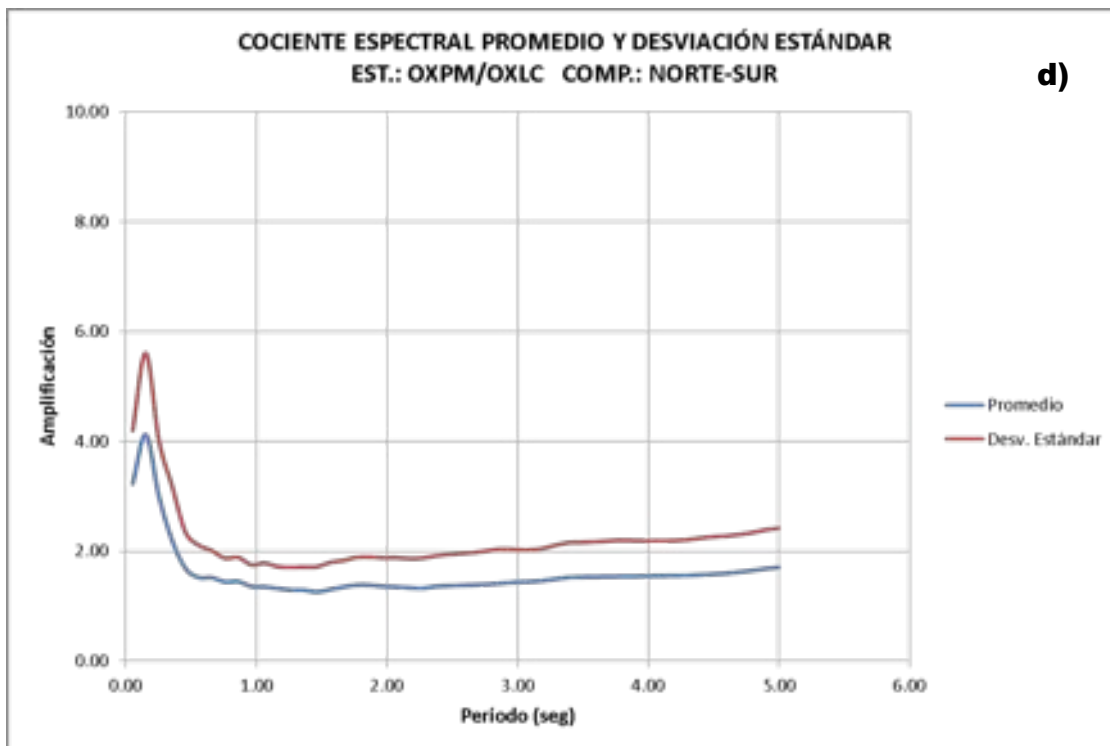
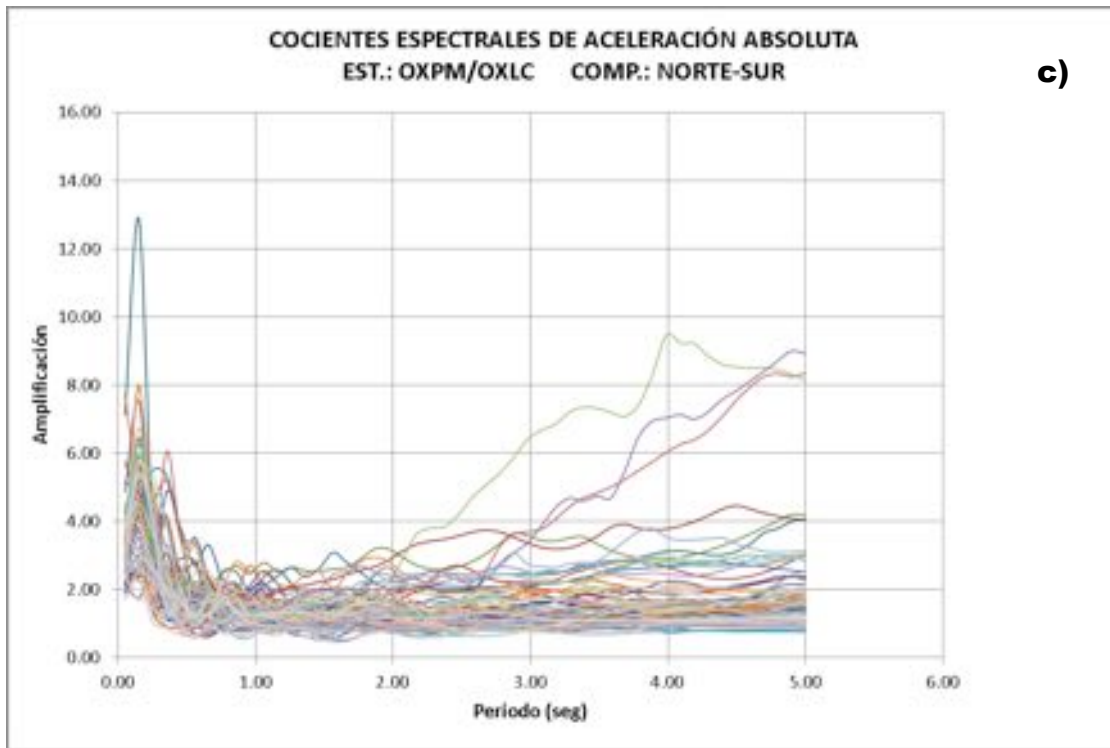
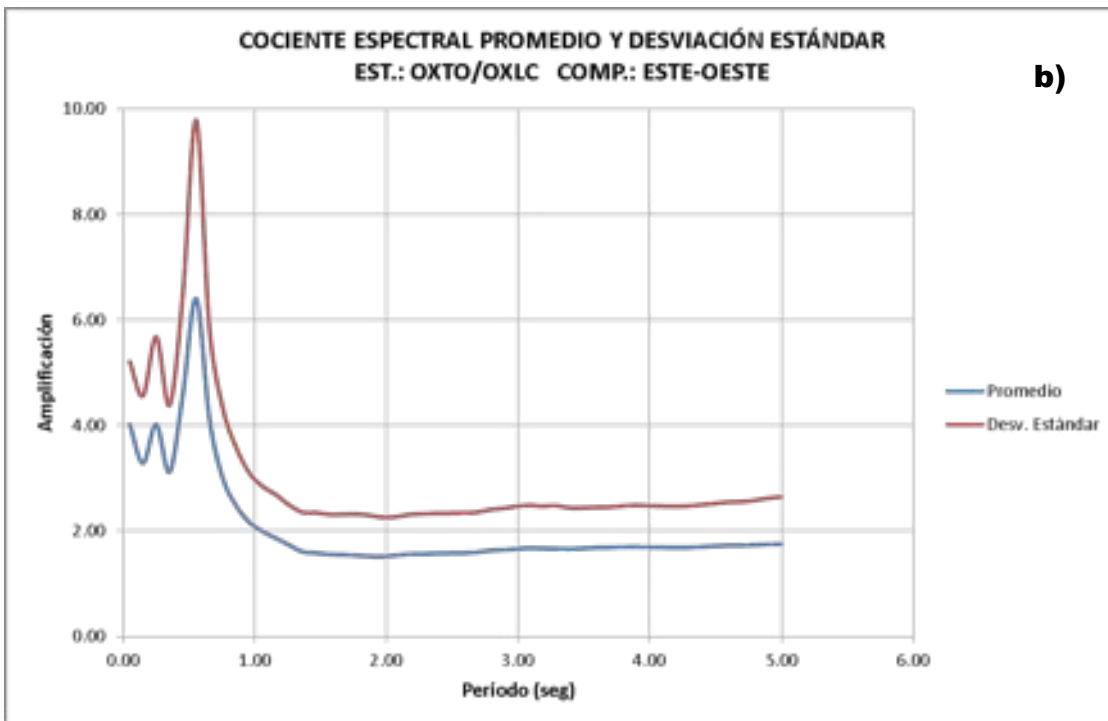
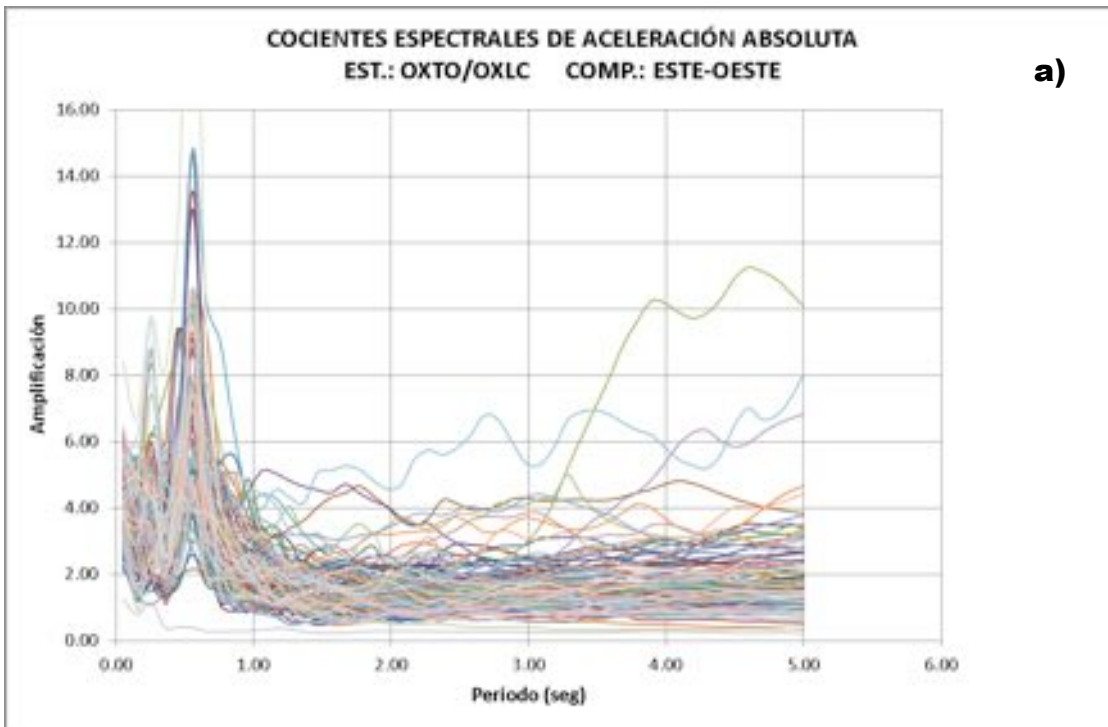


Figura 19. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXPM/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).



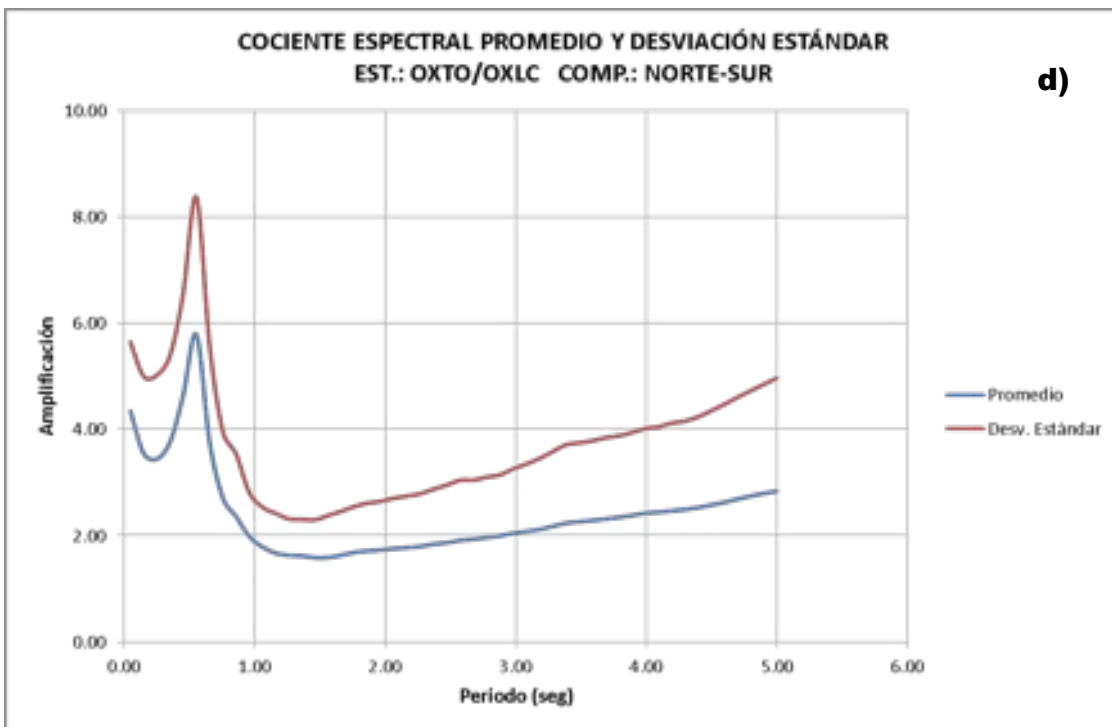
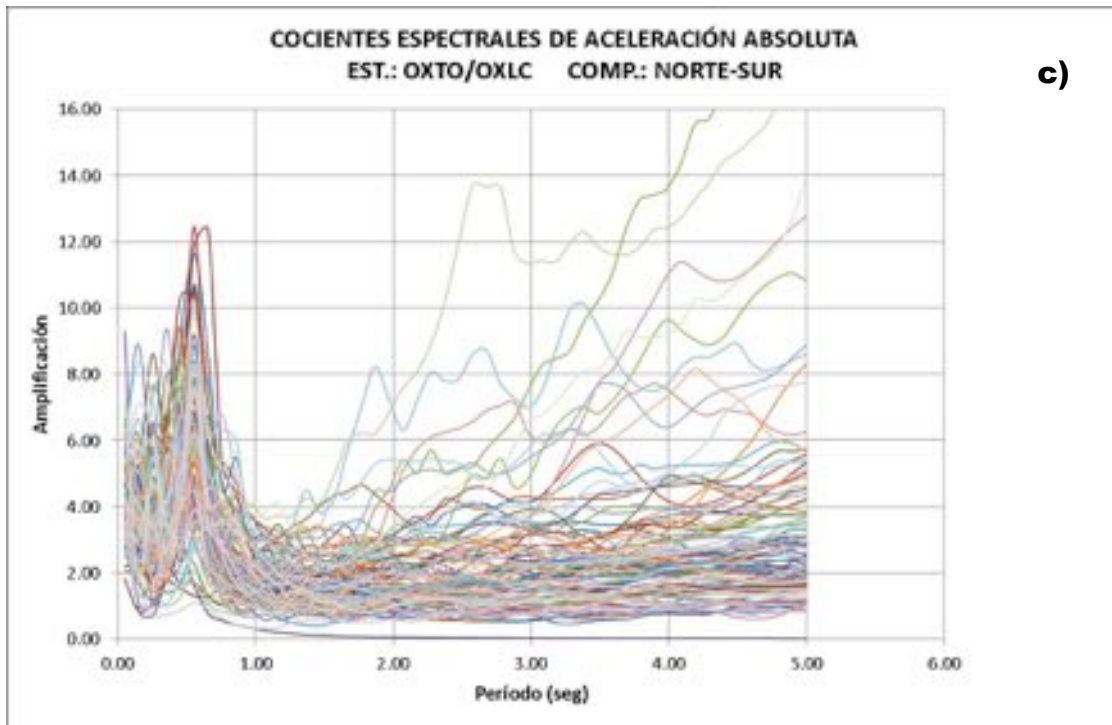


Figura 20. Cocientes de respuesta de aceleración absoluta estación OXTO/OXLC de los eventos correspondientes a la tabla 8.b de la componente este-oeste (a) y norte-sur (c), así como sus promedios y desviaciones estandar correspondientes (b y d).

Tabla 5. Datos de amplificación y período promedio obtenidos de los cocientes de respuesta de aceleraciones absolutas.

| EST. REF. | EST. SUELO | COMP. | AMPLIFICACIÓN (PERÍODO PREDOMINANTE) | PERÍODO PREDOMINANTE | DESVIACIÓN ESTANDAR (AMPLIFICACIÓN) |
|-----------|------------|-------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| OXLC | OXTO | EW | 6.40 | 0.56 | 3.38 |
| | | NS | 5.58 | 0.56 | 2.56 |
| | OXPM | EW | 3.66 | 0.15 | 1.71 |
| | | NS | 4.12 | 0.15 | 1.49 |
| | OXCU | EW | 4.74 | 0.45 | 1.89 |
| | | NS | 5.41 | 0.35 | 2.28 |
| | OXBJ | EW | 1.06 | 0.25 | 0.48 |
| | | NS | 1.40 | 0.25 | 0.76 |
| | OXAL | EW | 4.13 | 0.15 | 2.38 |
| | | NS | 4.47 | 0.15 | 1.95 |
| | OAXM | EW | 5.31 | 0.25 | 2.66 |
| | | NS | 6.03 | 0.15 | 2.30 |

III.3 Procesado de datos Geofísicos para la obtención de las profundidades de suelos

Los SEV's fueron realizados con anterioridad a este trabajo (Belmonte, 2011), utilizando el arreglo electródico tipo Schlumberger, y un resistivímetro de corriente directa.

Los SEV's se realizaron para fines de estudio de aguas subterráneas. Parte de las profundidades fueron obtenidas a partir de los sondeos ya procesados (Belmonte, 2011) y sólo algunos de ellos fueron interpretados por medio del modelado directo y el uso de la teoría de inversión de datos (Scales *et al.*, 2001) en el programa IPWIN, con el propósito de determinar las profundidades aproximadas del aluvión para los SEV's aún no procesados.

Con las profundidades obtenidas de los sondeos, se determinó el mapa de isopacas en la zona compuesta por suelos aluviales figuras 27 y 29, cuya utilidad será descrita en el capítulo posterior.

Los detalles de los sondeos se presentan en el apéndice B y en la figura 21. La localización de las estaciones acelerométricas en el mapa geológico se encuentra en la figura 22.

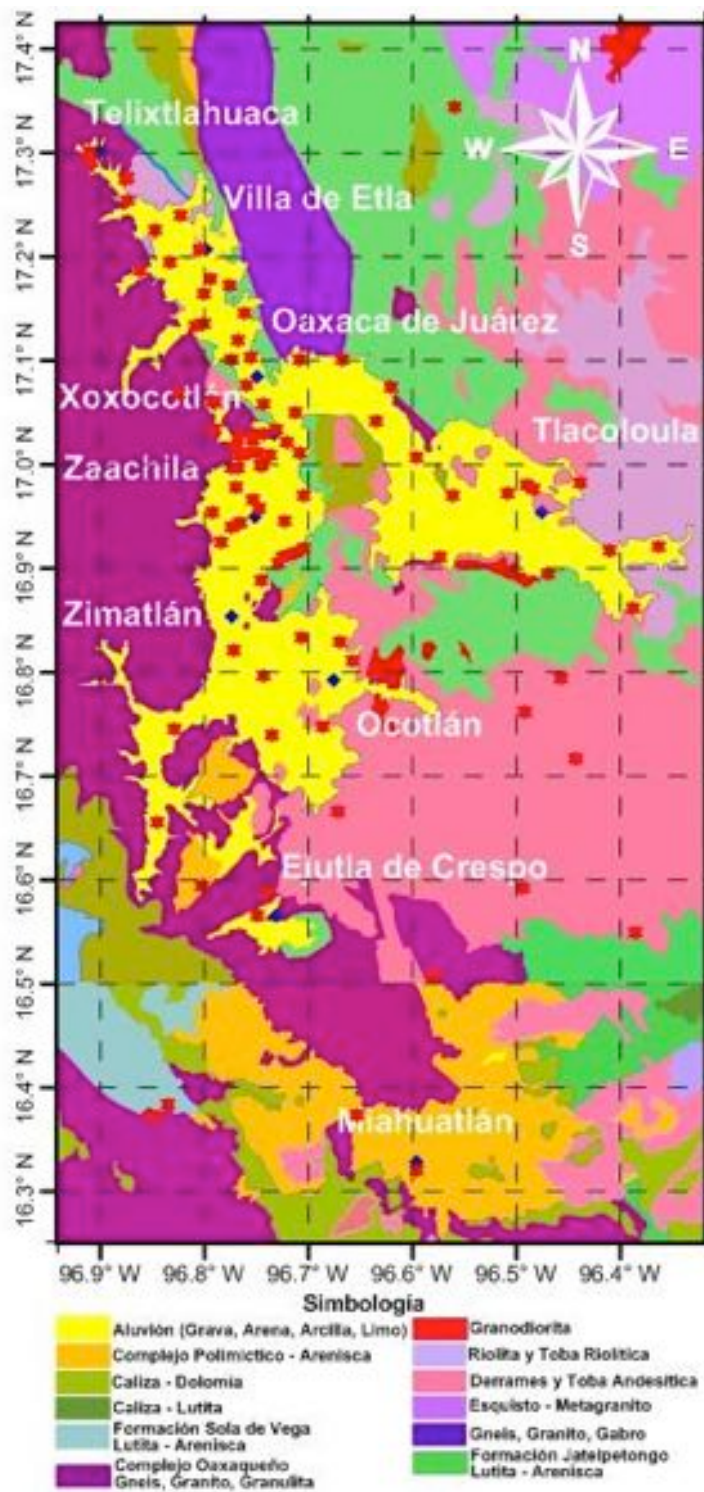


Figura 21. Localización de los SEV's en el mapa geológico.

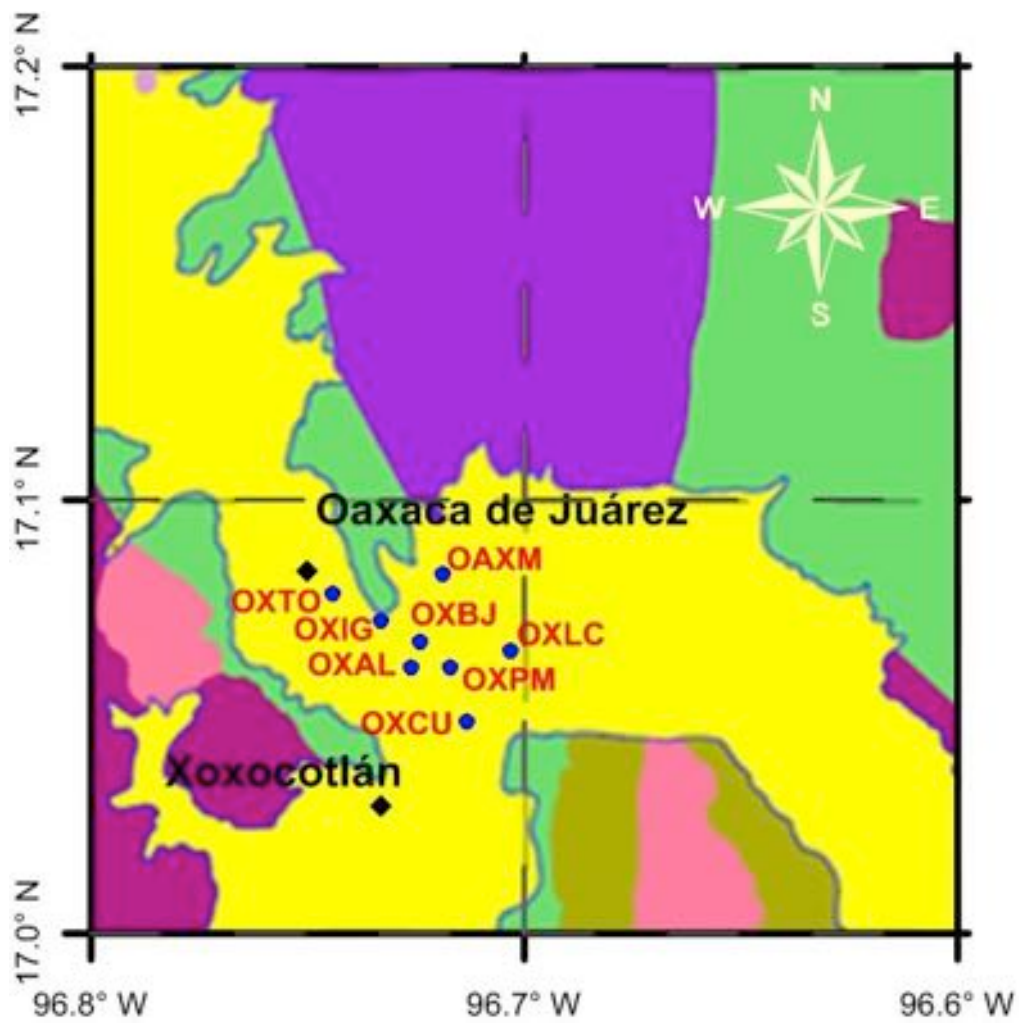


Figura 22. Localización de las estaciones acelerométricas en la Ciudad de Oaxaca.

III.4 Análisis digital de imágenes Landsat y GDEM para el estudio de la geología y características topográficas

Datos ASTER de 30 m de resolución (figura 23), fueron tratados digitalmente con apoyo del software Idrisi, para obtener el mapa de pendientes predominantes (figura 24). Las pendientes son consideradas como un factor determinante en la respuesta sísmica (Bouckovalas y Papadimitriou, 2005; Gaudio y Wasowski, 2007; Nguyen y Gatmiri, 2007; Stamatopoulos *et al.*, 2007; Wald y Allen, 2007; Shafique *et al.*, 2011).

Para limitar las zonas de pendientes bajas, fueron consideradas tanto la pendiente como la geología siendo consistentes ambas por estar relacionadas entre sí, con la presencia de menores pendientes el espesor de los depósitos aluviales es mayor y en estas zonas es donde se presentan efectos de sitio importantes y son las áreas de mayor interés en este trabajo. A partir de la determinación de estas zonas se han estimado las amplificaciones y períodos predominantes esperados, lo cuál se detalla más adelante.

Con las pendientes calculadas por medio de los datos de elevaciones del GDEM, se presentan las figuras 25 y 26 donde se muestran rangos de 0-6° y mayores a 15°, donde es posible observar la delimitación de las zonas de bajas pendientes constituidas principalmente por una combinación de arcillas, arenas, gravas y limos definidas como aluvión. Para pendientes mayores a 6° los espesores de aluvión son cada vez menores o nulos y comienza a observarse la presencia de rocas de distinta naturaleza y composición tal cual puede verificarse a detalle en la figura 5 y en las imágenes satelitales (figuras 27 y 29).

Imágenes Landsat de 30 m de resolución con 7 bandas en distintas longitudes de onda fueron utilizadas para este estudio con el fin de identificar la geología existente en conjunto la figura 5.

Por medio del tratamiento digital de las imágenes, se realizaron combinaciones entre bandas asignando los colores rojo (R), verde (G) y azul (B) respectivamente, para determinar aquellas que mejor definen la geología del lugar, en este trabajo se presentan las combinaciones 321 RGB y 742 RGB en verdadero y falso color respectivamente. La combinación 742 ha sido utilizada en investigaciones previas ya que es la que muestra mayor información litológica por los contrastes en la respuesta espectral asociada con cambios en la reflectividad que presenta

Noyola *et al.* (2005). De acuerdo con esto, es posible discriminar la litología del área de estudio y así identificar con mayor facilidad las zonas compuestas por aluvión.

Las rocas se exponen en esta combinación en colores rosas a cobrizos. Los colores verdes brillantes destacan vegetación. La combinaciones 742 y 321, identifican la zona plana en colores lilas para las zonas de suelo urbanizadas y rosas pálidos para suelos desnudos en la 742 así como tonos grises y cobrizos para la 321.

Estas dos combinaciones son suficientes para el propósito de este estudio y en conjunto con el mapa de pendientes y el mapa geológico se ha podido destacar la zona de pendientes suaves constituidas principalmente por aluvión.

Las figuras 24 y 26 muestran las combinaciones 742 y 321 RGB respectivamente las curvas de profundidades del aluvión que pueden encontrarse en la zona de estudio, el acercamiento muestra las estaciones acelerométricas y aquí si es posible identificar que las estaciones OXBJ, OXIG y OXLC están localizadas sobre roca y pueden ser identificadas por el color rosa en la combinación 742 y plateado en la 321.

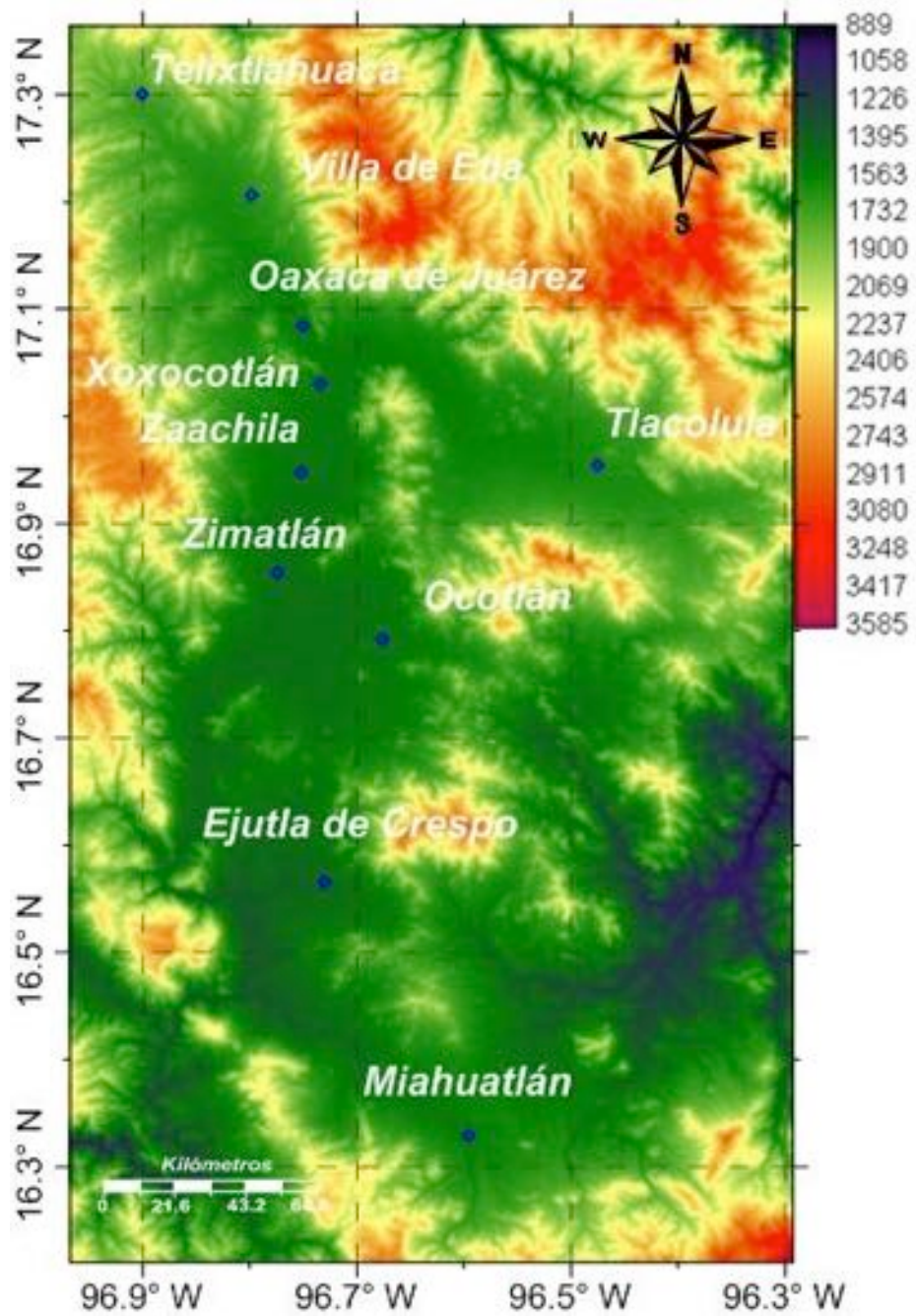


Figura 23. Modelo Digital de Elevación (GDEM) de la zona de estudio indicando algunas poblaciones principales. Elevaciones en metros.

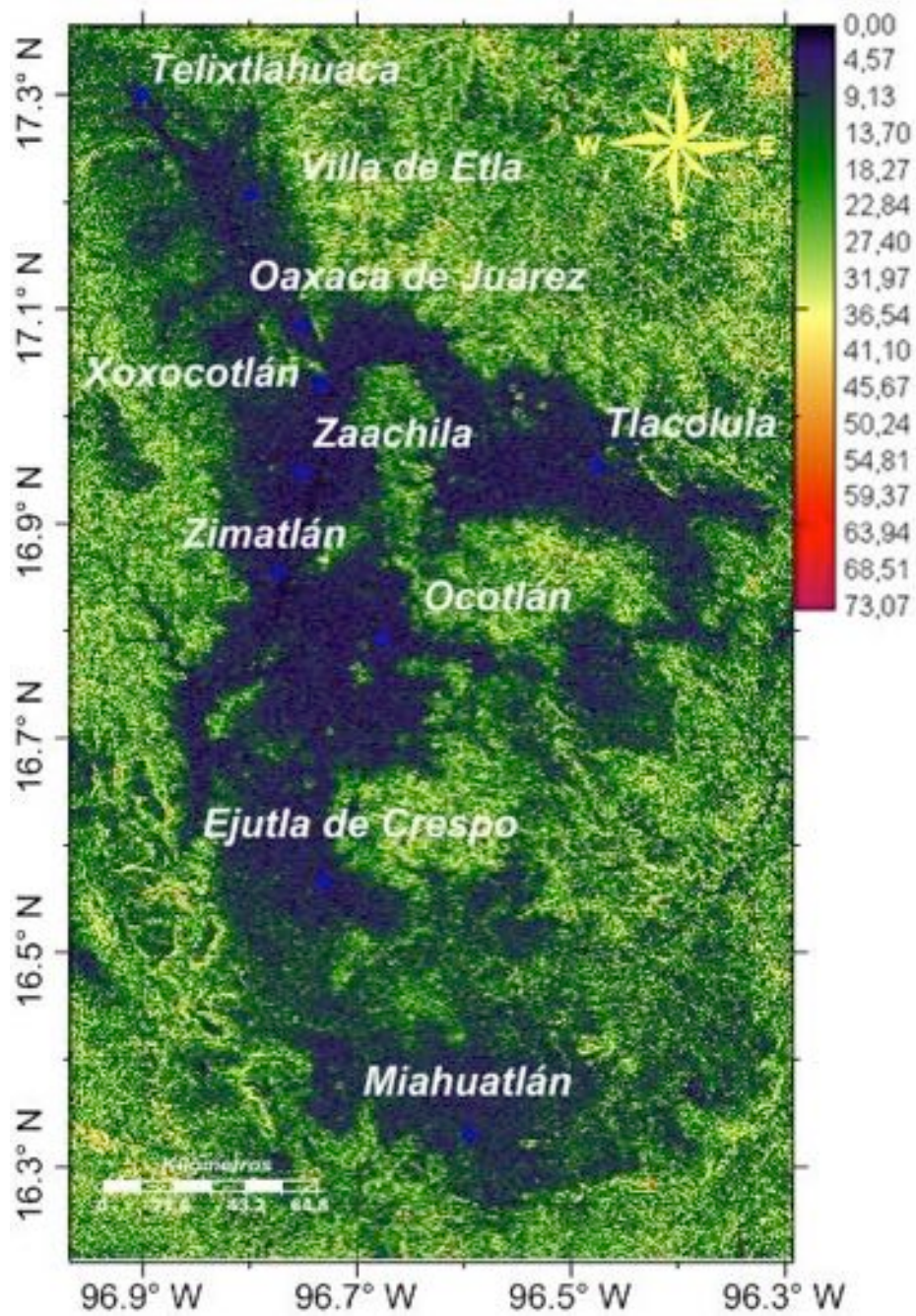


Figura 24. Mapa de pendientes obtenidas del GDEM en la zona de estudio indicando algunas poblaciones principales. Pendientes en grados.

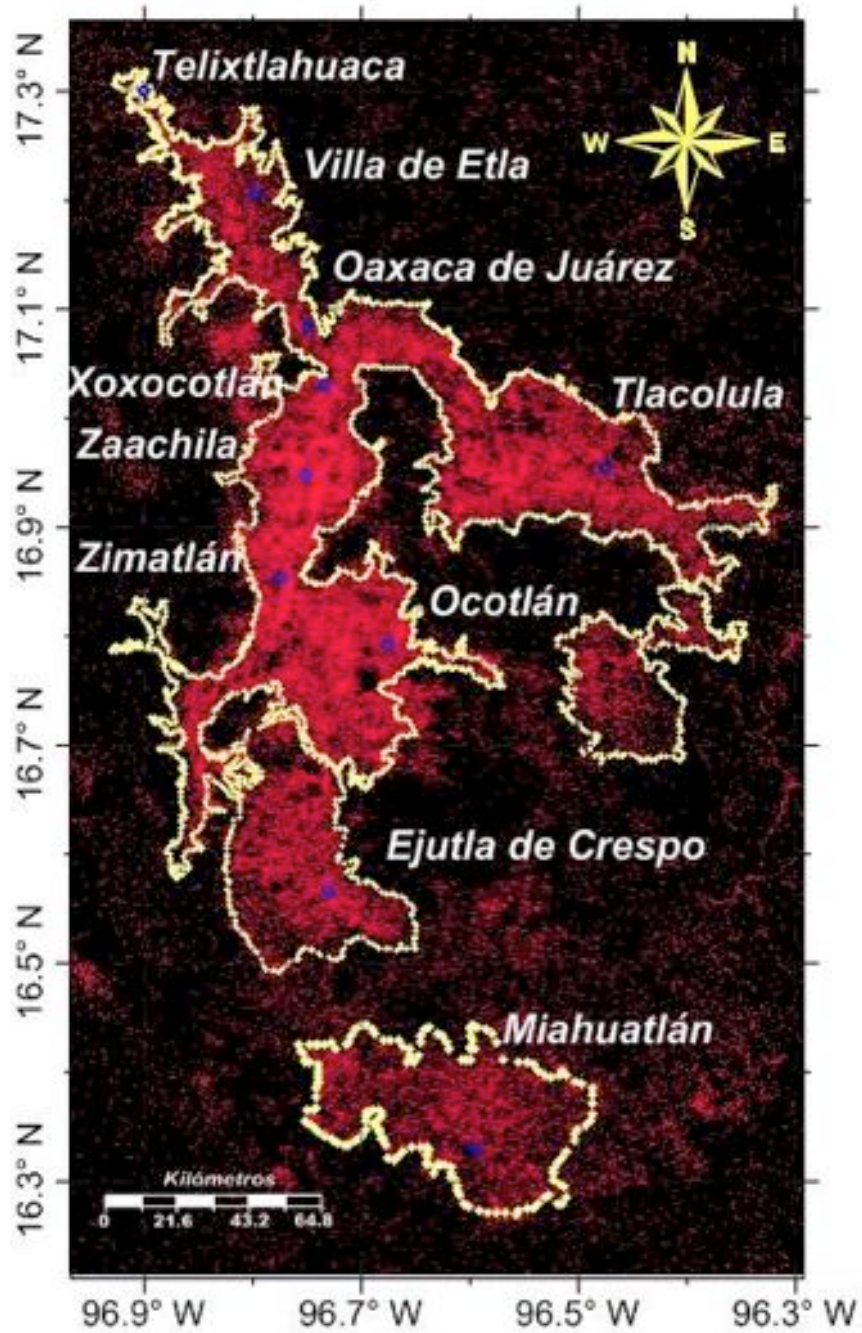


Figura 25. Mapa de clasificación de pendientes de 0 a 6° para delimitar las zonas de bajas pendientes.

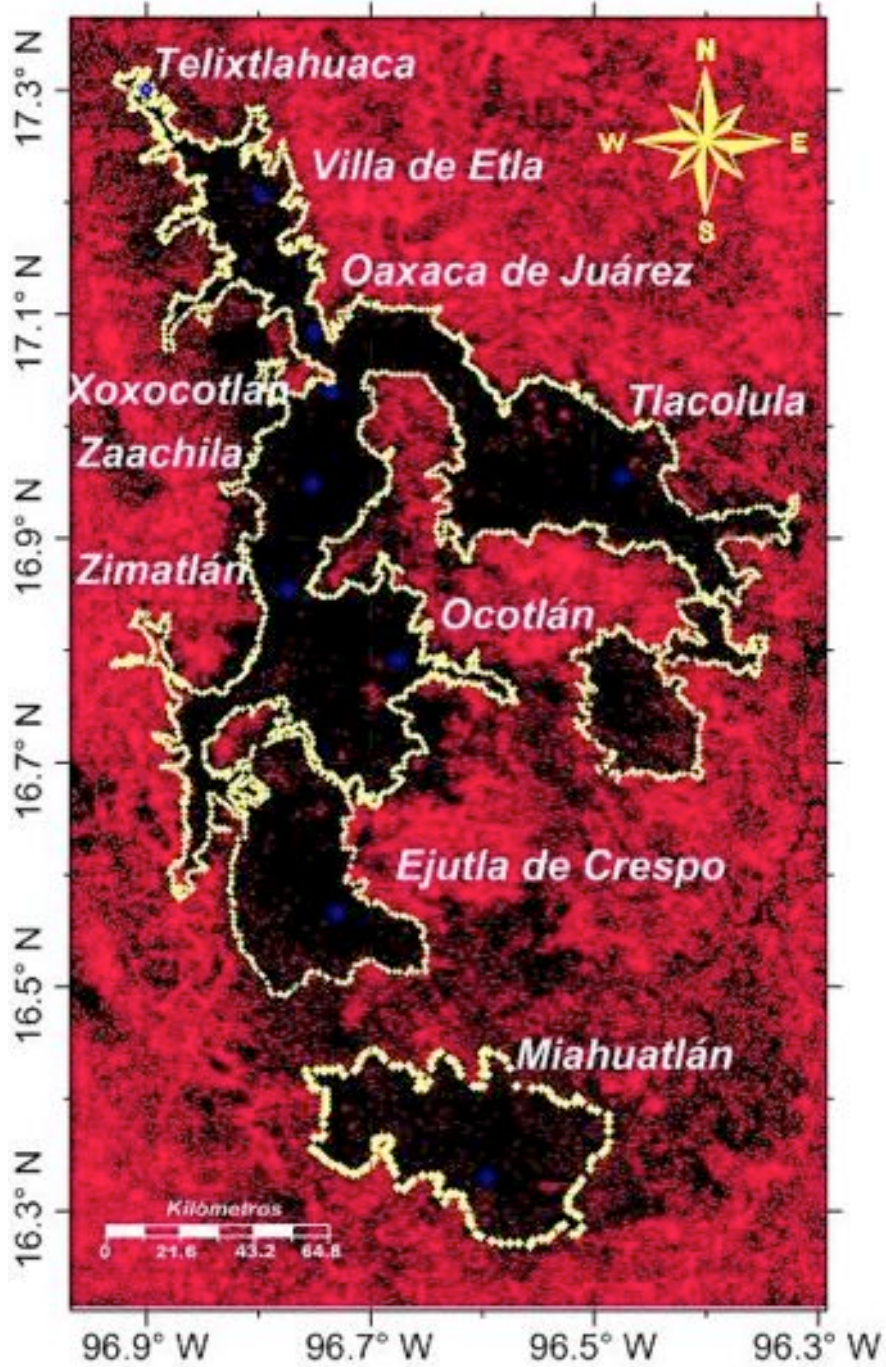


Figura 26. Mapa de clasificación de pendientes mayores a 15° para delimitar las zonas de bajas pendientes.

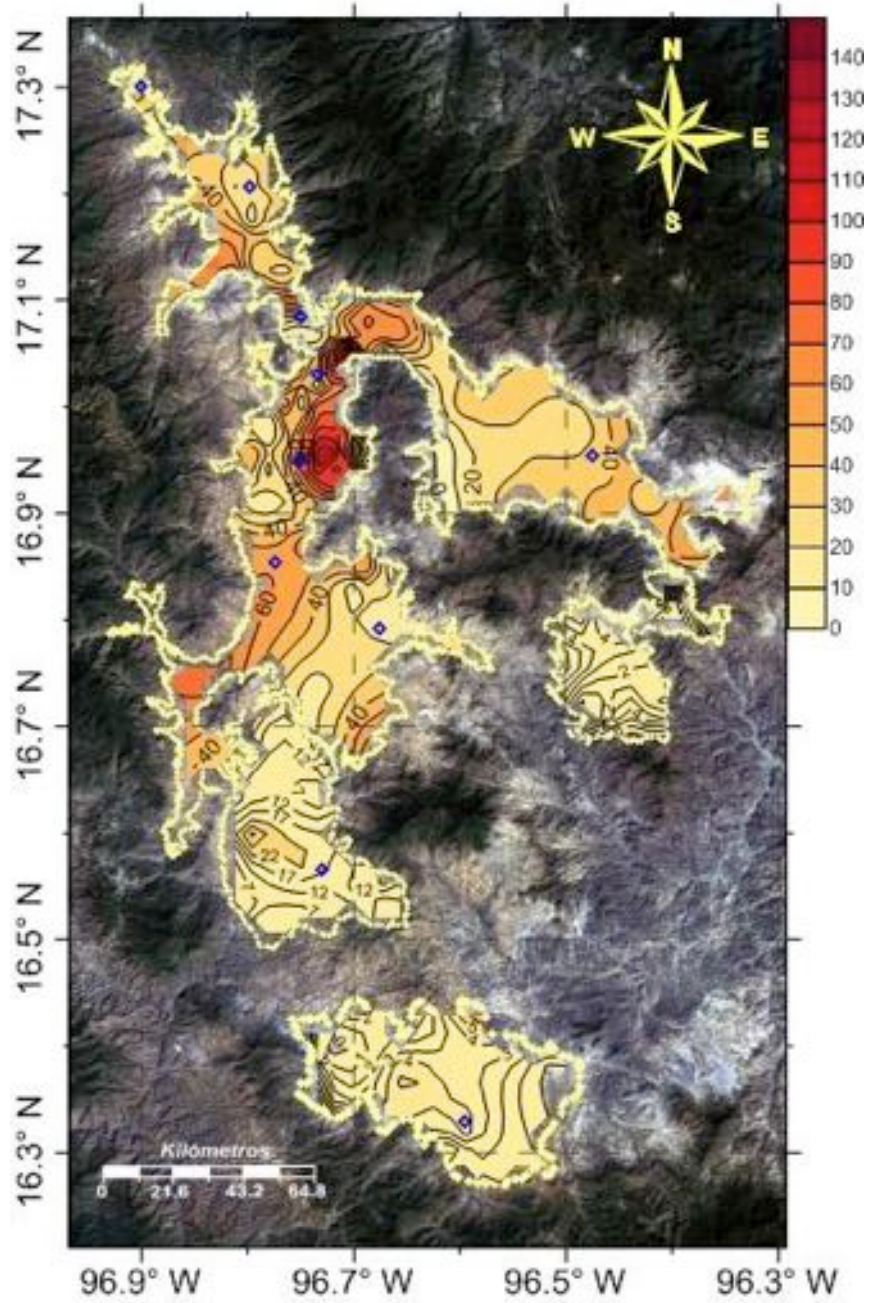


Figura 27. Combinación de bandas espectrales de imagen Landsat 321 RGB color real y mapa de isopacas obtenido de la interpretación de los SEV's.

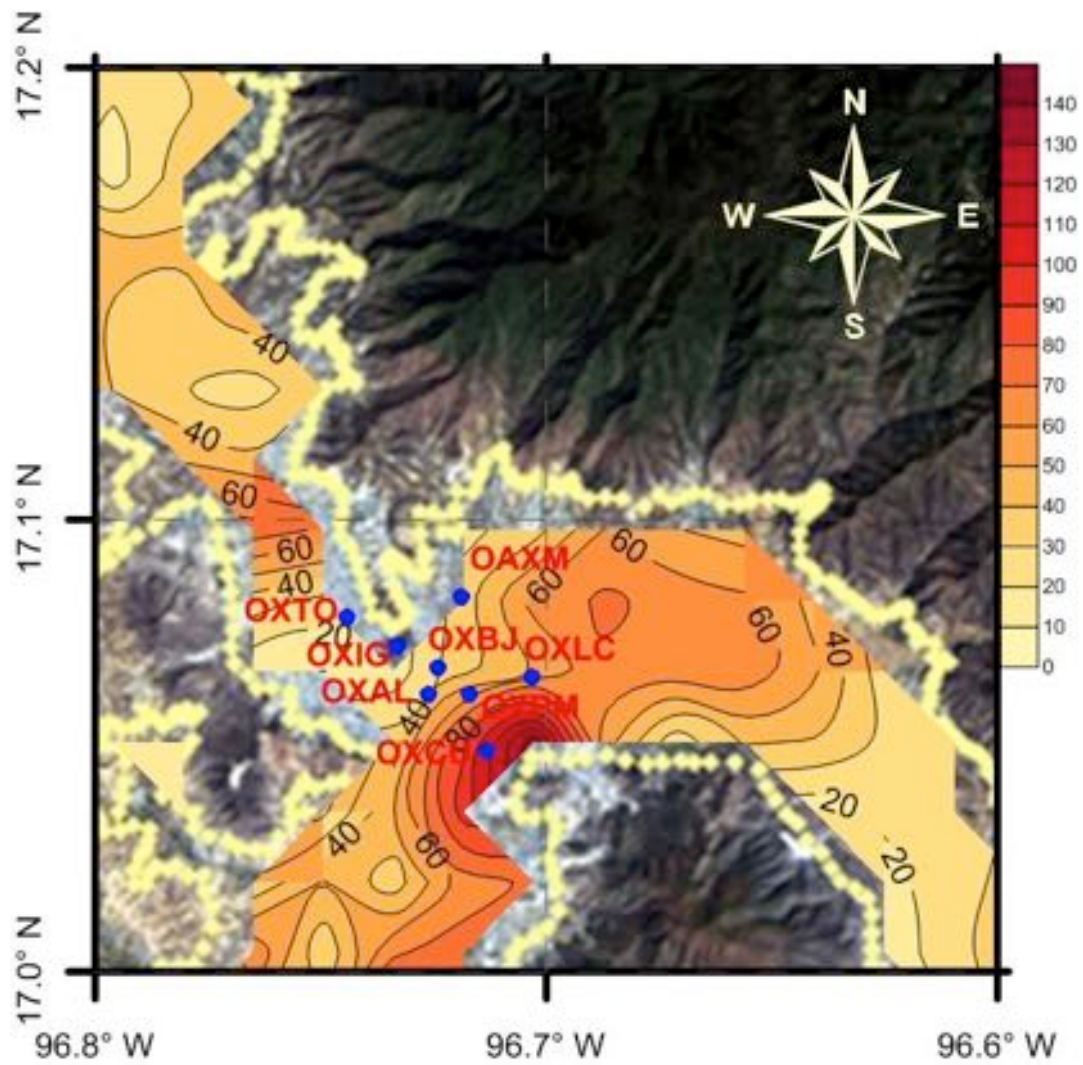


Figura 28. Ubicación de las estaciones acelerométricas en la combinación 321 RGB asociadas a los espesores del aluvión.

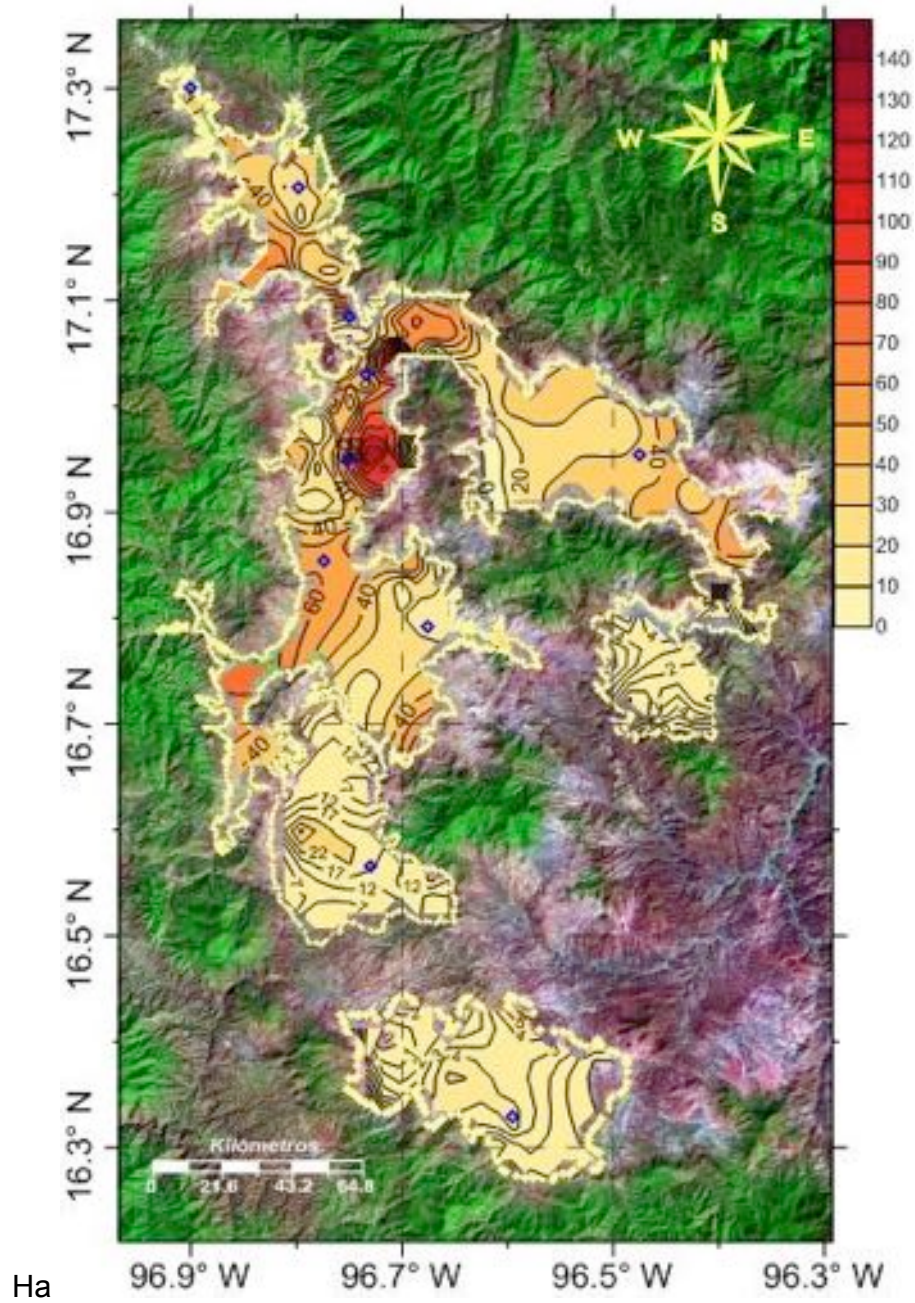


Figura 29. Combinación de bandas espectrales de imagen Landsat 742 RGB falso color y mapa de isopacas obtenido de la interpretación de los SEV's.

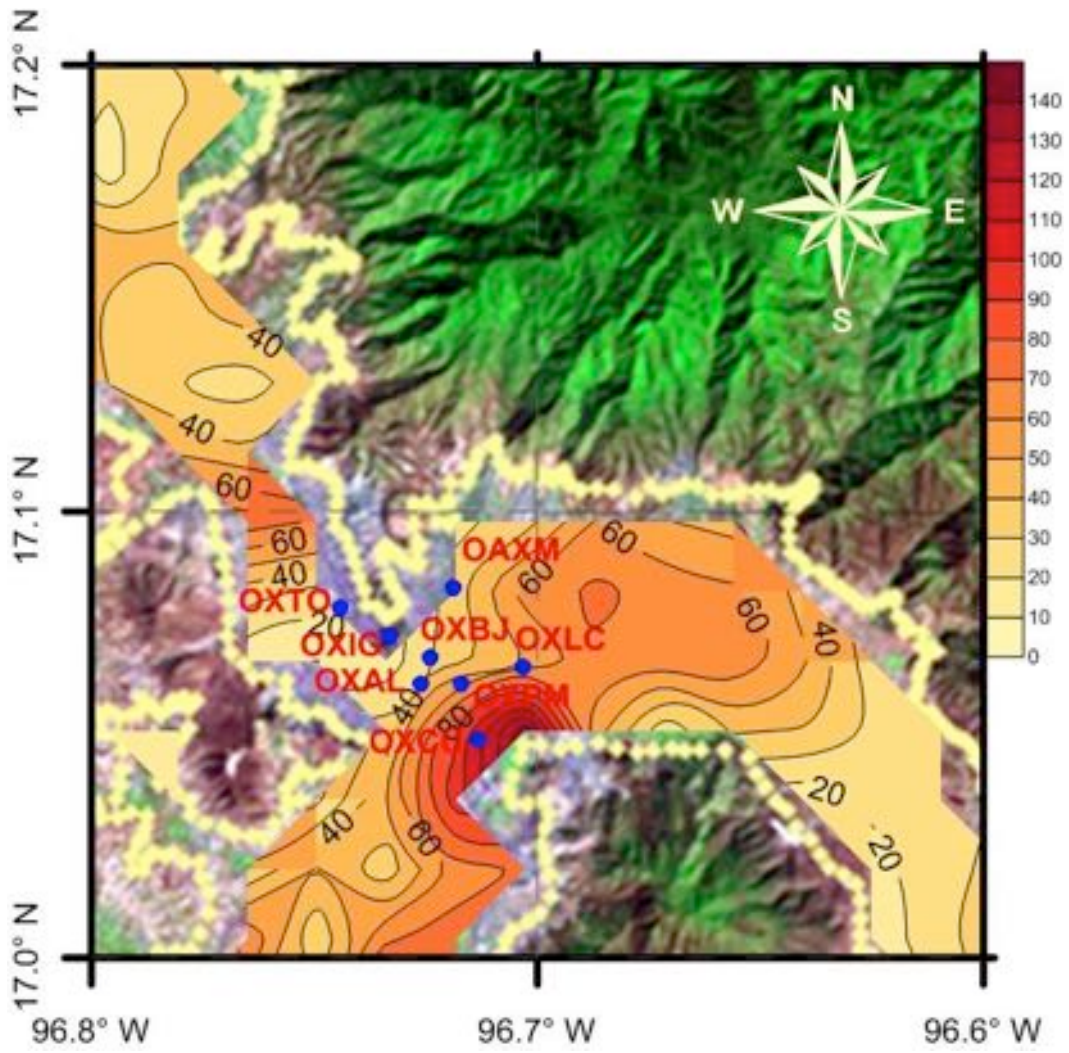


Figura 30. Ubicación de las estaciones acelerométricas en la combinación 742 RGB asociadas a los espesores del aluvión.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

IV.1 Descripción general

La importancia de las profundidades del suelo en la respuesta sísmica y el establecimiento de una correlación entre variables que son determinantes en el riesgo sísmico de una región, ha sido la finalidad de este trabajo. La pendiente, profundidad de suelo y amplificaciones, períodos y frecuencias predominantes obtenidas de los registros sísmicos, muestran una primera visión general y aproximada de cual sería la respuesta de los suelos que constituyen los Valles Centrales del estado de Oaxaca.

La literatura citada para el desarrollo de este trabajo ha sido de gran aporte para poder cumplir los objetivos, especiales aportes para establecer las correlaciones mencionadas han sido obtenidos de Wald y Allen (2007 y 2009), Shafique (2011), Belmonte (2005) y Castellanos (2008).

IV.2 Pendientes y espesores de aluvión

La pendiente es un factor determinante pues mediante ella es posible localizar las zonas compuestas por depósitos aluviales y con la interpretación de los SEV's, estimar las profundidades de suelos no consolidados existentes en la zona de estudio. Como se definió en los resultados, de acuerdo con los estudios previos de geología y la misma información que puede observarse en las imágenes satelitales, pendientes mayores a 6° sugieren cada vez menores espesores de aluvión.

Es necesario destacar que los espesores son un estimado de la realidad y un primer aporte a estudios futuros más detallados, aquí la descripción será un tanto cualitativa, indicando rangos que han permitido hacer una primera estimación de efectos de sitio, pues de acuerdo con la geología y las profundidades obtenidas con los SEV's, puede identificarse claramente que existen cambios bruscos de estratigrafía y es difícil, de acuerdo con los datos disponibles hasta este momento, poder calcular la razón de disminución o aumento en los espesores.

Para establecer la correlación entre pendiente y profundidad es necesario centrarse en las figuras 25 a 30, la zona delimitada con amarillo, son en su mayoría áreas de pendientes menores a 6 grados como puede observarse, aquí los espesores del aluvión varían entre 40 y 120 m en función de la concentración, en la figura 24 se pueden observar algunas zonas con manchas azul muy intenso acercándose que indican pendientes cada vez más cercanas a cero, es aquí donde se encuentran los mayores espesores. Dentro de las mismas zonas delimitadas, se localizan pendientes mayores a 6 identificadas por pequeñas áreas, que influyen en la disminución de los espesores que generalmente varían de 0 a 40 m en función del área cubierta por ellas.

En la zona de localización de Ejutla de Crespo, se comienza a ver el cambio en el patrón de pendientes, disminuyendo las áreas uniformes menores a 6°, entonces aquí ya se encuentran espesores de aluvión aproximadamente de 0 a 25 m.

En la zona delimitada en el área cercana a Miahuatlán, espesores casi nulos de material aluvial son observados, esto es principalmente porque en esta zona hay cambios muy fuertes de pendientes delimitadas por áreas pequeñas menores a 6° combinadas con áreas mayores a 6°, aquí las áreas de depósitos de suelos aluviales son pequeñas con espesores aproximados de 0 a 5 m.

Misma situación ocurre en la zona de Guilá ubicada al sur de Tlacolula donde las áreas de pendientes menores a 6° no son uniformes sugiriendo bajos espesores de aluvión aproximadamente de 0 a 4 m.

Especial importancia se da en este trabajo a las pendientes y espesores de aluvión existentes exactamente en la localización de las estaciones acelerométricas, los cuales fueron obtenidos del mapa de isopacas y el mapa de pendientes, tal como se muestra en la tabla 6:

Tabla 6. Datos de pendientes, elevaciones y profundidades de suelos.

| CLAVE | ESTACIÓN | LATITUD °N | LONGITUD °W | ELEVACIÓN (m) | PENDIENTE (°) | ESPESOR (m) |
|-------|-------------------------|------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
| OAXM | Facultad de medicina | 17.0829° | -96.7187° | 1595 | 0.0 | 30 |
| OXAL | Alameda de León | 17.0614° | -96.7261° | 1560 | 3.9 | 35 |
| OXBJ | Esc. Benito Juárez | 17.0673° | -96.7240° | 1569 | 6.6 | 0 |
| OXCU | Ciudad Universitaria | 17.0489° | -96.7133° | 1532 | 3.9 | 95 |
| OXLC | Las canteras | 17.0650° | -96.7033° | 1543 | 7.7 | 0 |
| OXPM | Escuela Primaria Mújica | 17.0614° | -96,7169° | 1555 | 3.7 | 55 |
| OXTO | Instituto Tecnológico | 17.0784° | -96.7442° | 1558 | 3.7 | 25 |
| OXIG | Oaxaca | 17.0720° | -96.7330° | 1692 | 12.9 | 0 |

IV.3 Extrapolación de los efectos de sitio por medio de asignación de cocientes espectrales en los Valles Centrales del Estado

La estimación de los efectos de sitio en los Valles Centrales del estado, es una primera aproximación a estudios más detallados de riesgo sísmico futuros, los espesores de aluvión varían en función de muchos parámetros tales como presencia de cuerpos de agua, ríos, arroyos, cuencas, etc. En este trabajo, por limitaciones en la cantidad de datos, sólo se ha considerado la pendiente como uno de los factores de mayor impacto en los espesores de aluvión. Se proponen un cociente de respuesta en función de la pendiente y espesor de aluvión como una forma de predecir las amplificaciones y períodos predominantes en los Valles Centrales.

Para cada una de las estaciones fueron calculados sus cocientes de respuesta y finalmente asociados con su pendiente y espesor de aluvión tal como se indica en la tabla 6. Las zonas con espesores de aluvión similares a alguna de las estaciones acelerométricas, puede considerarse que presentarán efectos de sitio muy parecidos y de esta forma se hace la aproximación. La extrapolación de los efectos de sitio hacia los Valles Centrales, se determinó entonces, considerando las pendientes y espesores de aluvión presentes en los Valles asociando estos datos, con los de alguna (s) de las estaciones y aproximando así un cociente (s) que represente los efectos de sitio esperados.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, la extrapolación se realizó de la siguiente manera: Las zonas con espesores de aluvión menores a 20 m son consideradas como no susceptibles a amplificar el movimiento por efectos de sitio, puede aproximarse una respuesta tal como la indicada para la estación OXBJ ligeramente sobrepasando la unidad (ver figura 17 y tabla 5). Estas condiciones se pueden encontrar principalmente hacia el sur de los Valles a partir de Zimatlán, Ocotlán, Ejutla de Crespo hasta Miahuatlán. Misma situación ocurre hacia el sureste donde los espesores comienzan a decrecer a partir de Santa María el Tule, hasta Tlacolula.

En las zonas mencionadas en el párrafo anterior, es posible también observar mayores espesores, esto principalmente puede ser debido a la trayectoria de ríos que cruzan estas poblaciones, donde los espesores aumentan debido al arrastre de sedimentos desde pendientes mayores. En estas zonas cuyo espesor varía aproximadamente desde 20 a 70 m, se determina una relación entre profundidad y pendiente para asignar su respuesta de la siguiente forma:

Para las zonas con profundidades de 20 a 60 m de espesor de suelo, es posible asignar los cocientes de respuesta correspondientes a las estaciones OAXM, OXAL y OXPM, cuyas amplificaciones y períodos dominantes son muy semejantes (ver figuras 15, 16 y 19 así como la tabla 5).

Las zonas con espesores de mayores de 60, son las que presentan mayores efectos de sitio, es difícil establecer de manera precisa las amplificaciones y períodos predominantes pero es posible aproximar la respuesta por medio de la envolvente de los cocientes correspondientes a OXTO y OXCU que son las zonas de mayor susceptibilidad (ver figuras 18 y 20 así como tabla 5).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El estado de Oaxaca está localizado en una zona sísmicamente activa, situación por la cual es necesario un constante esfuerzo por conocer cada vez mejor los efectos que estos fenómenos sobre todo de magnitudes mayores, pueden causar.

Se muestra la importancia de variables que hasta ahora no han sido suficientemente estudiadas en el área de riesgo sísmico de la región y que permitieron una primera estimación de los efectos de sitio en los Valles Centrales del estado y no sólo en la ciudad de Oaxaca y sus zonas conurbadas.

En las figuras 27 y 29, se observan inconsistencias en el espesor de suelo tomado de las curvas determinadas al momento de la interpolación, en la ubicación de las estaciones acelerométricas OXLC y OXBJ, debidas principalmente a los cambios bruscos de estratigrafía en la región, en estas localizaciones al igual que en OXIG, la roca se encuentra aflorando en la superficie, mientras que las curvas de profundidad indican espesores mayores a cero. Estas inconsistencias serán corregidas en trabajos posteriores mediante la toma de datos in situ en dichas estaciones.

Este trabajo contribuyó a un mejor conocimiento de los efectos que pudieran ocurrir en los Valles Centrales del estado, haciendo uso de técnicas recientes y datos que anteriormente no estaban disponibles y se sabe son determinantes en los efectos de sitio. Aunque el análisis es una aproximación fuera del Valle de Oaxaca, es un primer paso a estudios futuros más detallados de la zona.

Se resalta el potencial de los datos topográficos obtenidos por percepción remota y de técnicas geofísicas para extraer las propiedades del subsuelo, determinando la importancia de la correlación entre ambas y su aplicación en la estimación de los efectos de sitio.

Mediante la correlación entre espesores de aluvión, geología y pendientes determinados en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, fue posible aproximar los efectos de sitio esperados en las zonas susceptibles a presentarlos de acuerdo con los procedimientos anteriormente

descritos, proponiendo los espectros de respuesta que mejor definían a los Valles de acuerdo con las características mencionadas. La estimación de la respuesta sísmica en los Valles Centrales se hizo de la siguiente manera:

Tabla 7. Estimación de efectos de sitio propuesta mediante la correlación entre pendientes y espesores de aluvión.

| ESPESOR ALUVIÓN (m) | PENDIENTE (°) | AMPLIFICACIÓN DEL PERÍODO PREDOMINANTE | | PERÍODO PREDOMINANTE | |
|---------------------|-----------------------|--|------|----------------------|------|
| | | EW | NS | EW | NS |
| < 20 | >6° principalmente | 1.06 | 1.40 | 0.25 | 0.25 |
| 20-60 | <6° | 5.31 | 6.03 | 0.25 | 0.15 |
| | | 4.13 | 4.47 | 0.15 | 0.15 |
| | | 3.66 | 4.12 | 0.15 | 0.15 |
| >60 | <6° | 6.40 | 5.58 | 0.56 | 0.56 |
| | | 4.74 | 5.41 | 0.45 | 0.35 |

Para estudios futuros cada vez más detallados y con mayor precisión, es necesario:

- Ampliar la red acelerométrica, mediante la instalación de estaciones en las zonas de mayor susceptibilidad.
- Realizar más estudios geofísicos para la determinación de espesores de aluvión.
- Estudio detallado de las propiedades resistivas del aluvión para disminuir errores en la interpretación de la profundidad del estrato rocoso.

REFERENCIAS

- ✓ Abrams, M., 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 21 (5), 847–859.
- ✓ Allen, T.I., Wald, D.J., 2009. On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (V30S). *Bulletin of the Seismological Society of America* 99 (2A), 935–943.
- ✓ Alaniz–Álvarez, S.A., Nieto–Samaniego, A.F., 1994, Structural Evolution of Sierra de Juárez Complex, State of Oaxaca, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11, 147-156.
- ✓ Alaniz–Álvarez, S.A., Nieto–Samaniego, A.F., 1994, Structural Evolution of Sierra de Juárez mylonitic Complex, State of Oaxaca, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11, n.2, 147-156.
- ✓ Alaniz–Álvarez, S.A., Nieto–Samaniego, A.F., Van Der Heyden, P. y Ortega Gutiérrez, F., 1996. Radiometric and kinematic evidence for Middle jurasic strike-slip faulting in southern Mexico related to the opening of the Gulf of Mexico: *Geology*, 24, 443-446.
- ✓ Aki K (1967) Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*. 72, 1217-1231.
- ✓ Aki, K. (1988). Local site effects on strong ground motion in *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, J. L. Von Thun (Editor), geotechnical Special Publication No. 20, Am. Soc. Civil Engr., New York, 103-155.
- ✓ Anderson, D.G. and Stokoe K. H., II 1978, Shear modulus: A time dependent soil property”, *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP654, pp. 66-90.
- ✓ ASTER GDEM is a product of METI and NASA. Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 2 fue obtenido del sitio http://lpdaac.usgs.gov/get_data sustentado por la NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. (Year). Source of image data."
- ✓ Banton, O., Seguin, M.K., Cimon, M.A., 1997. Mapping field scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1010–1017.
- ✓ Belmonte-Jiménez, S.I., 2005. Caracterización Geofísica del Sistema Hidrogeológico del Valle de Zaachila, Oaxaca y su relación con la geología tectónica regional. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de doctorado.

- ✓ Belmonte J., S.I., 2011. Sondeos eléctricos verticales (SEV's) para la exploración de aguas subterráneas en Valles Centrales de Oaxaca. Inédito, IPN, CIIDIR-Oaxaca.
- ✓ Bertrand, Y., 1967. La prospección eléctrica aplicada a los problemas de puentes y carreteras. Bulletin Liaison des Laboratoires Routiers Paris – XV.
- ✓ Bouckovalas, G.D., Papadimitriou, A.G., 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25 (7–10), 547–558.
- ✓ Castellanos, F., Caballero, J.L., García, J., Clemente, M., Silva, S., Jiménez, V., Pérez, M.E, 2003, Zonación y Determinación de coeficientes preliminares de diseño sísmico para la ciudad de Oaxaca y municipios conurbados.
- ✓ Castellanos, F., 2008, Análisis Dinámico de Sistemas en el Dominio Tiempo – Frecuencia, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- ✓ Centeno-García, E., 1988. Evolución Estructural de la falla de Oaxaca durante el cenozoico: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis de maestría, pág. 156.
- ✓ Coney, P., 1989. Structural aspect of suspect terranes and accretionary tectonics in Western North America. *J. Struct. Geol.*, 11, 107-125.
- ✓ Chaplot, V., Lorentz, S., Podwojewski, P., Jewitt, G, 2010. Digital mapping of A-horizon thickness using the correlation between various soil properties and soil apparent electrical resistivity. *Geoderma* 157 (2010) 154–164.
- ✓ Chuvieco, E. 1996, Fundamentos de teledetección espacial, 3ª. Edición.
- ✓ Dávalos-Álvarez, O.G., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Martínez-Hernández, E., Ramírez-Arriaga, E., 2007, Estratigrafía cenozoica de la región de Tehuacán y su relación con el sector norte de la falla de Oaxaca: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(2), 197–215.
- ✓ Dobry, R., Vucetic, M., 1987, Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits, *Proceedings International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Volume II, pp. 51-87.
- ✓ Gaudio, V.D., Wasowski, J., 2007. Directivity of slope dynamic response to seismic shaking. *Geophysical Research Letters* 34, 1–8.
- ✓ Hardin, B.O., 1978, the nature of stress-strain behavior for soils, *Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering division specialty conference on earthquake Engineering and soil dynamics*, California, Vol. I, pp. 3-90.

- ✓ Hardin, B.O., Drnevich, V.P., 1972a, Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects, Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE Vol. 98, No. SM6, pp. 603-624.
- ✓ Hardin, B.O., Drnevich, V.P., 1972b, Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692.
- ✓ Hoar, R.J., Stokoe, K.H., II 1977, Generation and measurement of shear waves in situ, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, pp. 3-29.
- ✓ Joyner WB, Boore DM. Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. In: Earthquake Engineering and soil Dynamics II, Proc, ASCE Geotec Eng Div Specialty Conf.
- ✓ Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. An introduction to geophysical exploration. Blackwell Science.
- ✓ Landsat, 2011. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
- ✓ Lathi, B.P., 1998, Signal processing and linear systems, Cap.2.
- ✓ León J L (1976) Información general acerca del subsuelo de 16 ciudades de México - Oaxaca, Oax. Memoria de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Tomo II. 157-170.
- ✓ Lermo J, Cruz M, Urbietta J, Nava E (1991a) Microzonificación sísmica y análisis de amplificación relativa en la Ciudad de Oaxaca, parte I. Informe elaborado para el CENAPRED e Instituto de Ingeniería.
- ✓ Lermo L, Chávez-García F, Urbietta J (1991b) Microzonificación sísmica y análisis de amplificación relativa en la ciudad de Oaxaca. Informe final elaborado para el CENAPRED.
- ✓ Meheni, Y., Gue´rin, R., Benderitter, Y., Tabbagh, A., 1996. Subsurface DC resistivity mapping: approximate 1-D interpretation. J. Appl. Geophys. 34, 255–270.
- ✓ Morales J V (2003) Estudio de las características físicas del subsuelo de la Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oax y su área conurbada (1976-2002). Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Oaxaca. Junio.
- ✓ Nakamura Y. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its application. In: Proceedings of the 12th world conference of earthquake engineering; 2000.

- ✓ Nieto–Samaniego, A. F., Alaniz–Álvarez, S. A., Ortega–Gutiérrez, F., 1995, Estructura interna de la falla de Oaxaca (México) e influencia de las anisotropías litológicas durante su actividad cenozoica: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12, 1–8.
- ✓ Nguyen, K.-V., Gatmiri, B., 2007. Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27 (2), 183–188.
- ✓ Noyola-Medrano, M.C., Hinojosa-Corona, A. y Martín-Barajas, A., 2005. Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la faja costera central de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.22, núm. 2, p. 229-245.
- ✓ Pérez M E (2002) Zonificación sísmica de la Ciudad de Oaxaca. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- ✓ Richart, F.E., 1975, Some effects of dynamic soil properties on soil structure interaction, *Journal of the Geotechnical Engineering division, ASCE* Vol. 101, No. GT12, pp. 1193-1240.
- ✓ Romo, M. P. Seed, H. B. (1986). Analytical modeling of dynamic soil response in the Mexico earthquake of September 19, 1985.
- ✓ Ronald, J., 2006, Idrissi Andes, version 15.00, pp. 18-22, Tutorial.
- ✓ Safak E. Discrete-time analysis of seismic site amplification. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 1995.
- ✓ Safak E. Models and methods to characterize site amplification from a pair of records. *Earthquake Spectra, EERI* 1997.
- ✓ Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 83, 173–193.
- ✓ Sánchez-Sesma FJ, Campillo, M. Diffraction of P, SV and Rayleigh waves by topographic features: a boundary integral formulation. *Bulletin Seismological Society* 1991; 81:2234–53.
- ✓ Scales, J.A., Smith, M.L. and Treitel, S., 2001. *Introductory Geophysical Inverse Theory*. Center for wave phenomena. Colorado school of mines.
- ✓ Seed, H. B. and Idriss, I. M., 1970, Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.
- ✓ Servicio Geológico Mexicano, 2000. *Cartas geológico mineras versión pdf.*, escala 1:50,000 y 1:250,000.
- ✓ Seed, H. B. and Idriss, I. M., 1970, Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.

- ✓ Shafique, M., M. van der Meijde, *et al.* (2011). "Impact of DEM source and resolution on topographic seismic amplification." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13(3): 420-427.
- ✓ Sharma, P.V., 1997. *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge University Press.
- ✓ Stamatopoulos, C.A., Bassanou, M., Brennan, A.J., Madabhushi, G., 2007. Mitigation of the seismic motion near the edge of cliff-type topographies. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27 (12), 1082–1100.
- ✓ Tolsón, G., 2005, La falla Chacalapa en el sur de Oaxaca, en Alaniz–Alvarez, S. A., Nieto–Samaniego, A. F. (eds.), *Grandes Fronteras Tectónicas de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario*, 52(1), 111–122.
- ✓ Wald, D.J., Allen, T.I., 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America* 97 (5), 1379–1395.
- ✓ Allen, T. I. and D. J. Wald (2009). On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30), *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 2A, pp. 935-943.
- ✓ Wilson, J.A. and Claubagh, S.E., 1970. A new Miocene formation and a description of volcanic rocks, northern valley of Oaxaca. Rodríguez Torres (Eds). *Libro guía de la excursión México-Oaxaca*, Sociedad Geológica Mexicana, 120-128.

APÉNDICE A. Eventos seleccionados para el estudio de los efectos de sitio.

| CLAVE SISMO | FECHA SISMO | MAGNITUD | COORDENADAS EPICENTRALES | | DISTANCIA EPICENTRAL (Km) | ESTACIONES DE REGISTRO SÍSMICO | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|--|--|--|---|---|
| | | | LATTITUD | LONGITUD | | OXCU | OXLC | OXTO | OXPM | OXBJ | OAXM | OXAL | | | | | |
| 13 | 199906151 | 7.0 | 18.18 | -97.51 | 150 | | X | | | | | | | | | X | |
| 14 | 199906152 | 4.5 | 18.15 | -97.63 | 155 | | X | | | | | | | | | X | |
| 15 | 199909301 | 7.6 | 15.95 | -97.03 | 129 | | X | | | | | | | | | X | |
| 18 | 199911061 | 4.5 | 17.58 | -96.71 | 57 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 22 | 200001191 | 4.5 | 16.41 | -96.68 | 72 | | X | X | X | X | | | | | | | |
| 23 | 200003011 | 4.7 | 15.86 | -97.12 | 141 | | X | X | X | X | | | | | | X | |
| 24 | 200003121 | 6.4 | 14.44 | -93.00 | 494 | | X | X | X | | | | | | | | |
| 28 | 200009291 | 4.7 | 16.09 | -95.89 | 139 | | X | X | X | X | | | | | | | |
| 33 | 200109081 | 4.8 | 16.59 | -94.95 | 196 | | X | X | X | X | | | | | | | X |
| 34 | 200110031 | 4.4 | 16.95 | -96.83 | 18 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 37 | 200201161 | 6.3 | 15.58 | -93.60 | 372 | | X | X | X | X | | | | | | | |
| 38 | 200201301 | 5.1 | 18.21 | -96.02 | 146 | | X | X | X | X | | | | | | X | |
| 42 | 200206072 | 5.6 | 15.92 | -96.96 | 130 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 46 | 200208051 | 5.3 | 16.51 | -96.07 | 92 | | X | X | X | X | | | | | | X | |
| 47 | 200208271 | 4.9 | 15.91 | -97.28 | 141 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 57 | 200401131 | 5.1 | 16.01 | -97.30 | 132 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 58 | 200401132 | 5.5 | 15.90 | -97.03 | 133 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 60 | 200401171 | 4.7 | 17.68 | -95.66 | 132 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 62 | 200402181 | 4.3 | 16.92 | -96.86 | 22 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |
| 67 | 200408071 | 5.3 | 17.10 | -95.48 | 132 | | X | X | X | X | | | | | | X | X |

| CLAVE SISMO | FECHA SISMO | MAGNITUD | COORDENADAS EPICENTRALES | | DISTANCIA EPICENTRAL (Km) | ESTACIONES DE REGISTRO SISMICO | | | | | | | | |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|---|---|
| | | | LATITUD | LONGITUD | | OXCU | OXLC | OXTO | OXPM | OXBJ | OAXM | OXAL | | |
| 68 | 200408181 | 5.7 | 16.33 | -95.14 | 188 | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 73 | 200412101 | 5.1 | 15.14 | -97.33 | 223 | X | X | X | | | | | X | |
| 75 | 200509081 | 4.4 | 17.34 | -97.21 | 60 | | X | X | X | X | | | X | X |
| 76 | 200509241 | 4.7 | 17.88 | -97.03 | 96 | | X | X | X | X | X | X | X | |
| 86 | 200601191 | 4.2 | 17.13 | -96.75 | 8 | X | X | X | X | | | X | X | X |
| 88 | 200606081 | 4.2 | 17.30 | -96.63 | 28 | X | X | X | X | X | | | X | X |
| 90 | 200608191 | 5.5 | 15.91 | -97.30 | 142 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 91 | 200611081 | 5.1 | 16.05 | -96.54 | 114 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 93 | 200702141 | 4.6 | 16.76 | -96.18 | 67 | X | X | X | X | | | X | | X |
| 95 | 200703151 | 5.1 | 16.08 | -97.26 | 123 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 98 | 200705041 | 4.8 | 17.20 | -96.84 | 19 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 99 | 200706021 | 4.5 | 17.03 | -95.61 | 118 | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| 101 | 200707061 | 6.2 | 16.90 | -94.10 | 280 | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 102 | 200708201 | 4.5 | 17.34 | -95.96 | 86 | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| 104 | 200709151 | 5.0 | 17.46 | -94.71 | 218 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 106 | 200710011 | 4.7 | 17.24 | -94.36 | 252 | X | X | X | X | X | | | X | X |
| 108 | 200710171 | 3.7 | 16.98 | -96.63 | 14 | | X | | | | | | X | |
| 109 | 200710201 | 4.5 | 16.08 | -95.60 | 162 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 112 | 200711121 | 4.2 | 17.45 | -97.07 | 57 | X | X | | | | | | X | X |
| 113 | 200711191 | 4.4 | 15.93 | -96.58 | 126 | X | X | | | | | | X | |
| 118 | 200712111 | 4.6 | 15.74 | -96.92 | 148 | X | X | X | X | X | X | | X | |
| 119 | 200712131 | 4.5 | 17.26 | -96.70 | 22 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 120 | 200801041 | 4.4 | 17.01 | -94.76 | 209 | X | X | X | X | | | | X | X |
| 121 | 200801091 | 4.1 | 17.02 | -96.38 | 37 | X | X | X | X | X | X | | X | |
| 122 | 200801181 | 4.5 | 16.88 | -95.10 | 174 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

| CLAVE SISMO | FECHA SISMO | MAGNITUD | COORDENADAS EPICENTRALES | | DISTENCIA EPICENTRAL (Km) | ESTACIONES DE REGISTRO SISMICO | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | LATTITUD | LONGITUD | | OXCU | OXLC | OXTO | OXPM | OXBJ | OAXM | OXAL | | | | | | | |
| 124 | 200802111 | 4.8 | 16.22 | -94.22 | 283 | X | X | X | X | | | | | | | | | | |
| 125 | 200802121 | 6.6 | 16.19 | -94.54 | 252 | X | X | X | X | X | | | | | | | | | |
| 127 | 200803081 | 4.5 | 17.22 | -94.81 | 204 | X | X | X | X | | | | | | | | | | |
| 128 | 200804111 | 4.3 | 16.94 | -95.33 | 148 | X | X | | | | | | | | | | | | |
| 129 | 200804151 | 6.5 | 13.27 | -91.04 | 741 | X | X | X | | | | | | | | | | | |
| 131 | 200804281 | 5.6 | 18.05 | -100.01 | 366 | X | X | X | | | | | | | | | | | |
| 132 | 200805041 | 4.5 | 15.41 | -96.75 | 183 | X | X | | | | | | | | | | | | |
| 134 | 200805171 | 4.8 | 16.18 | -98.06 | 173 | X | X | X | X | X | | | | | | | | | |
| 135 | 200806011 | 4.1 | 17.04 | -96.80 | 9 | X | X | X | X | X | | | | | | | | | |
| 136 | 200806201 | 4.0 | 16.07 | -96.50 | 112 | X | X | | | | | | | | | | | | |
| 137 | 200806221 | 4.9 | 15.32 | -94.29 | 324 | X | X | X | X | | | | | | | | | | |
| 138 | 200707181 | 4.5 | 17.95 | -97.49 | 128 | X | X | | | | | | | | | | | | |
| 139 | 200807301 | 5.1 | 15.98 | -96.10 | 137 | X | X | X | X | X | | | | | | | | | |
| 140 | 200809101 | 4.8 | 15.91 | -95.07 | 217 | X | X | | | | | | | | | | | | |
| 141 | 200810161 | 6.6 | 13.87 | -92.50 | 575 | X | X | X | | | | | | | | | | | |
| 143 | 200811231 | 4.8 | 17.13 | -94.09 | 279 | | X | | | | | | | | | | | | |
| 144 | 200812041 | 4.2 | 16.36 | -95.10 | 189 | | X | | | | | | | | | | | | |
| 145 | 200812111 | 4.0 | 17.47 | -97.40 | 84 | | X | | | | | | | | | | | | |
| 146 | 200812151 | 4.4 | 17.07 | -97.00 | 30 | | X | X | X | | | | | | | | | | |
| 147 | 200812181 | 4.3 | 16.54 | -98.08 | 157 | | X | | | | | | | | | | | | |
| 148 | 200901171 | 5.2 | 15.74 | -92.76 | 448 | | X | X | | | | | | | | | | | |
| 149 | 200901211 | 4.1 | 15.76 | -96.66 | 146 | | X | | | | | | | | | | | | |
| 150 | 200902021 | 4.2 | 15.95 | -96.44 | 128 | | X | | | | | | | | | | | | |

| CLAVE SISMO | FECHA SISMO | MAGNITUD | COORDENADAS EPICENTRALES | | DISTENCIA EPICENTRAL (Km) | ESTACIONES DE REGISTRO SISMICO | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|---|---|---|
| | | | LATTITUD | LONGITUD | | OXCU | OXLC | OXTO | OXPM | OXBJ | OAXM | OXAL | | | |
| 151 | 200902181 | 4.8 | 16.72 | -94.71 | 218 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 152 | 200903101 | 4.9 | 16.46 | -93.65 | 334 | | X | X | | | | | | X | |
| 153 | 200904071 | 4.8 | 15.82 | -96.65 | 138 | X | X | X | X | | X | X | | | X |
| 155 | 200904271 | 5.7 | 16.90 | -99.58 | 305 | X | X | X | X | | | X | X | | |
| 156 | 200905221 | 5.7 | 18.13 | -98.44 | 217 | X | X | X | X | | X | X | | | X |
| 157 | 200905261 | 4.6 | 15.86 | -95.65 | 176 | | X | X | X | | | | | | |
| 160 | 200906071 | 5.0 | 16.15 | -93.32 | 378 | | X | X | X | | | | | | |
| 166 | 200908141 | 4.4 | 17.63 | -95.08 | 185 | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| 167 | 200908191 | 4.4 | 16.04 | -97.20 | 124 | X | X | X | X | | | X | X | X | X |
| 169 | 200908281 | 4.0 | 17.40 | -96.79 | 37 | | X | | | | | | X | | |
| 170 | 200909081 | 5.1 | 17.68 | -95.77 | 122 | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| 171 | 200909151 | 3.9 | 16.45 | -96.66 | 69 | | X | | | | | | | X | |
| 172 | 200909181 | 4.8 | 15.49 | -97.53 | 195 | | X | X | X | | | X | X | X | |
| 174 | 200910081 | 4.0 | 16.03 | -96.88 | 116 | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| 175 | 200910291 | 5.5 | 18.89 | -95.81 | 224 | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| 179 | 200912161 | 4.1 | 16.69 | -94.80 | 209 | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| 180 | 200912251 | 4.2 | 15.73 | -94.37 | 292 | | X | X | X | | | | | | |
| 183 | 201001081 | 4.6 | 16.86 | -94.25 | 263 | | X | | | | | | | X | |
| 185 | 201001191 | 4.0 | 16.59 | -96.51 | 57 | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| 186 | 201001201 | 4.7 | 16.53 | -96.86 | 207 | | X | X | X | | | | | X | |
| 187 | 201001231 | 4.1 | 17.44 | -97.19 | 64 | | X | X | X | | | | | X | |
| 188 | 201002011 | 4.3 | 16.27 | -96.20 | 104 | X | X | X | X | | | | | X | X |
| 190 | 201002091 | 5.8 | 15.90 | -96.86 | 130 | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |

| CLAVE SISMO | FECHA SISMO | MAGNITUD | COORDENADAS EPICENTRALES | | DISTANCIA EPICENTRAL (Km) | ESTACIONES DE REGISTRO SISMICO | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|---|---|---|---|---|
| | | | LATITUD | LONGITUD | | OXCU | OXLC | OXTO | OXPM | OXBU | OAXM | OXAL | | | | | |
| 196 | 201002261 | 4.4 | 15.82 | -96.91 | 139 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 200 | 201003171 | 4.2 | 16.04 | -96.98 | 117 | X | X | X | X | | | X | X | X | X | | X |
| 202 | 201004121 | 4.2 | 16.56 | -96.54 | 59 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 203 | 201004161 | 5.1 | 16.14 | -98.41 | 207 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 204 | 201004201 | 5.0 | 16.07 | -98.34 | 205 | X | X | X | X | | | X | X | X | X | | X |
| 205 | 201005131 | 4.1 | 15.99 | -97.18 | 128 | X | X | X | X | | | X | X | X | X | | X |
| 209 | 201005311 | 4.4 | 17.47 | -95.52 | 135 | | X | X | X | | | | | | X | | |
| 210 | 201006081 | 4.0 | 16.11 | -97.26 | 120 | X | X | X | X | | | X | X | X | X | | X |
| 211 | 201006082 | 4.0 | 16.11 | -97.26 | 56 | | X | X | X | | | X | X | X | | | |
| 212 | 201006091 | 3.8 | 17.47 | -96.39 | 206 | | X | X | X | | | | | | X | | |
| 219 | 201006251 | 5.1 | 15.22 | -96.44 | 104 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 224 | 201007011 | 3.0 | 16.18 | -96.44 | 81 | | X | X | X | | | | | | X | | |
| 229 | 201007241 | 4.4 | 17.38 | -96.02 | 221 | | X | X | X | | | | | | X | | |
| 235 | 201009211 | 5.0 | 15.73 | -95.19 | 304 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 240 | 201011011 | 5.0 | 16.68 | -93.90 | 136 | X | X | X | X | X | X | | | | X | | X |
| 241 | 201011261 | 4.5 | 16.13 | -95.91 | 134 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 242 | 201011262 | 4.5 | 16.13 | -95.91 | 135 | | X | X | X | X | X | | | | X | | |
| 247 | 201101051 | 4.5 | 16.29 | -98.26 | 185 | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | |
| 249 | 201101201 | 5.1 | 16.55 | -94.00 | 296 | | X | X | X | X | X | | | | X | | |
| 250 | 201102041 | 4.5 | 17.25 | -96.56 | 27 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 251 | 201102111 | 4.4 | 16.02 | -95.94 | 143 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 253 | 201102251 | 6.0 | 17.73 | -95.21 | 177 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |
| 254 | 201102281 | 4.2 | 15.62 | -96.26 | 168 | | X | X | X | X | | | | X | X | | X |

| CLAVE SISMO | FECHA SISMO | MAGNITUD | COORDENADAS EPICENTRALES | | DISTENCIA EPICENTRAL (Km) | ESTACIONES DE REGISTRO SISMICO | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|---|---|---|
| | aaaammde | | LATTITUD | LONGITUD | | OXCU | OXLC | OXTO | OXPM | OXBJ | OAXM | OXAL | | | |
| 255 | 201103261 | 4.1 | 16.31 | -96.37 | 92 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 257 | 201104071 | 6.7 | 17.20 | -94.34 | 254 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 260 | 201104181 | 4.4 | 17.61 | -94.97 | 196 | | X | X | | | | | | | |
| 261 | 201104261 | 5.5 | 16.71 | -99.69 | 319 | | X | X | | | | | | | |
| 263 | 201105051 | 5.5 | 16.61 | -98.91 | 239 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 264 | 201105111 | 4.5 | 16.24 | -96.26 | 108 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 268 | 201106031 | 4.9 | 17.69 | -95.31 | 165 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 269 | 201106101 | 4.9 | 16.00 | -98.54 | 228 | | X | X | | | | | | | |
| 270 | 201106121 | 4.8 | 17.19 | -95.15 | 168 | | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 273 | 201107091 | 5.3 | 15.87 | -96.42 | 136 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 274 | 201107101 | 4.8 | 16.58 | -95.21 | 171 | | X | X | X | | | | | | |
| 275 | 201108131 | 5.7 | 14.58 | -94.88 | 339 | | X | | | | | | | | |
| 278 | 201112111 | 6.5 | 17.84 | -99.98 | 357 | | X | | | | | | X | | |

APÉNDICE B. Datos de sondeos eléctricos verticales realizados de los años 2007 a 2012 para la obtención de profundidades del aluvi6n.

| DATOS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV's) | | | | | |
|---|--------------------------------|-------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| No. | Coordenadas Geográficas | | Elevaci6n (m.s.n.m) | Profundidad (m) | Ubicaci6n |
| | X | Y | | | |
| 1 | -96.7657514 | 17.00868586 | 1562 | 66 | Cruz Blanca |
| 2 | -96.7926088 | 16.95295035 | 1524 | 58.7 | Soledad Zaachila |
| 3 | -96.7052307 | 16.91822809 | 1535 | 47 | Col. Guardado |
| 4 | -96.5958482 | 17.00691189 | 1575 | 39.5 | Lachigolo |
| 5 | -96.7466415 | 16.95707321 | 1520 | 71 | Pozo Zaachila (San Jose) |
| 6 | -96.7452434 | 16.88924129 | 1499 | 36 | Santa Catarina Quiane |
| 7 | -96.738984 | 16.58822698 | 1462 | 22 | Miguel Ejutla |
| 8 | -96.7228067 | 16.94482997 | 1516 | 25 | San Bartolo Coyotepec |
| 9 | -96.730649 | 17.03333857 | 1546 | 57 | Xoxo |
| 10 | -96.7499836 | 16.56556239 | 1422 | 22 | Taniche |
| 11 | -96.4842315 | 16.97705658 | 1640 | 23 | Allende Tlacolula |
| 12 | -96.7451203 | 16.99797918 | 1537 | 60 | Uni6n Xoxo |
| 13 | -96.5970641 | 16.32117412 | 1552 | 5 | Zona Militar |
| 14 | -96.7740655 | 16.93902643 | 1530 | 29 | CBTA 78 |
| 15 | -96.2986488 | 16.74777956 | 1521 | 40 | San Dionisio Ocotl6n |
| 16 | -96.7058061 | 16.83254188 | 1499 | 13.75 | Zegache |
| 17 | -96.845283 | 16.65594856 | 1454 | 36.5 | Ayoquesco |
| 18 | -96.8076211 | 17.13303321 | 1600 | 74.65 | Cacaotepec |
| 19 | -96.7682518 | 17.0242876 | 1562 | 19.5 | Carrasco Altamirano |
| 20 | -96.7655208 | 16.94410951 | 1532 | 44.7 | CBTA Zaachila |
| 21 | -96.8349505 | 16.3840463 | 1469 | 73.1 | Coatl6n |
| 22 | -96.5805019 | 16.50764779 | 1464 | 25.3 | Coatecas Altas |
| 23 | -96.970357 | 17.81423092 | 1598 | 47.6 | Cuicatl6n |
| 24 | -96.9113332 | 17.3003817 | 1736 | 44.9 | Terreno Elmer |
| 25 | -96.5613372 | 16.96921411 | 1586 | 28.0 | Guelavia |
| 26 | -96.7724488 | 16.82085393 | 1484 | 59.5 | Huixtepec |
| 27 | -96.7243293 | 16.91030226 | 1516 | 21.7 | Cd Judicial |
| 28 | -96.7678404 | 16.9971997 | 1565 | 82.5 | San Juan Cuilapam |
| 29 | -96.8041236 | 17.20665751 | 1650 | 12.45 | Templo Morm6n Etl6 |
| 30 | -96.9087789 | 17.29006501 | 1724 | 45.8 | Piedra Blanca |
| 31 | -96.5078551 | 16.97144869 | 1601 | 27.75 | Tlacolula |

| DATOS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV's) | | | | | |
|---|--------------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| No. | Coordenadas Geográficas | | Elevación (m.s.n.m) | Profundidad (m) | Ubicación |
| | X | Y | | | |
| 32 | -96.4569059 | 16.79456503 | 1649 | 6.0 | Guila |
| 33 | -96.7357387 | 16.73914827 | 1492 | 14.5 | San Pedro Apóstol |
| 34 | -96.7761461 | 17.17326003 | 1655 | 46.5 | San Sebastian Etlá |
| 35 | -96.7846744 | 16.92594318 | 1530 | 33.4 | Trinidad Zaachila |
| 36 | -97.837518 | 17.28474638 | 1970 | 34.0 | Mixtepec |
| 37 | -97.0040414 | 17.32955967 | 2014 | 59.8 | Tenango |
| 38 | -96.711477 | 17.0493116 | 1564 | 26.6 | UABJO |
| 39 | -96.4101005 | 16.91694199 | 1652 | 34.5 | Unión Zapata |
| 40 | -96.8468279 | 17.22508729 | 1648 | 36.0 | Xochimilco |
| 41 | -96.752971 | 17.02378504 | 1562 | 73.2 | Monte Bello |
| 42 | -96.873679 | 17.27568404 | 1714 | 88.0 | Huitzo COBAO |
| 43 | -96.4942309 | 16.59154673 | 1509 | 68.0 | San José Progreso |
| 44 | -96.9803377 | 16.52882837 | 1416 | 73.5 | Sola de Vega |
| 45 | -96.7666758 | 17.11884477 | 1574 | 12.5 | Pueblo Nuevo |
| 46 | -96.3856229 | 16.54930374 | 1049 | 8.75 | Taquiche |
| 47 | -96.6583195 | 16.81159943 | 1530 | 9.5 | Tocuela |
| 48 | -96.8293074 | 16.74435474 | 1475 | 80.65 | Trapiche |
| 49 | -96.8008469 | 17.13542589 | 1592 | 30.0 | Cacatepec |
| 50 | -96.7597407 | 17.07580378 | 1569 | 11.0 | Calicanto |
| 51 | -96.7905055 | 17.03313095 | 1605 | 22.2 | Cuilapam |
| 52 | -96.74502 | 16.99851105 | 1534 | 66.5 | Zaus |
| 53 | -96.719129 | 16.91276472 | 1529 | 51.0 | Psiqui |
| 54 | -96.7702892 | 16.97828256 | 1556 | 18.5 | San Lucas |
| 55 | -96.7426391 | 16.79713999 | 1481 | 42.45 | Santiago Apostol |
| 56 | -96.671986 | 16.66643252 | 1665 | 92.1 | San José del Progreso |
| 57 | -96.8730523 | 17.25326368 | 1670 | 40.0 | Suchil |
| 58 | -96.7929508 | 17.05920231 | 1647 | 10.0 | Ixtlahuaca |
| 59 | -96.7537224 | 16.96546238 | 1524 | 45.5 | Jalpan |
| 60 | -96.7537066 | 17.02980963 | 1607 | 6.0 | Monte Bello |
| 61 | -96.7455642 | 16.99854418 | 1540 | 19.5 | CIIDIR |
| 62 | -96.7581385 | 17.0101198 | 1544 | 54.95 | Fresnos |
| 63 | -96.8764323 | 17.27502659 | 1704 | 10.2 | Huitzo COBAO |
| 64 | -96.7441218 | 17.05777108 | 1559 | 14.85 | San Martín |
| 65 | -96.7935189 | 17.17749792 | 1625 | 6.0 | Resurrección |
| 66 | -96.7705279 | 17.01445667 | 1574 | 25.5 | Cruz Blanca |

| DATOS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV's) | | | | | |
|---|--------------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| No. | Coordenadas Geográficas | | Elevación (m.s.n.m) | Profundidad (m) | Ubicación |
| | X | Y | | | |
| 67 | -96.7034319 | 16.97053913 | 1530 | 81.8 | Coyotepec |
| 68 | -96.4382388 | 16.98135184 | 1687 | 53.7 | Díaz Ordaz |
| 69 | -96.7379403 | 17.00873992 | 1525 | 9.6 | El Higo |
| 71 | -96.7126224 | 16.91460716 | 1526 | 71.4 | Zaachila |
| 72 | -96.4891325 | 16.98117254 | 1626 | 23.75 | Santa Ana Tlacolula |
| 73 | -96.7544564 | 17.10371362 | 1576 | 98.8 | BIOTECNICA |
| 74 | -96.6211454 | 17.07326768 | 1620 | 13.0 | Tomaltepec |
| 75 | -96.7085447 | 17.10101315 | 1647 | 16.0 | San Felipe del Agua |
| 76 | -96.6855467 | 16.74808571 | 1528 | 29.5 | GESO |
| 77 | -96.7733418 | 16.99564288 | 1572 | 21.5 | El Calvario |
| 78 | -96.6694742 | 16.82973888 | 1512 | 25.0 | Chilateca |
| 79 | -96.7203799 | 17.02139871 | 1530 | 61.0 | "La Salle" |
| 80 | -96.8031259 | 16.59353083 | 1442 | 40.5 | Agua del Espino |
| 81 | -96.7498838 | 17.01104948 | 1535 | 28.0 | Aguayo |
| 82 | -96.7747518 | 17.10175151 | 1587 | 80.0 | Sta. María Atzompa |
| 83 | -96.6667014 | 17.09993012 | 1695 | 41.5 | Huayapam |
| 84 | -96.7433245 | 17.02874609 | 1560 | 56.0 | Lomas De Monte Albán |
| 85 | -96.5744054 | 16.91044884 | 1689 | 31.0 | Magdalena Teitipac |
| 86 | -96.8217943 | 17.24034719 | 1669 | 34.0 | Magdalena Apasco |
| 87 | -96.3878798 | 16.86264915 | 1723 | 60.5 | Santiago Matatlán |
| 88 | -96.7281954 | 16.9056116 | 1519 | 71.0 | Reyes Mantecón |
| 89 | -96.4686784 | 16.89504098 | 1745 | 46.0 | San Lucas Quiavini |
| 90 | -96.3626463 | 16.92151937 | 1690 | 67.5 | Mitla |
| 91 | -96.7084468 | 17.01052373 | 1545 | 62.6 | San Agustín |
| 92 | -96.8609188 | 17.18588487 | 1648 | 50.0 | Zautla |
| 93 | -96.6339779 | 17.04242533 | 1561 | 27.2 | El Tule |
| 94 | -96.7899983 | 17.0594954 | 1665 | 23.9 | sondeo 8sep |
| 95 | -96.8245977 | 17.06844256 | 1631 | 38.0 | San Andrés Ixtlahuaca |
| 96 | -96.8013328 | 17.16437573 | 1600 | 52.9 | Mogote 3 |
| 98 | -96.8039829 | 17.20662888 | 1650 | 30.5 | Mormón Etna sev2 |
| 100 | -96.761635 | 17.145462 | 1607 | 48.0 | San pablo Etna |
| 102 | -96.8336342 | 17.19483537 | 1628 | 47.7 | Soledad Etna |

APÉNDICE C. Glosario de Términos

Aluvión: Material transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua, que puede ser repentina y provocar inundaciones. Principalmente compuesto por arenas, gravas, limos y arcillas.

Efectos de Sitio: Los efectos de sitio son modificaciones en amplitud, duración y contenido frecuencial que experimentan las ondas sísmicas cuando llegan a la superficie. Entre más blando sea el tipo de suelo que exista bajo la estación, mayor será la amplificación.

Estratigrafía: Es el estudio de las rocas que determina el orden y el momento de los eventos en un tiempo geológico determinado en la historia de la Tierra, permite estudiar e interpretar la formación de las rocas sedimentarias en función de los ambientes dinámicos. El registro estratigráfico de las rocas sedimentarias es una base de datos fundamental para entender la evolución de la vida, la tectónica de placas y el cambio climático global a través del tiempo.

Horizonte: Es la capa del suelo o roca más o menos paralela a la superficie con características específicas con respecto a las situadas encima y debajo: espesor, color, características químicas, biológicas y mineralógicas. El conjunto de horizontes constituye el perfil del suelo.

Litología: Parte de la geología que estudia las rocas, su formación, distribución y clasificación.