



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias Línea Terminal Construcción

ZONACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE SILAO DE LA VICTORIA GUANAJUATO

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Héctor Francisco Arenas Ávila

Dirigido por:

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

SINODALES

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Presidente

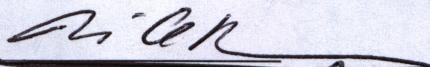
Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Secretario

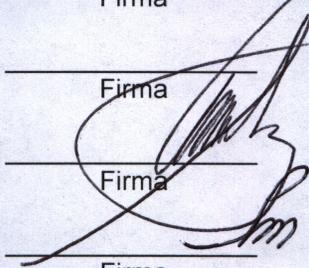
M en I Abraham Martínez Bani
Vocal

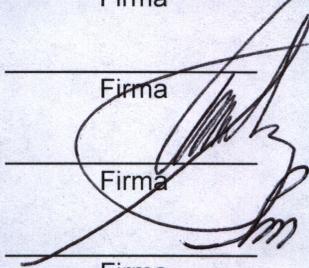
M en C José Luis Reyes Araiza
Suplente

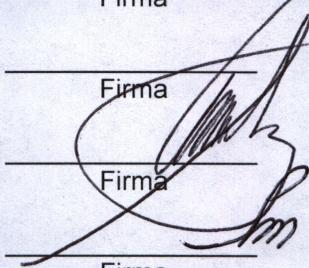
M en C Humberto Uehara Guerrero
Suplente

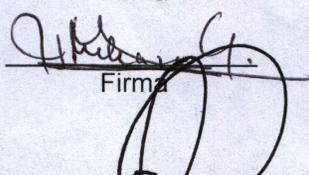
Dr. Gilberto Herrera Ruíz
Director de la Facultad de Ingeniería

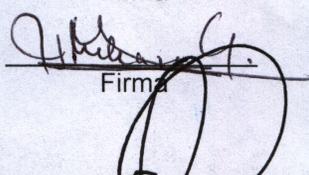

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Julio de 2008
México

1. INTRODUCCIÓN

1.1.- MOTIVACION

Esta inquietud nació para mí en el año de 1992 cuando me toco participar en el proceso de diseño de la planta GM Silao, ya que existe a la fecha, una gran incertidumbre al clasificar el terreno para fines de diseño sísmico, por ejemplo, para la fase inicial de la planta GM, los criterios generales de diseño vigentes en 1992 la clasificaban como un terreno Tipo III con un Coeficiente $C= 0.3$, finalmente se uso un coeficiente $C= 0.2$, en terreno tipo II, ya que significaba una diferencia en costo de la estructura de \$1,000,000.00 USD. Esta decisión se tomo fuera de reglamento vigente, ya que no existía a la fecha información confiable que permitiera otra clasificación. Hubo la necesidad de consultarlo con una autoridad en la materia como lo es el Dr. Luís Esteva Maraboto, para determinar el sitio como Tipo II, en base a su experiencia y conocimiento, ya que como lo expreso, no se contaba con alguna información local, aunque en el estricto sentido legal se diseño fuera del reglamento vigente y únicamente prevaleció el criterio de economía.

1.2.- ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

Dentro de este trabajo es necesario puntualizar que es solo el inicio, la punta del iceberg, ya que el método de vibración ambiental únicamente nos da una idea del comportamiento de la capa superior del terreno y para mediciones más precisas será necesario el uso de un acelerógrafo que registre un sismo de mediana intensidad en adelante para corroborar los datos aquí obtenidos.

Por lo que, es mucho mejor tener una propuesta local, que vernos obligados a elegir, el esquema Macro que propone Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo. 1993. CFE

. En este tiempo aun se tenía reciente el recuerdo del sismo del 85, que inducía a diseñar en extremo conservador con costos extremadamente altos en cualquier construcción.

Por esta razón, recientemente se ha dado impulso a la caracterización de sitios específicos, bajo el concepto de “Microregionalización Sísmica”. En base a las actividades de las líneas de investigación de la maestría en ciencias (Estructuras) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, ya se han elaborado cartas de regionalización sísmica local como temas de tesis abarcando León de los Aldama (MC J. Antonio Villegas Rodríguez), Irapuato (MC Raúl Gerardo Zavala Sánchez), Purísima del Rincón (MC Gabriel Valdez Chávez), que junto con esta tesis, con la inclusión de Salamanca y Celaya, y con una red instrumentada, que pueda realizar varias mediciones para verificar los trabajos anteriores, que permitan en su momento la elaboración de un espectro de diseño acorde a las condiciones locales del Bajío.

1.3.- LA APORTACION

Los puntos que se instrumentaron fueron: Planta General Motors, Parque industrial Fipasi, Parque industrial y de negocios Las Colinas, Aeropuerto del Bajío, Cerro del Cubilete y Zona urbana. El criterio para seleccionar los puntos de interés, fue de acuerdo a su crecimiento industrial y poblacional de los últimos años. Se realizaron mediciones de vibración ambiental a ambos lados de las fallas que afectan del suroeste a noreste a la zona urbana para predecir la trayectoria de estas.

En base al crecimiento industrial y poblacional en los últimos años por medio de la instrumentación de puntos específicos en la planta General Motors, Parque industrial FIPASI, parque industrial y de negocios Las Colinas, Aeropuerto del bajío, Cerro del Cubilete y zona urbana elaborar la carta de isoperíodos utilizando el método analítico unidimensional de la onda de cortante propuesto por el Dr. Leonardo Zeevaert. El presente trabajo se encuentra dividido de la siguiente manera:

En el capítulo I se presentan los antecedentes, objetivos y aportación de esta tesis así como una descripción general de este trabajo.

En el capítulo II se determina la zona de estudio, que comprende básicamente la zona urbana y los parques industriales de FIPASI, LAS COLINAS y el COMPLEJO SILAO DE GM, Aeropuerto del Bajío, Cerro del Cubilete y zona urbana.

Dentro del capítulo III se hace una breve descripción del comportamiento tectónico y sismicidad con el fin de que este sea un documento amigable y de fácil comprensión para los colegas no muy afines a cuestiones estructurales y sísmicas.

En el capítulo IV se hace una descripción del marco estratigráfico regional que nos permitirá comprender el tipo de terreno sobre el cual estamos e interpretar el tipo de comportamiento que pueda tener durante un evento sísmico perceptible.

En el capítulo V se hace una descripción de la metodología aplicada y de cómo, mediante un método relativamente sencillo y económico podemos evaluar rápidamente las características del suelo y puede prever de una manera sencilla y práctica su comportamiento durante un evento sísmico que pudiera presentarse así como la repercusión a las estructuras que llegaran a desplantarse sobre el, también se muestra un método semiempírico de comprobación de los resultados obtenidos, con el cual poder evaluar y en su caso calibrar el resultado de las mediciones obtenidas por el método de vibración ambiental para la obtención del mapa de isoperíodos de la zona en cuestión y se presenta en un plano las curvas de isoperíodos de la zona en estudio sobreponiéndose la geología del lugar con el fin de corroborar de otra manera los resultados numéricos de los valores de las curvas, ya que a mayor dureza del terreno tendremos periodos más cortos y viceversa.

Por último en las Conclusiones Y Recomendaciones se presenta la carta de zonificación sísmica en la cual se concluye que solamente existen dos tipos de terreno para la zona de estudio que son, terreno duro y terreno de transición,

denominados así de acuerdo a los reglamentos vigentes aunque cabe mencionar que la tendencia es ahora a mostrar mapas de isoperíodos, en vez de mapas de dureza del terreno.

1.4.- OBJETIVOS

Objetivo principal: proporcionar a los ingenieros estructuristas una herramienta que le permita evaluar el comportamiento del suelo ante un evento sísmico, en el municipio de Silao ante un evento sísmico.

Objetivo secundario: se pretende en conjunto con los maestros en ciencias, Gabriel Valdez Chávez, (Purísima del Rincón), J. Antonio Villegas Rodríguez (León de los Aldama) y Raúl Gerardo Zavala Sánchez (Irapuato), motivar a otros compañeros de la especialidad a continuar con el monumental trabajo de obtener información de zonas sin registrar, que no fue posible obtener por falta de recursos y tiempo, a fin de tener una herramienta confiable que nos permita diseñar estructuras resistentes a sismos en forma económica y estructuralmente optimas. También se pretende integrar una zonificación sísmica municipal, en base a una carta de isoperíodos al Reglamento de Construcción del municipio de Silao de la Victoria, como un inicio al objetivo global antes mencionado.

2.- ZONA DE ESTUDIO

2.1.- Aspectos Generales

La ciudad de Silao de la Victoria está situada geográficamente en 101° 25' 30" de Longitud al Oeste del Meridiano de Greenwich y 20° 56' 30" de Latitud Norte, a una altura media de 1780 metros sobre el nivel del mar. Silao de la Victoria es uno de los 46 municipios que integran el estado de Guanajuato.

Se cree que su nombre proviene del vocablo tarasco *Tzinacua*, que significa *lugar de humaredas*, posiblemente por el vapor que desprenden sus famosos manantiales de aguas termales. Todo hace suponer que el nombre se modificó por el de Sinacua, luego Silahua, hasta que en julio de 1861 adquiere la denominación actual de Silao.

En 1537 las autoridades del nuevo reino decidieron fundar el poblado de Silao con familias provenientes de las culturas mexicas, tarascas y chichimecas. Su acelerado desarrollo en las dos últimas décadas ha traído como consecuencia un gran crecimiento de su mancha urbana, a donde migra población procedente de otros municipios y de Estados vecinos. El progreso que muestra la ciudad y en general el municipio de Silao está fomentado por el asentamiento de empresas industriales sobresalientes en el ámbito nacional y por la estrecha relación funcional con la capital del estado; también se ha visto favorecido por su ubicación geográfica y la facilidad de comunicación que tiene a través de las carreteras federales que la conectan con la capital del estado y otras ciudades importantes como son León, Irapuato y San Luis Potosí.

Extensión Territorial.

La superficie del territorio es de 537,40 kilómetros cuadrados, equivalentes al 1.76% del total estatal. Al Norte y al Este limita con el Municipio de Guanajuato; al Sur con el de Irapuato; al Sureste con el de Romita y al Oeste con el de León.

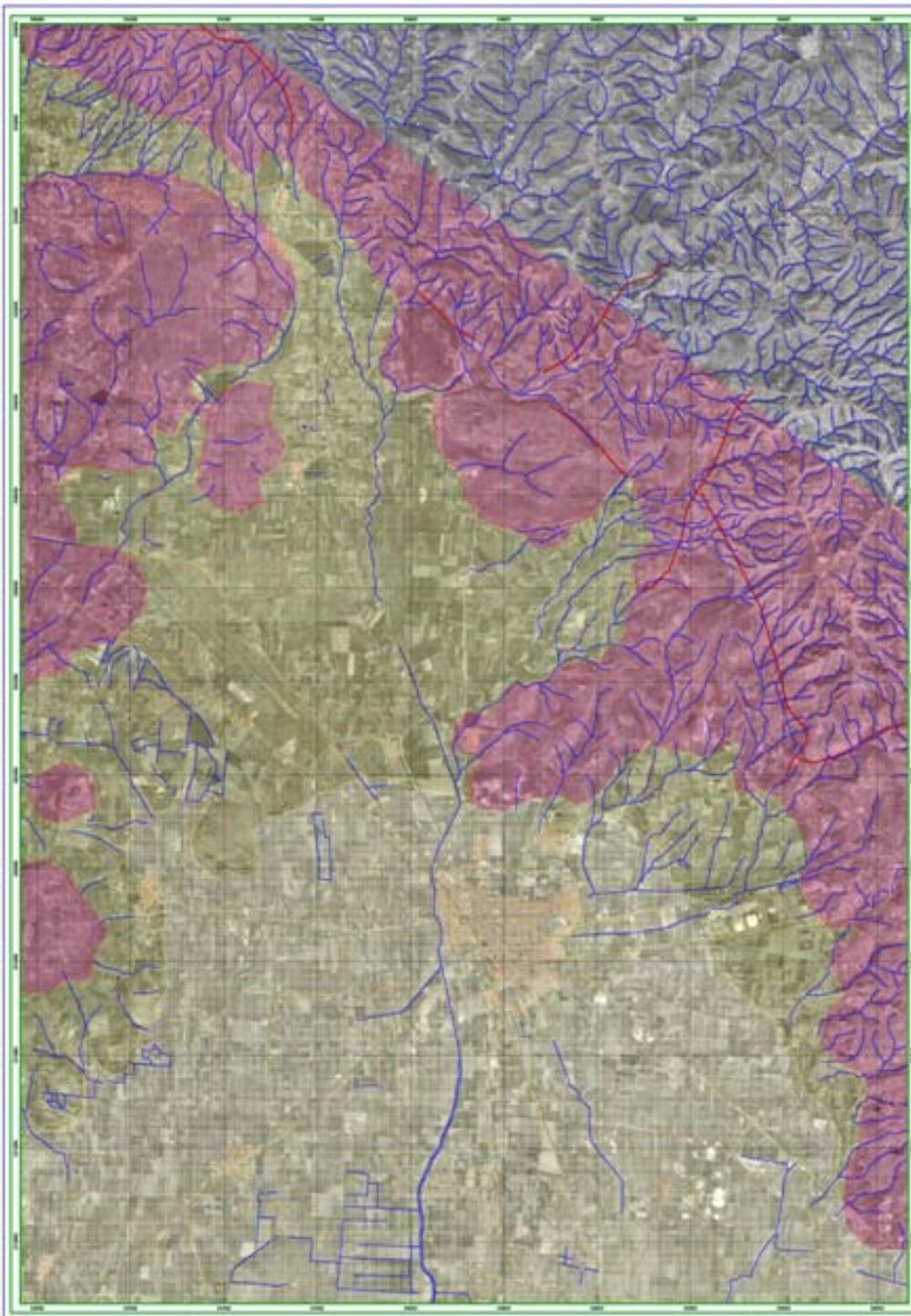


Fig. 2.1 Municipio de Silao de la Victoria

Se presenta en la figura 2.1 un aspecto general del panorama de la región en estudio, con aspectos generales del relieve y mancha urbana de la zona de estudio.

Esta región se encuentra dentro de la zona "B" de acuerdo al manual de diseño por sismo de la CFE y como se observa se encuentra localizada a las faldas del cerro del Cubilete que pertenece a la sierra de Guanajuato y la gran planicie de la mesa central.

En la figura 2.1 se muestra parcialmente algunos de los lugares de interés de esta tesis, presentándose un mapa detallado en los apéndices.

3. COMPORTAMIENTO TECTONICO Y SISMICIDAD

3.1 Tectónica de Placas

Existe una estrecha relación entre las capas que conforman la Tierra y la generación de sismos, por lo que hablar de tectónica implica abordar el tema desde una perspectiva global, es por esto que es necesario hacer una breve síntesis para entender la razón por la cual los sismos se generan y como se comportan las ondas de este al propagarse sobre los mantos subsecuentes

La corteza terrestre es la capa más superficial de la Tierra, que es parte de la litosfera (parte de la tierra superior al manto interno que incluye la corteza sólida y el manto externo con un espesor de 100 km. La litosfera es la zona de las placas tectónicas), que tiene un espesor variable entre los cinco kilómetros de profundidad en los océanos y hasta 40 kilómetros de profundidad media en las cordilleras continentales. La corteza terrestre está compuesta por rocas silíceas, distinguiéndose tres capas principales (figura 3.1):



Fig. 3.1

Capas principales de la corteza terrestre

Capa sedimentaria: Está formada por rocas sedimentarias que se sitúan sobre los continentes y sobre las plataformas continentales. Esta capa está formada por rocas replegadas que forman parte de las cordilleras actuales y antiguas de los continentes y de la base de la plataforma continental, y por sedimentos recientes que se depositan fundamentalmente sobre la plataforma continental y los fondos marinos próximos al continente.

Capa granítica: Está formada por rocas parecidas al granito. Forma la masa fundamental de las zonas continentales emergidas. Entre esta capa y la siguiente se aprecia la discontinuidad de Conrad, llamada también "canal de la litosfera", que marca los límites de la capa granítica y la capa inferior basáltica. Tanto la capa sedimentaria como la granítica son capas discontinuas y se encuentran como flotando en equilibrio isostático sobre la capa basáltica, como lo hace un iceberg sobre el agua.

Capa basáltica: Está formada por rocas semejantes al basalto. Es una capa continua alrededor de la Tierra, al contrario que las dos anteriores. La discontinuidad de Mohorovicic separa la capa basáltica del manto.

La corteza terrestre es una gran desconocida por las dificultades que presenta su estudio. Sin embargo, los datos que facilitan los estudios sismológicos han contribuido de forma importante al conocimiento de la estructura interna de la Tierra. A través del análisis de la propagación de las ondas sísmicas se construyen perfiles que proporcionan la geometría de las estructuras tectónicas. Esta cubierta rígida del planeta es de particular importancia para los fines de actividad sísmica provocada por las corrientes de convección del manto que al dilatarse los materiales que lo forman, por las altas temperaturas que existen, provocan movimientos de ascenso y descenso.

Durante miles de millones de años se ha ido sucediendo un lento pero continuo desplazamiento de las placas que forman la corteza del planeta Tierra, originando la llamada "tectónica de placas", una teoría que complementa y explica la deriva continental (propuesta en 1912 por Alfred Wegener).

Los continentes se unen entre sí o se fragmentan, los océanos se abren, se levantan montañas, se modifica el clima, influyendo todo esto, de forma muy importante en la evolución y desarrollo de los seres vivos. Se crea nueva corteza en los fondos marinos, se destruye corteza en las trincheras oceánicas y se producen colisiones entre continentes que modifican el relieve.

Según la teoría de la tectónica de placas, la corteza terrestre está compuesta al menos por una docena de placas rígidas que se mueven aleatoriamente. Estos bloques descansan sobre una capa de roca caliente y flexible, llamada astenosfera, que fluye lentamente a modo de alquitrán caliente. Los geólogos todavía no han determinado con exactitud cómo interactúan estas dos capas, pero las teorías más vanguardistas afirman que el movimiento del material espeso y fundido de la astenosfera fuerza a las placas superiores a moverse, hundirse o levantarse.

El concepto básico de la teoría de la tectónica de placas es simple: el aire caliente asciende por encima del aire frío y las corrientes de agua caliente flotan por encima de las de agua fría. El mismo principio se aplica a las rocas calientes que están bajo la superficie terrestre: el material fundido de la astenosfera, o magma, sube, mientras que la materia fría y endurecida se hunde cada vez más hacia el fondo, dentro del manto. La roca que se hunde finalmente alcanza las elevadas temperaturas de la astenosfera inferior, se calienta y comienza a ascender otra vez.

Este movimiento continuo, en cierta forma circular, se denomina convección. En los bordes de la placa divergente y en las zonas calientes de la litosfera sólida, el material fundido fluye hacia la superficie, formando una nueva corteza.

El límite de las placas no coincide con los límites de los continentes una placa puede contener porciones de continentes y porciones de océanos, los límites entre placas pueden ser de tres tipos: divergentes, convergentes o de subducción y de transformación el primero de estos sucede cuando dos placas se están separando, mientras que el segundo es cuando una placa se introduce debajo de otra y la última de estas sucede cuando dos placas se mueven lateralmente entre sí.

Es así que entre estos límites de placas se generan fuerzas de fricción tan fuertes que llegan a sobrepasar la resistencia de la roca provocando que esta se rompa liberando gran cantidad de energía que se propaga en forma de ondas a través del medio sólido de la tierra en todas direcciones conocidas como ondas sísmicas.

Se ha determinado la existencia de diecisiete placas principales (figura 3.2) estimándose que más del noventa por ciento de toda la actividad sísmica en el mundo está relacionada con el movimiento de estas.

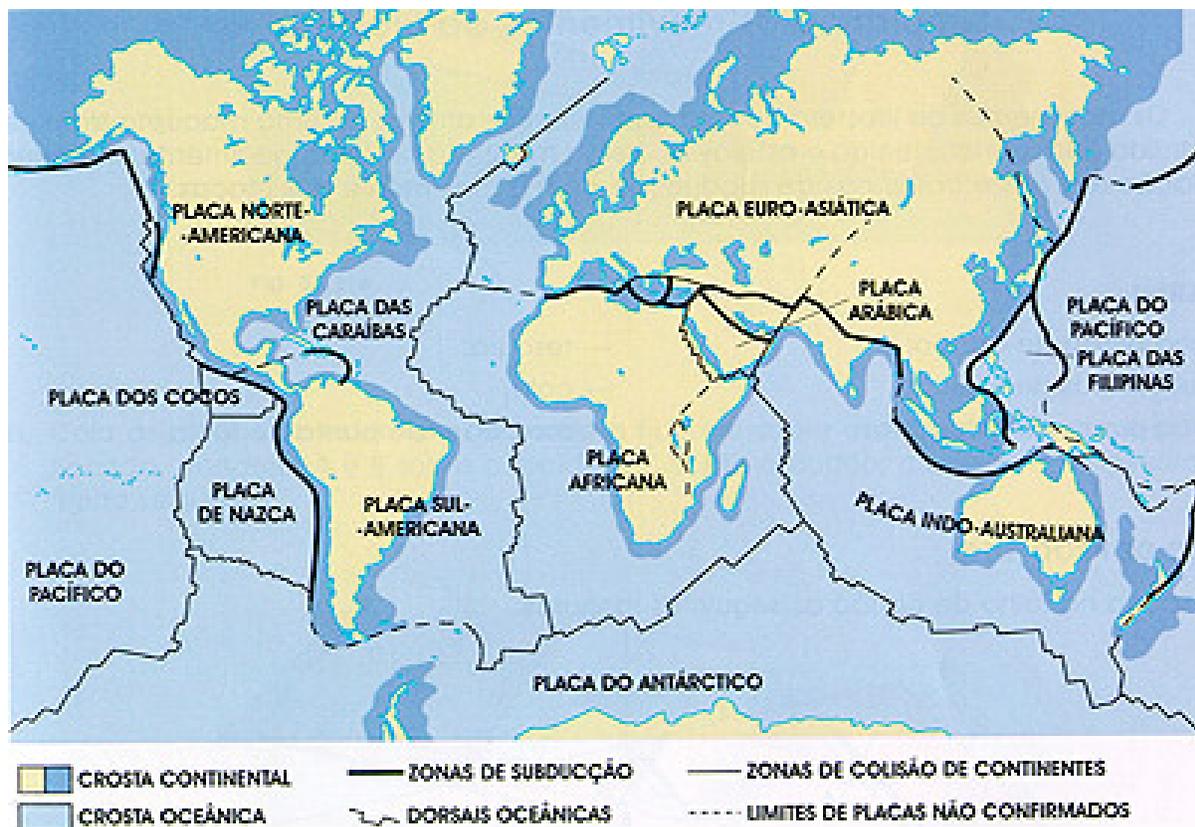


Figura 3.2 Principales placas litosféricas

3.2 Sismicidad global y ondas sísmicas

Los sismos de tipo tectónico son producidos por la interacción de las placas, por un lado existen los interplaca ocasionados por una fricción en las zonas de contacto entre ellas y por otro lado los interplaca que se presentan lejos de los límites conocidos de placas estos sismos resultan de la deformación continental por el choque entre placas y son menos frecuentes que los interplaca y generalmente de menor magnitud, un tipo particular de estos son los llamados sismos locales.

En lo que refiere a lo que los efectos de un sismo provocan en la corteza de la tierra están las ondas sísmicas las cuales se propagan como ya se menciono antes en todas direcciones a partir del foco donde se origina la fractura, con una velocidad alterada que depende de las propiedades físicas de los estratos geológicos por los que esta atraviesa. Las ondas sísmicas se clasifican en los siguientes tipos:

En un sólido pueden transmitirse dos tipos de ondas, la primera conocida como ondas de compresión ya que consiste como su nombre lo indica en la transmisión de compresiones y rarefacciones en este caso las partículas del medio se mueven en el mismo sentido en el que se propaga la onda, el segundo tipo es conocido como ondas transversales o de cizallamiento, las partículas se mueven ahora en dirección perpendicular a la propagación de la onda, las ondas compresionales y transversales (figura 3.3) han sido llamadas P y S respectivamente por razones que se verán más adelante. Son también conocidas como ondas internas porque se propagan en el interior de un sólido elástico.

Además de estas dos clases de ondas existen otros dos tipos de gran importancia llamadas ondas superficiales por los motivos que veremos a continuación: cuando un sólido posee una superficie libre, como la superficie de la tierra, pueden generarse ondas que viajan a lo largo de la superficie.

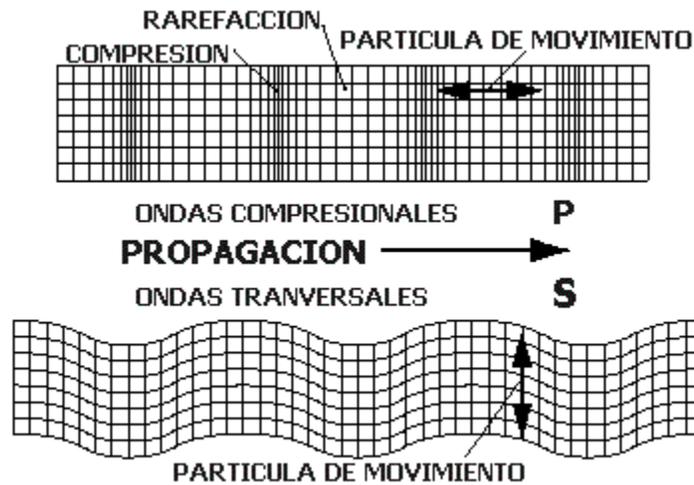


Figura 3.3 Propagación de ondas P y S en un bloque solido

Estas ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad, y son conocidas como ondas de Rayleigh en honor al científico que predijo su existencia. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrógrada y ocurre en el plano de propagación de la onda (figura 3.4) Una analogía de estas ondas lo constituyen las ondas que se producen en la superficie de un cuerpo de agua.

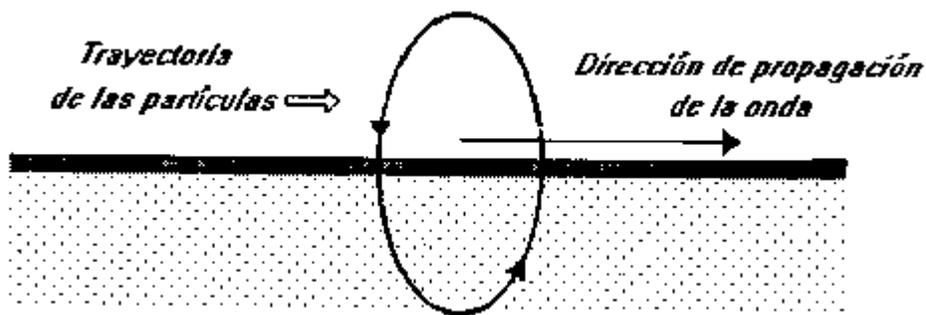


Figura 3.4 propagación de las ondas Rayleigh

Otro tipo de ondas superficiales son ondas de Love llamadas así en honor del científico que las estudió. Estas se generan solo cuando el medio elástico se

encuentra estratificado, situación que se cumple en nuestro planeta pues como observamos anteriormente se encuentra formado por capas de diferentes características físicas y químicas.

Las ondas de Love se propagan con un movimiento de las partículas, perpendicular a la dirección de propagación, como las ondas S, sólo que polarizadas en el plano de la superficie de la Tierra, es decir solo poseen la componente horizontal a la superficie.

Las ondas de Love pueden considerarse como ondas S "atrapadas" en el medio superior (figura 3.5). Para las ondas de Love, la amplitud de las mismas decrece rápidamente con la profundidad. Las ondas de Love son observadas sistemáticamente sobre la superficie de la tierra pues nuestro planeta posee un estrato superficial de baja velocidad (la corteza, y sobre un medio mas profundo, el manto.)

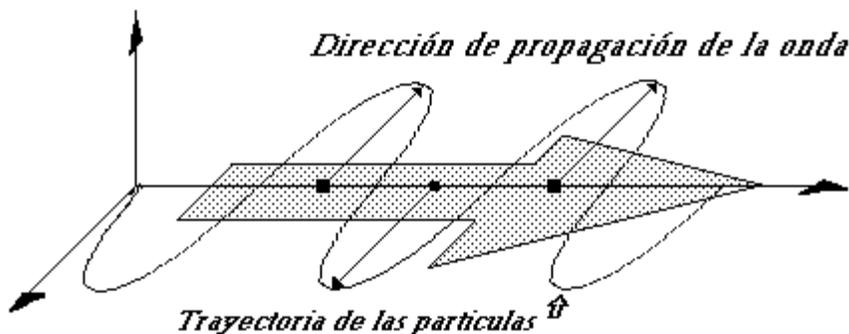


Figura 3.5 esquema de propagación de las ondas Love

Las velocidades de las diferentes ondas dependen de las características del medio; por ejemplo, en rocas ígneas la velocidad de las ondas P es del orden de 6 Km/seg, mientras que en rocas poco consolidadas es de aproximadamente 2 Km/seg ó menor. Así, las ondas P de un terremoto originado en la costa de Acapulco serían percibidas en la Ciudad de México, en alrededor de 1 minuto

3.3 Sismicidad en México

Dentro del contexto mundial México ha participado de manera importante en la aportación de información sísmica a dicha comunidad, ya que es miembro de la Asociación Internacional Sismológica, desde su fundación en el año de 1904, contando para esto con el Servicio Sismológico Nacional, fundado en Septiembre de 1910.

México está ubicado en la región norte del continente americano. Geográficamente se localiza entre las coordenadas $14^{\circ} 32' 27''$ y $32^{\circ} 43' 06''$ latitud norte, y entre los $86^{\circ} 42' 36''$ y $118^{\circ} 27' 24''$ longitud oeste. Para el caso de la República Mexicana, la actividad sísmica se produce principalmente por la interacción de las placas tectónicas de Cocos, de Rivera, de Norteamérica y del Pacífico (Figura 3.6).

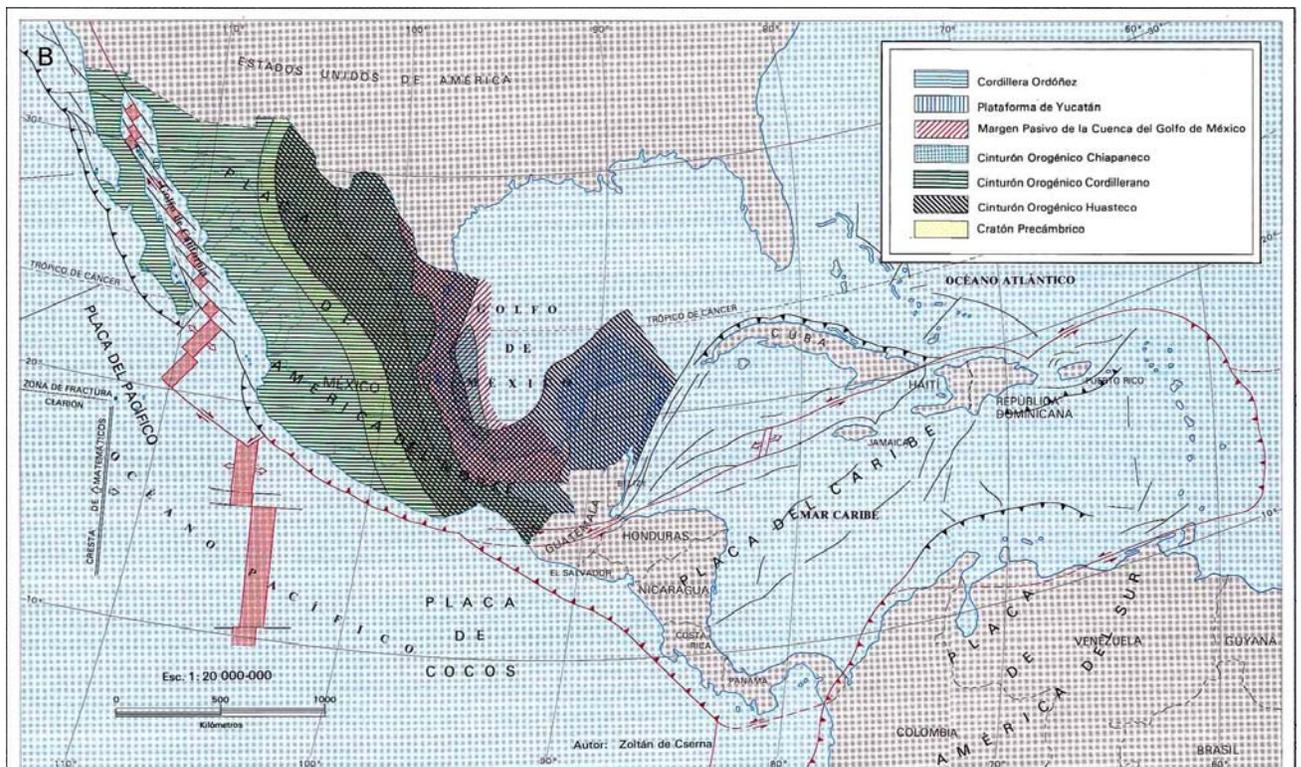


Figura 3.6. Tectónica de la República Mexicana.

La interacción de las placas de Norteamérica y la del Pacífico dan origen a la actividad sísmica que se manifiesta en la parte norte de la Península de Baja California, mientras que la subducción de la Placa de Cocos y Rivera bajo la placa

de Norteamérica, que va desde el estado de Jalisco hasta el estado de Chiapas, provoca la gran actividad sísmica en el sureste de México y origina la mayor cantidad de temblores de gran magnitud ($M_s > 7$).

Se ha observado que la placa de Cocos manifiesta una velocidad de desplazamiento que va de cinco a ocho centímetros por año a lo largo de la costa del Pacífico, siendo menor el desplazamiento hacia los estados de Colima y Jalisco y mayor hacia los estados de Oaxaca y Chiapas.

A partir de registros acelerográficos, se han identificado zonas de contacto entre placas, donde se originan sismos que se manifiestan después de un cierto periodo de tiempo. En este periodo de tiempo se vuelve a acumular energía que puede ser liberada a través de uno o más sismos importantes. Estos registros dan pauta a clasificar zonas de mayor o menor riesgo sísmico y permiten estimar su magnitud en función de la zona por “romper”. Estas zonas reciben el nombre de “brechas sísmicas”.

En la Figura 3.7 se pueden observar eventos importantes ocurridos en los últimos años así como las áreas estimadas de rompimiento entre una y otra placa tectónica. Estas áreas son determinadas por la distribución de los focos de las réplicas que se producen después de ocurrido un sismo fuerte. En la misma figura se puede observar la amplia zona de rompimiento que dio origen a los sismos del 19 y 20 de Septiembre de 1985, llamada “Brecha de Michoacán”, la cual había permanecido inactiva por más de setenta años.

La distancia en línea recta de la fuente de este sismo a la zona de estudio es de aproximadamente 323 kilómetros, sin que haya ocasionado algún daño físico importante, por otro lado fue percibido de manera notable en las edificaciones como en la mayoría de los habitantes.

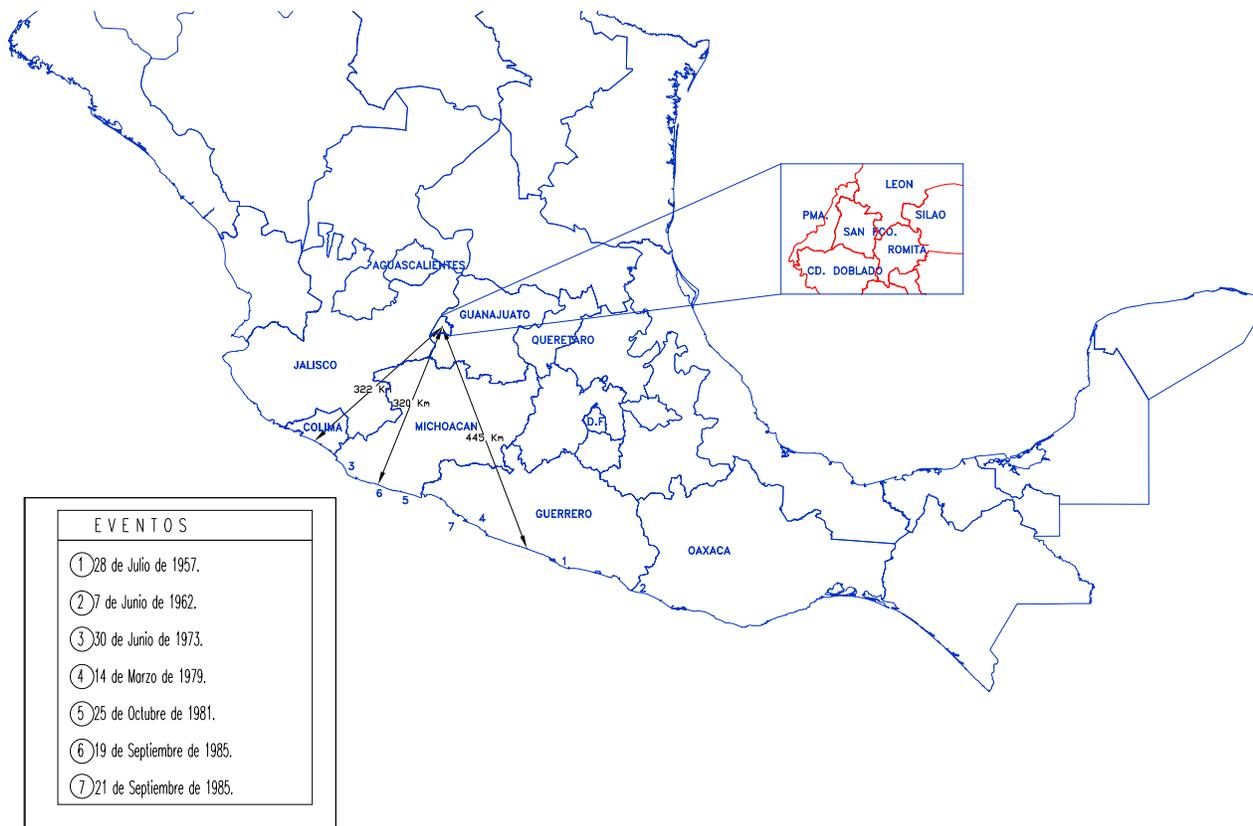


Figura 3.7 Eventos de gran magnitud en las costas de Michoacán y Guerrero.

Existe una área bastante extensa en la costa del estado de Guerrero que se considera actualmente tiene la probabilidad más alta de provocar algún sismo de gran magnitud, pues no ha tenido actividad desde hace más de treinta años. A esta zona se le denomina “Brecha de Guerrero” y guarda una distancia media aproximada en línea recta de 445 kilómetros a la zona de estudio.

Por la importancia que reviste esta Brecha y ante la coincidencia de varios investigadores de que puede ser la fuente más probable a corto plazo de generar uno o más sismos de gran magnitud, se han realizado estudios detallados de la misma, identificando zonas con mayor o menor probabilidad de ocurrencia de

eventos sísmicos. Esta es la razón por la que actualmente la “Brecha de Guerrero” es la zona del país más instrumentada, lo que ha permitido entre otras cosas la implementación del sistema de “Alerta Sísmica” para la ciudad de México.

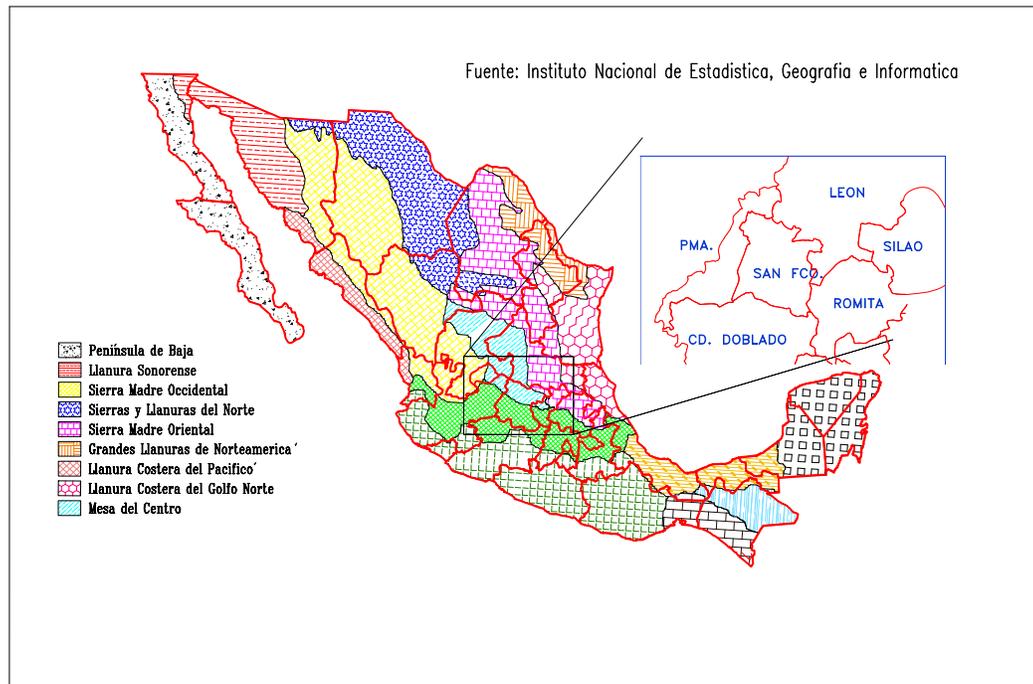


Figura 3.8 Provincias fisiográficas de la República Mexicana

Dadas las características fisiográficas, estructurales, litológicas, hidrológicas y geológicas de la zona en estudio, se pueden conocer y comprender los fenómenos físicos asociados a una región determinada. De acuerdo a INEGI, la República Mexicana está dividida en 15 provincias fisiográficas, como se muestra en la Figura 3.8. las características fisiográficas de la región en estudio se verán en más detalle en el siguiente capítulo.

4. MARCO ESTRATIGRÁFICO, ESTRUCTURAL Y SISMOTECTÓNICO DE LA PARTE NOROCCIDENTAL DEL BAJÍO

4.1 Interpretación del Subsuelo Bajío

El Bajío es un rasgo característico de la fisiografía de la parte central de México. Se traduce como una extensa planicie cuya altitud se ubica entre los 1,700 y 1,750 metros sobre el nivel del mar. Representa el límite entre las provincias de la Mesa Central y de la Faja Volcánica Transmexicana.

El Bajío es una de las regiones más representativas del territorio guanajuatense. Las ciudades más importantes del estado se localizan sobre esta gran planicie. Irapuato, Silao, León, San Francisco del Rincón-Purísima del Rincón (o Purísima de Bustos) ocupan su parte más noroccidental (Figura 3.1).



Figura 4.1. Imagen radar del Bajío guanajuatense.

4.2 Geología de la Sierra de Guanajuato

La Sierra de Guanajuato es un rasgo orográfico que se extiende a lo largo de más de 80 kilómetros sobre la terminación meridional de la Mesa Central,

desde las inmediaciones de Lagos de Moreno, Jal. al NW, hasta los alrededores de la ciudad de Guanajuato, Gto. al SE; sus límites naturales son: la depresión de Lagos de Moreno al NW, la planicie del Bajío guanajuatense al SW y el graben de la Saucedá al SE. Hacia el NE su límite es difícil de precisar por la presencia de otros elementos orográficos.

La Sierra de Guanajuato es una entidad geológica donde convergen terrenos de diversos tipos y diferentes edades. Encierra mineralizaciones importantes, como en el Distrito Minero de Guanajuato, que antaño dieron fama al país más allá de sus fronteras.

La Sierra de Guanajuato está constituida por rocas que pueden agruparse en dos conjuntos litoestratigráficos claramente definidos: uno inferior, de origen marino y edad mesozoica, que representa su basamento; otro superior, de origen continental y de edad cenozoica, que representa su cubierta. Entre ambos, separándolos en el tiempo, aparece un cuerpo granítico de edad paleógena (Figura 4.2).

El Basamento. Las formaciones que representan el basamento constituyen el almacén estructural de la Sierra son ellas las que la caracterizan estratigráficamente, y pertenecen a dos secuencias de rocas distintas: una de origen magmático; otra de origen volcanosedimentario. Ambas son de edad mesozoica (Jurásico superior-Cretácico inferior, respectivamente) y representan ambientes geológicos diferentes.

La secuencia magmática está representada por cuerpos alóctonos de rocas ultramáficas (Piroxenita San Juan de Otates), tonalitas (Tonalita Cerro Pelón) y por una formación compuesta de material diorítico y tonalítico que encajona enjambres de filones (diques) de composición diabásica (Complejo Filoniano Santa Ana). Esta secuencia representa los productos magmáticos de un arco insular oceánico de origen pacífico, de edad Jurásico superior-Cretácico inferior (Arco Mágmatco de Guanajuato), acrecionado al continente norteamericano en el Cretácico medio.

La secuencia volcanosedimentaria por su parte, que constituye el autóctono, está representada por una formación (Formación Arperos) que incluye derrames submarinos de lavas de composición basáltico-andesítica en estructuras almohadilladas (pillow lavas), y sedimentos marinos diversos como calizas, calizas arcillosas, areniscas, lutitas y otros materiales clásticos y piroclásticos. La Formación Arperos ha sido interpretada como los sedimentos de una cuenca intraoceánica de edad Cretácico inferior (Cuenca de Arperos), de origen pacífico, acrecionada también durante el Cretácico medio al continente norteamericano.

Las formaciones del basamento han sido sometidas a esfuerzos tectónicos compresivos en diversas épocas geológicas. Como ha sido mencionado, han sido acrecionadas al continente norteamericano en el Cretácico medio (orogenia Oregoniana). Al final del Cretácico sufrieron los efectos de la orogenia Laramide. Esos fenómenos orogénicos produjeron en ellas una intensa deformación (plegamientos y cizallamientos). Les imprimieron también un ligero metamorfismo regional de bajo grado (esquistos verdes) que conjuntamente con algunos fenómenos de alteración (seppentinización por ejemplo), les impusieron una coloración verdosa muy penetrativa (rocas verdes).

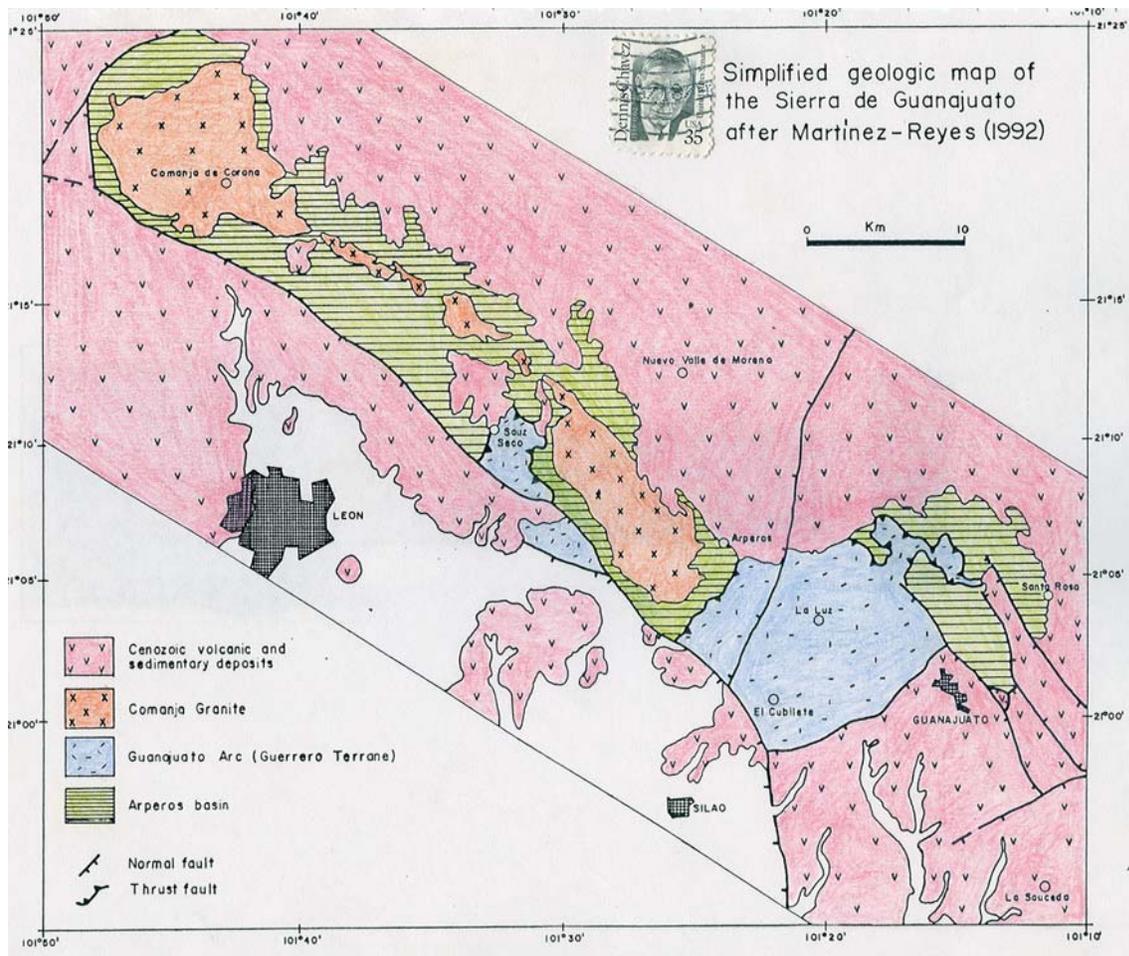


Figura 4.2. Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato

El Granito. El cuerpo granítico es un intrusivo de grandes dimensiones (dimensiones batolíticas) que afecta al basamento, pero no a la cubierta. Aflora a favor de la orientación estructural de la Sierra (NW-SE) a lo largo de unos 50 kilómetros. Su composición petrográfica es poco variable (cuarzo + plagioclasa + micas + otros ferromagnesianos) y no muestra metamorfismo regional ni deformación importante. Desarrolla sin embargo una importante aureola de metamorfismo de contacto (metamorfismo térmico). La edad absoluta que le ha sido calculada por métodos isotópicos está entre 55 y 49 Ma (millones de años), la que corresponde al Paleógeno temprano (Eoceno).

La Cubierta. Diversas formaciones representan la cubierta cenozoica de la Sierra de Guanajuato. Algunas son de alcance muy local y otras de alcance más regional. Todas son de naturaleza volcánica y clástica y de origen continental. Excluyendo el área del Distrito Minero de Guanajuato donde se ha establecido localmente una estratigrafía muy detallada, las formaciones cenozoicas de la Sierra se pueden agrupar en una sucesión litoestratigráfica que incluye, desde la más inferior (antigua) a la más superior (joven), las siguientes unidades:

Conglomerados. Esta unidad forma la base de la secuencia terciaria, directamente sobre las formaciones mesozoicas del basamento. Se distribuye preferencialmente sobre el flanco de la Sierra que mira al Bajío. Es un conglomerado compuesto de clastos (fragmentos) poco redondeados de diversas tallas provenientes de las rocas del basamento. Es de color rojo, compacto, fuertemente cementado por carbonatos y óxidos Ferrosos. En la literatura geológica se le conoce como Conglomerado Rojo de Guanajuato definido en el Distrito Minero de Guanajuato.

Andesitas. Estas rocas aparecen en afloramientos pequeños, muy aislados: en Bernalejo, al norponiente de la Sierra y en el arroyo El Gigante, al N del cerro El Cubilete. Descansan directamente sobre el granito o sobre las formaciones del basamento. Se trata de lavas de textura porfídica, con abundantes cristales de plagioclasa, augita y hornablenda. Se pueden correlacionar con la Andesita El Cedro del Distrito Minero de Guanajuato de edad oligocénica (30 Ma).

Riolitas. Estas rocas afloran especialmente hacia la mitad suroriental de la Sierra. Son lavas en estructuras fluidales que forman campos de domos, como en la Sierra El Ocote al ENE de Nuevo Valle de Moreno. En el Distrito Minero de Guanajuato se les ha definido como Riolita Chichíndaro, también del Oligoceno.

Tobas e Ignimbritas. Son rocas ampliamente distribuidas en la región. En la Sierra de Guanajuato aparecen mayormente sobre su mitad noroccidental. Se trata de espesos y extensos derrames subhorizontales de lavas y productos

piroclásticos, de composición riolítica, atribuidos al paroxismo volcánico oligocénico que dio origen a la Sierra Madre Occidental.

Gabro. En el entorno de la comunidad de Arperos, hacia el centro-suroriente de la Sierra, aflora un cuerpo hipabisal de composición gabroica (labradorita + piroxenos + olivino + otros ferromagnesianos). Su edad absoluta no ha sido conocida, pero es posterior a las tobas e ignimbritas de la unidad anterior, a las que intrusióna.

Gravas y arenas. Sobre las estribaciones sudorientales del flanco surponiente de la Sierra, aflora una formación clástica, poco consolidada, constituida por gravas, arenas y limos areno-arcillosos. Vestigios de estos mismos materiales aparecen en otros puntos de la Sierra, debajo de los derrames basáltico-andesíticos que forman la cúspide de los cerros El Cubilete y Los Gigantes, y la mesa Moreno, entre otros. Por su posición estratigráfica se les atribuye una edad miocénica tardía.

Basaltos. Aparecen en dos formaciones. Al norponiente de la ciudad de León aflora una serie de derrames de lava y materiales piroclásticos (tezontle) de composición basáltica, que en su conjunto estructuran el cerro Las Dos Aguas. Este cerro corresponde a una estructura volcánica de edad aún no definida.

Por otra parte, en diversos puntos de la Sierra afloran rocas volcánicas también de composición basáltica. Son derrames de lavas de origen fisural que forman numerosas y pequeñas mesas, como las de Moreno y Santiago, así como las cimas de los cerros La Giganta y El Cubilete. El análisis isotópico de las lavas del cerro El Cubilete le asignan a esos basaltos una edad una edad del Mioceno (12 Ma).

Contrariamente a las formaciones mesozoicas plegadas y cizalladas del basamento, las formaciones que representa la cubierta de la Sierra de Guanajuato no ha sufrido más deformación tectónica que un intenso fallamiento. Este fallamiento es el responsable, entre otros, de la emersión de la Sierra a través de

un sistema de fallas de orientación NW-SE conocido como Sistema de Fallas del Bajío y, consecuentemente, de la individualización del Bajío como fosa o depresión tectónica.

Además de las fallas de orientación NW-SE como las fallas del sistema del Bajío, en la región también está presente otro sistema de fallas casi ortogonal al anterior, de orientación NE-SW.

4.3.- Geología de la región Silao-León-Purísima del Rincón

Entre León y Purísima del Rincón el límite noroccidental de El Bajío está bien delineado. Corresponde a una falla de orientación NE-SW que de manera súbita levanta una orografía de más de 200 metros por encima del nivel de la planicie.

La estratigrafía de este bloque emergido está representada por formaciones volcánicas y piroclásticas de composición riolítica (tobas e ignimbritas), materiales clásticos (conglomerados) y lavas y diversos productos volcánicos de composición basáltica.

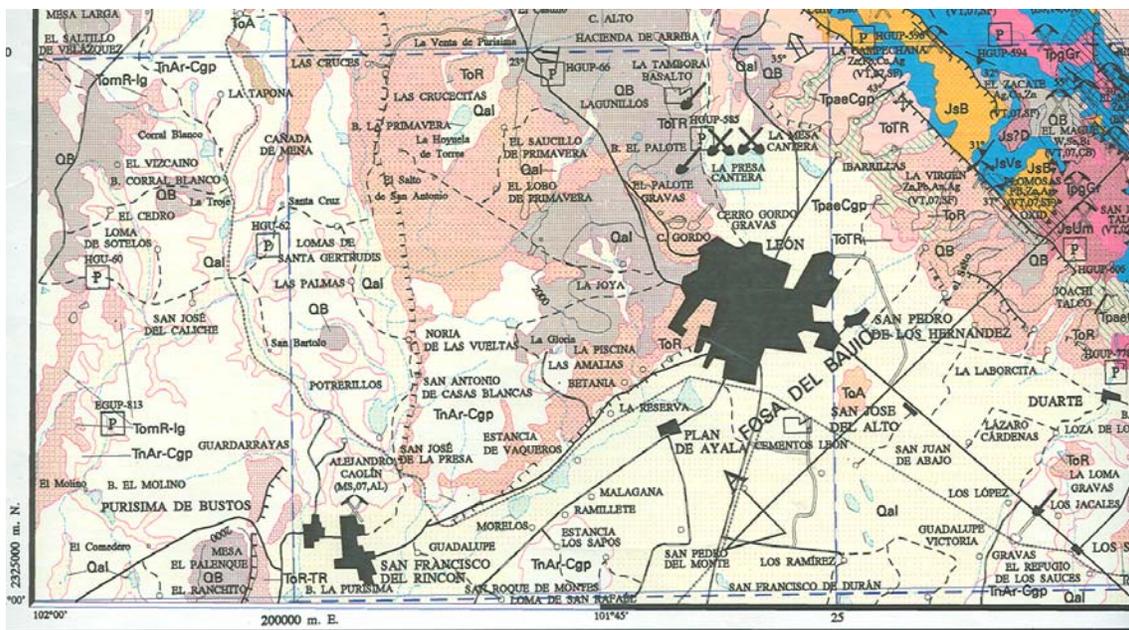


Figura 4.3. Mapa geológico de la región Silao-León-Purísima del Rincón (Extracto de la Carta Geológico-Minera Guanajuato F14-7, escala 1:250 000. CRM, 1997)

Las formaciones riolíticas son las mismas tobas e ignimbritas oligocénicas que están presentes en la Sierra de Guanajuato. Pertenecen al cortejo volcánico de la Sierra Madre Occidental y están ampliamente distribuidas en la región.

Encima de las formaciones riolíticas cuya morfología es aproximadamente plana se depositan, hacia la región de Purísima del Rincón, una unidad conglomerática de probable edad Mioceno-Plioceno. Hacia la región de la ciudad de León, encima de las tobas e ignimbritas aparecen lavas de composición basáltica que forman los puntos culminantes del área. Estas rocas son el producto de la actividad de los volcanes representados por el cerro Las Dos Aguas al NW de León, y por lo que parece ser una pequeña caldera volcánica al W de esa misma ciudad, materializada por la depresión de la Joya. Al poniente de la ciudad de Purísima del Rincón, un grueso derrame de basaltos también está presente (mesa El Palenque).

Este volcanismo basáltico representa la última manifestación magmática de la región. Su edad no ha sido determinada por métodos isotópicos, pero por su posición estratigráfica se puede considerar del Mioceno tardío en el caso de los volcanes cercanos a la ciudad de León (12-6 Ma), y del Plioceno (menos de 5 MA) en el caso de los derrames del área de la ciudad de Purísima del Rincón.

Las estructuras tectónicas también están presentes en esta región. Además de la falla de orientación NE-SW que la limita de la planicie del Bajío, hay una falla importante de orientación claramente N-S que origina un *graben* (depresión o fosa tectónica) donde se depositan los conglomerados. Por esta razón esta falla debe considerarse anterior a los conglomerados y a los basaltos, pues no los afecta.

4.4.- Estratigrafía y estructura del subsuelo de la parte noroccidental del Bajío

Geológicamente El Bajío es una fosa tectónica rellena de materiales sedimentarios clásticos, volcánicos y volcaniclásticos que se han venido acumulando en las épocas geológicas más recientes. Esos materiales cubren un substratum irregular constituido por diversas formaciones, tales como las formaciones mesozoicas y cenozoicas que afloran en el entorno.

Los procesos tectónicos continuos a que ha estado sometida la corteza terrestre en esta parte del país durante el Cenozoico, especialmente durante el Neógeno y el Cuaternario, han desarrollado en la región un estilo estructural de pilares (horsts) y fosas (grabens). Son los responsables del origen del Bajío como cuenca o fosa tectónica, y de la configuración irregular de lo que hoy constituye su substratum. Desde su origen esta fosa ha venido siendo rellena por materiales diversos, que han venido acumulándose paulatinamente hasta formar la gran planicie regular que existe actualmente.

Los procesos más recientes de esta tectónica de distensión, ha favorecido el levantamiento de bloques en el interior de la gran planicie que es El Bajío, afectando los materiales que han colmado la fosa. Esto ha permitido, en algunos puntos, la observación directa de algunas formaciones que constituyen el subsuelo.

Al S de León, en los cerros al W del rancho San Cristóbal, así como en los lomeríos que aparecen al N de Irapuato, se da el caso de estos afloramientos. En esos sitios afloran las secuencias sedimentarias propias del subsuelo del Bajío. Están representadas generalmente por formaciones constituidas por sedimentos clásticos y volcaniclásticos (materiales aluviales como gravas, arenas, limos y arcillas en diversas proporciones) medianamente consolidados y burdamente estratificados, en posición subhorizontal. Una de estas formaciones, muy característica en la región, es una formación de calizas lacustres que ha sido y/o es utilizada como materia prima en la fabricación de cal y cemento.

La edad de esas secuencias es proporcionada por su posición estratigráfica: en ambos casos subyacen a derrames de lavas basálticas de probable edad miocénica. En otros sitios subyacen a un volcanismo del Plioceno.

La interpretación del subsuelo en El Bajío se establece a partir de la información directa que proporcionan los afloramientos existentes. Se complementa con la información indirecta que proporcionan las perforaciones de pozos profundos o los métodos de prospección de la Geofísica.

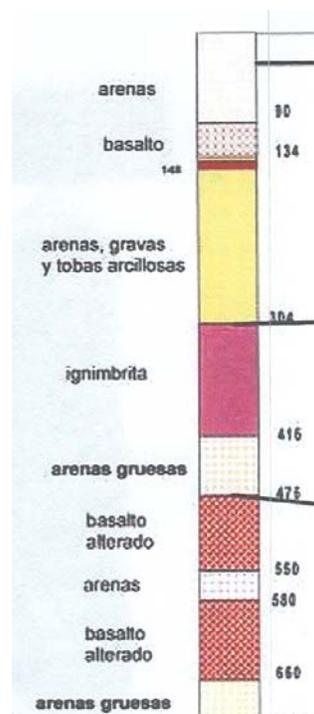


Figura 4.4. Columna litoestratigráfica del subsuelo del Bajío obtenida de un pozo profundo en la ciudad de Salamanca

En la ciudad de Salamanca la Comisión Federal de Electricidad ha perforado un pozo hasta 700 metros de profundidad. La columna litoestratigráfica atravesada proporciona una idea general de las formaciones ocultas en el subsuelo del Bajío (Figura 4.4). En Salamanca el subsuelo está representado por un relleno poco

consolidado de material lacustre, volcánico y aluvial que alcanza los 300 metros de espesor, encima de un substratum consolidado representado por formaciones volcánicas (ignimbritas y basaltos) y sedimentarias (arenas).

El substratum y parte del relleno es afectado, como se ha dicho, por fallas diversas; no así los depósitos más recientes. Sin embargo es bien conocido que en las últimas décadas en diversos puntos del Bajío se han venido presentando fenómenos de subsidencia que se manifiestan por el fallamiento y agrietamiento de esos terrenos no consolidados, fenómenos que han dañado severamente la estructura urbana en diversas ciudades. Más allá del Bajío, en diversos puntos del país los mismos fenómenos se han hecho presentes. Aquí y allá su origen generalmente es atribuido a la sobreexplotación y consecuente agotamiento de los acuíferos de la región. Su relación con las manifestaciones de la actividad tectónica actual ha sido poco investigada.

4.5.- La Sismicidad en El Bajío

Como ya ha sido mencionado, esta parte de El Bajío marca el límite o la transición entre la Mesa Central y el Cinturón Volcánico Mexicano. Este último se caracteriza sísmicamente por registrar mayormente eventos de pequeña magnitud que se originan por la actividad de las numerosas fallas que también lo caracterizan. Esos pequeños sismos en general se caracterizan por ocurrir en *enjambres sísmicos*, es decir, en series o secuencias que suelen durar días o semanas.

Aunque poco frecuentes, el Cinturón Volcánico Mexicano no ha estado exento de eventos telúricos mayores (de magnitudes de 7.0 grados o más). Históricamente esos sismos han causado daños considerables a las poblaciones cercanas a los epicentros, y se han sentido fuertemente en la región de El Bajío.

En esta región llega a sentirse también la sismicidad que se origina en la costa pacífica, por el fenómeno de subducción de las placas litosféricas. Es sensible especialmente a los grandes sismos que ocurren en la zona Jalisco-Colima. La

información al respecto no ha reportado sin embargo daños importantes en ciudades como Irapuato, Silao, León y San Francisco del Rincón.-Purísima del Rincón.

Aunque el siglo XIX está marcado por la ausencia de registros instrumentados de la sismicidad, las referencias hemerográficas dan cuenta que en esa época en El Bajío se sintieron dos grandes sismos: el 19 de junio de 1858 con epicentro en Patzcuaro; y el 11 de noviembre de 1874 cuyo epicentro se infiere en las cercanías de la ciudad de Guanajuato. El primero, que causó muertes y fuertes daños materiales en Patzcuaro, fue fuertemente sentido en León, donde provocó conmoción y pánico. Sin embargo no se reportaron daños en otras ciudades del Bajío, a pesar de que sus efectos alcanzaron la ciudad de México y se sintieron hasta en poblaciones del estado de Hidalgo. Suárez y García (1996) detallan grandes sismos que fueron sentidos o afectaron la región de El Bajío durante los siglos XVIII, XIX y principios del XX, antes de los registros instrumentados de la sismicidad.

Entre 1912 y el final del siglo pasado, después que se ha instrumentado el registro de la sismicidad, se conocen cerca de 100 sismos ocurridos en la zona de influencia de El Bajío. Los de mayor magnitud ocurrieron el 18 de junio de 1932 (7.8 grados) y el 15 de abril de 1941 (7.7grados), y fueron sentidos fuertemente en la región. La Figura recapitula la sismicidad registrada en esta parte del país, durante ese periodo de tiempo.

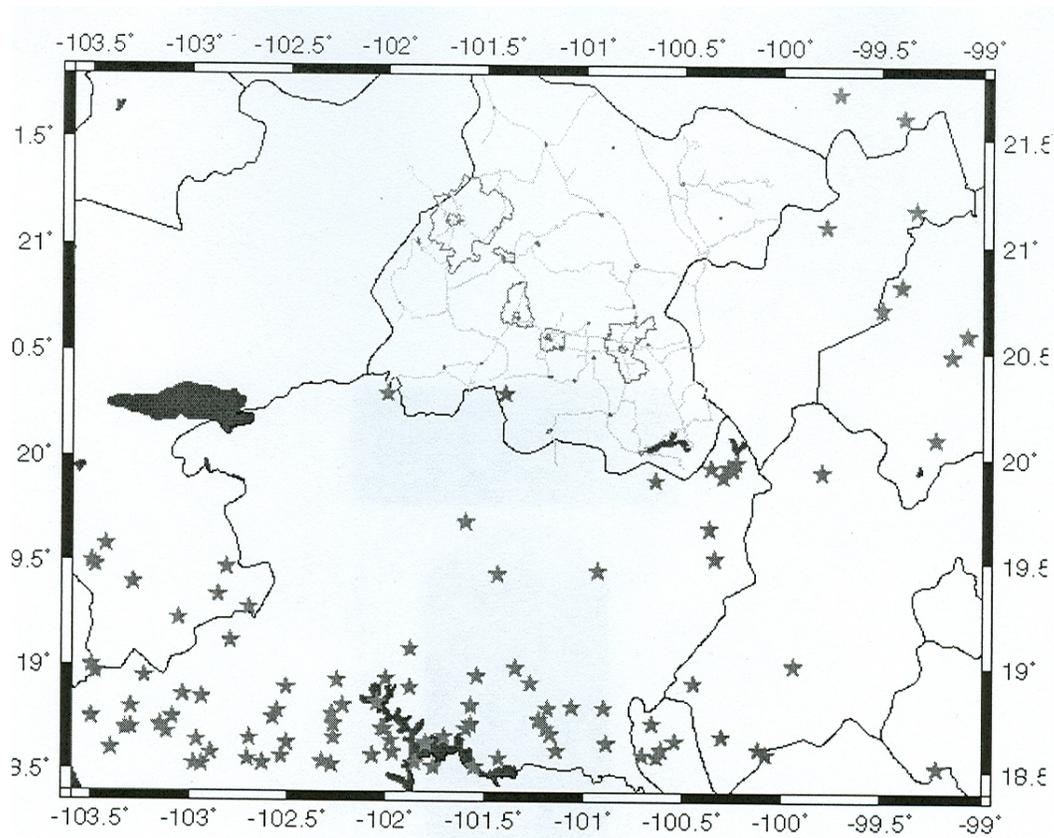


Figura 4.5. Epicentros de los sismos de magnitud igual o mayor a 4.0 grados ocurridos en la zona de influencia del Bajío (Fuente: Servicio Sismológico Nacional).

Finalmente, de acuerdo a la regionalización sísmica del país (Zúñiga et al., 1997), El Bajío pertenece a una región de riesgo sísmico intermedio a bajo, en donde la aceleración máxima del terreno esperada para un periodo de retorno de 500 años, es menor a 100 CMS/seg².

4.6.- Interpretación del subsuelo de la Ciudad de Silao

La ciudad de Silao se localiza hacia la parte más nororiental de la porción noroccidental del Bajío. Su altitud sobre el nivel del mar es entre 1770 al Sur y 1780 al Norte, lo que se traduce en una superficie muy plana donde se asienta el conglomerado urbano.

La geología del entorno de la ciudad está representado hacia el N, NE y E por formaciones mesozoicas y cenozoicas que pertenecen a las secuencias de la Sierra de Guanajuato. Hacia el W afloran materiales sedimentarios más recientes que forman los pequeños lomeríos que sobresalen unos cuantos metros sobre el nivel de la planicie (Figura 6).

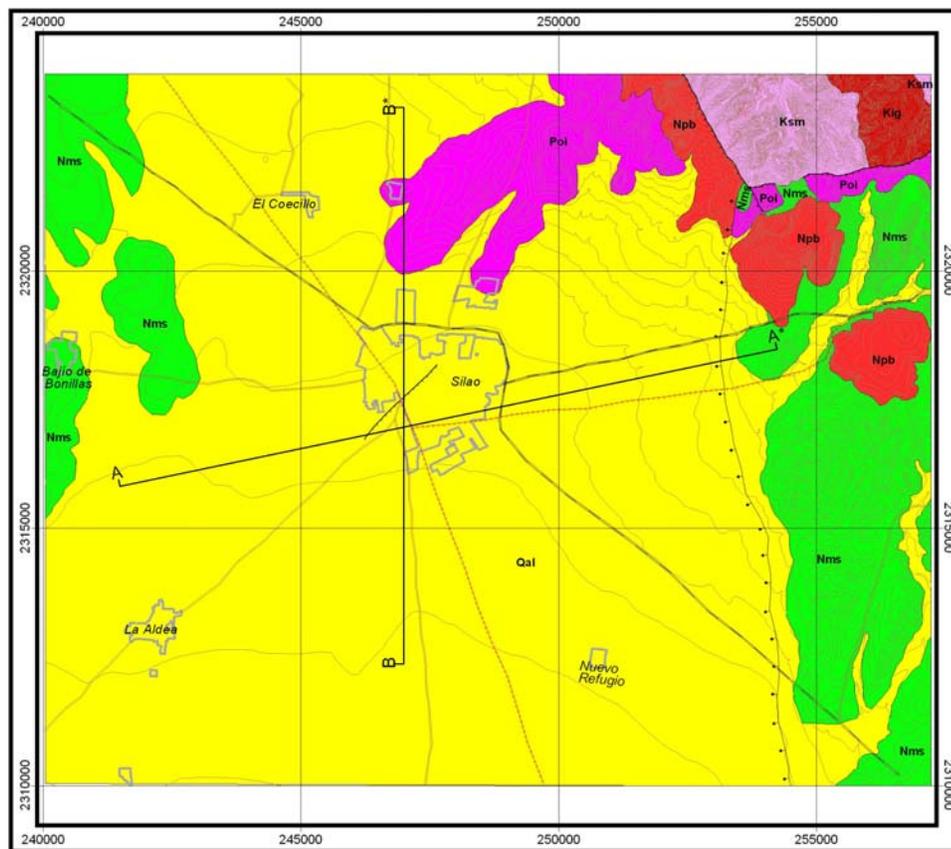


Figura 4.6. Entorno geológico de la ciudad de Silao

Explicación: Secuencia volcanosedimentaria del Cretácico inferior (Ksm); Complejo filoniano del Cretácico inferior (Kig); Tobas e ignimbritas de composición riolítica del Oligoceno (Poi); Sedimentos fluviolacustres del Mioceno (Nms); Basaltos del Mioceno-Plioceno (Npb); Material aluvial (Qal).

La información obtenida del subsuelo de la región muestra que el subsuelo de la ciudad de Silao está constituido por un espeso relleno de materiales poco o no consolidados representados por suelos y materiales aluvionares, pero mayormente por un grueso paquete de sedimentos lacustres y fluviolacustres diversos. Se trata de gravas, arenas, limos y arcillas en diversas proporciones, en estratos burdamente desarrollados (Figuras 7 y 8).

La formación sedimentaria, que puede alcanzar 400 metros de espesor, representa materiales de edades del Mioceno superior, Plio-Pleistoceno y Reciente. Descansa sobre un substratum bien consolidado constituido por formaciones de composición riolítica (tobas e ignimbritas) del Oligoceno, o sobre una formación de conglomerados cementados, bien consolidados, de color rojizo, de edad Paleoceno-Eoceno.

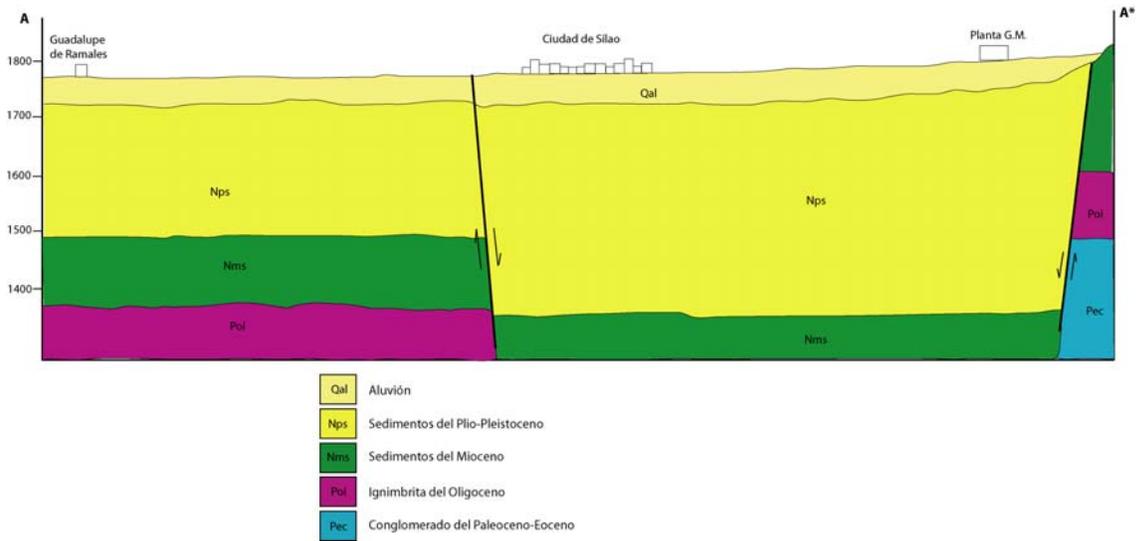


Figura 4.7. Sección estratigráfica-estructural del entorno de la ciudad de Silao en el sentido W-E.

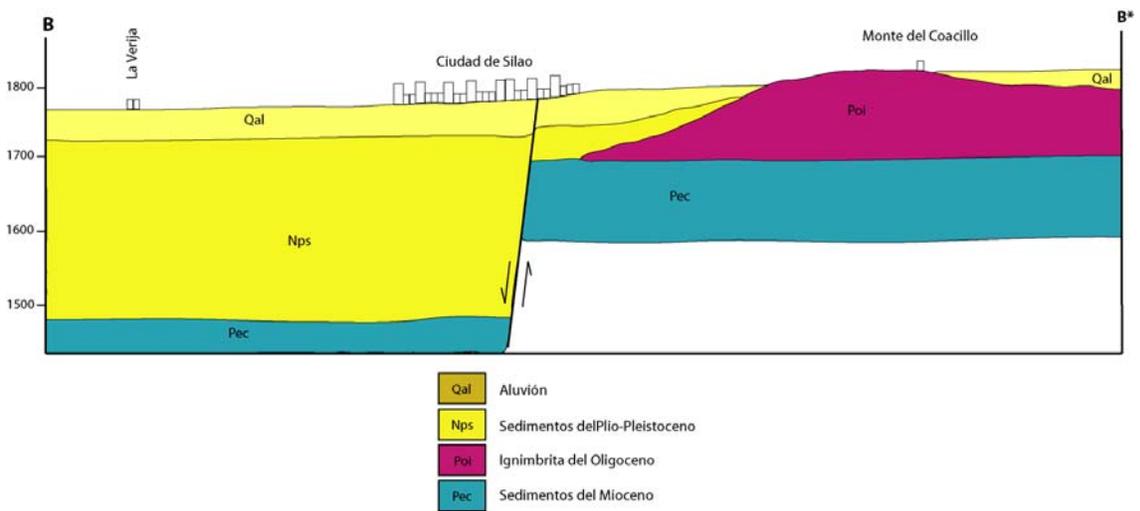


Figura 4.8. Sección estratigráfica-estructural del entorno de la ciudad de Silao en el sentido S-N.

Hace algunas décadas en la ciudad de Silao ha aparecido un fenómeno de subsidencia en sus terrenos que ha afectado su infraestructura urbana. Se trata de una falla de orientación NE-SW, cuyo plano mira hacia el SE. Actualmente su desplazamiento vertical alcanza más de 1 metro y su traza puede seguirse a lo largo de centenas de metros dentro de la ciudad.

Este fenómeno ha sido poco estudiado. Sin embargo, como se ha dicho, los fenómenos de agrietamiento y fallamiento de los terrenos no consolidados en el Bajío son comunes, y ciudades como Celaya, Salamanca, Irapuato, Abasolo, entre otros, los padecen severamente. Su origen ha sido interpretado como consecuencia de una sobre-explotación de los mantos acuíferos, lo que provoca un fenómeno de compactación de los sedimentos no consolidados.

En el caso de la ciudad de Silao, como en otros casos, esta hipótesis parece justificarse. En efecto, la falla de que afecta la ciudad parece reflejar una discontinuidad en el substratum consolidado, discontinuidad que puede interpretarse como una falla sepultada, cubierta por los sedimentos más recientes. El lado hundido corresponde al espesor mayor de sedimentos no consolidados

5. METODOLOGIA APLICADA

5.1 Teoría Aplicada

Para la determinación de las características o propiedades dinámicas del suelo, se puede recurrir a métodos orientados al empleo de técnicas de campo y analíticas, donde cada una de manera particular aporta elementos o parámetros que aproximan el comportamiento dinámico del suelo al poder determinar las funciones de transferencia de los depósitos superficiales, lo que permite proponer mapas de microzonificación de regiones específicas en las que se cuente o genere información aplicable por alguno de los métodos.

Los parámetros que básicamente inciden en dicho comportamiento son: la velocidad de compresión, velocidad de cortante, módulo de cortante y relación de Poisson; los métodos empleados para la obtención de estos parámetros están basados por un lado en el análisis de registros acelerográficos de terremotos ocurridos o por vibración ambiental o refracción sísmica (métodos directos) y por otro lado, los métodos analíticos apoyados en estudios de campo y laboratorio (métodos indirectos). Los primeros tienen como objeto el determinar la velocidad de transmisión de las ondas sísmicas, mientras que los segundos se enfocan en determinar su respuesta; por tal razón, generalmente los estudios de microzonificación sísmica son trabajos multidisciplinarios en los que convergen esfuerzos de geólogos, geofísicos, sismólogos y de las áreas de ingeniería sísmica y estructural entre otros (Fäh D. Noack T., 1996); con ello se logra la combinación de predicciones teóricas a través de la formulación de modelos de comportamiento y su validación a través del tiempo con la obtención de registros de eventos reales que permitan calibrar y ajustar la microzonificación propuesta.

En este trabajo se utilizaron métodos directos e indirectos ya que ambos se complementan y se ajustan a la información y equipo disponible. Los métodos basados en sismos reales arrojan una mayor aproximación en los resultados, desafortunadamente como ya se ha comentado no se cuenta con registros de

estaciones acelerográficas por la simple razón de que no existen en la zona de estudio. Sin embargo, las caracterizaciones geotécnicas con que se cuenta, las clasificaciones de tipos de suelo y sus propiedades físico-mecánicas, así como la configuración del lecho rocoso, son elementos valiosos de soporte en el análisis de los registros de vibración ambiental, así mismo las correlaciones entre las propiedades estáticas y dinámicas de los suelos son importantes para los mismos fines.

5.2 Vibración Ambiental

El método de vibración ambiental consiste en una técnica basada en la obtención de registros de micro temblores producidos por la propia actividad cotidiana de las ciudades, lo cual nos permite estimar el periodo dominante de los estratos sedimentarios del subsuelo, ya que está relacionado con el espesor de los sedimentos y con la velocidad promedio de propagación de onda S. Las vibraciones del suelo generalmente se clasifican en movimientos sísmicos que pueden ser débiles o fuertes. El tipo de movimientos que en este caso nos ocupa es el de los movimientos débiles o micro temblores los cuales dependen principalmente de la actividad humana; están compuestos por ondas Rayleigh y ondas S con rangos de periodo corto menores a uno o dos segundos y se ha observado que el periodo dominante de un movimiento sísmico concuerda con el periodo dominante que se obtiene a través de un registro de vibración ambiental por lo que es fiable su utilización (Lermo J. Cuenca J., 1994).

En años recientes, primero en Japón y después en varios países ha sido utilizado el análisis de relaciones espectrales entre dos registros sísmicos obtenidos de dos estaciones que existan en la localidad, una ubicada en lecho rocoso (estación de referencia) y la otra ubicada en terreno suave, este tipo de análisis requiere de por lo menos dos estaciones y el registro de varios sismos, lo cual puede ocurrir en periodos de varios años. Otra técnica de relaciones espectrales consiste en determinar la razón entre las componentes horizontales con respecto a la

componente vertical, a través de la cual se obtiene el periodo fundamental del sitio.

Se han desarrollado también otros métodos de análisis de las relaciones espectrales y que han sido ampliamente utilizados por sus bondades, estos métodos contemplan la relación espectral de las componentes horizontales con respecto a la componente vertical teniendo como base la obtención de registros de vibración ambiental o micro tremores (así llamados a los registros sísmicos cuya fuente es el ruido ambiental, producidos por el tráfico de personas y maquinaria cercanas a los aparatos de medición que captan la excitación de ondas Rayleigh).

5.3 Método de Nakamura

Uno de estos métodos es el propuesto por el Ingeniero japonés Nakamura (1989), quien desarrollo esta técnica de análisis a partir de la obtención de registros de ruido ambiental en la superficie del suelo; la aplicación de la metodología que propone se ha extendido en varias partes del mundo, debido a la relativa facilidad de obtención de los registros y es hoy en día uno de los procedimientos más conocidos y utilizados para la configuración de estos mapas de igual periodo dominante y microzonificación sísmica, sobre todo en ciudades o regiones donde la sismicidad es de moderada a baja (Lermo F. Chávez G., 1994) ya que generalmente no cuentan con registros de sismos que además hayan sido obtenidos de manera simultánea tanto en estaciones localizadas sobre terreno suave como en terreno rocoso. Con el empleo de la técnica de Nakamura, los registros pueden ser obtenidos en cualquier sitio y en cualquier momento, además se ha observado que aunque el ruido ambiental varia a lo largo del día, el periodo dominante del suelo se conserva invariable (Alfaro A., 1999); además otra característica y quizá la más importante en la aplicación de esta técnica es que no requiere de una estación de referencia (Lermo, 1997).

A través de estos registros se puede estimar con buena aproximación el periodo fundamental del depósito de suelo pero no la amplificación (Coral H., 2002) en la superficie del terreno por lo que resulta factible el cálculo de los periodos

dominantes en suelos blandos de regiones donde no existen estaciones sismológicas o donde la información de estas es escasa y aun cuando han sido desarrolladas otras técnicas que utilizan los registros de vibración ambiental y cálculo de los cocientes espectrales en función de una estación ubicada en suelo firme u otras que se basan en la interpretación directa de los espectros de amplitudes de Fourier; han sido evaluadas varias de ellas (Lermo, 1990) llegando a la conclusión de que la técnica desarrollada por Nakamura para la interpretación de los registros de micro tremores es la que mayores ventajas ofrece ya que se obtienen de ella resultados confiables similares a los obtenidos con sismogramas y es aplicable para un rango bastante amplio de periodos fundamentales del terreno (de entre 0.30 y 5 Hz.).

La técnica de Nakamura ha tenido bastante aceptación ya que tanto la obtención de registros como el procesamiento y análisis de datos es relativamente sencillo; consiste en la obtención de los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical y la relación espectral entre ambas, con lo cual se obtiene de manera aproximada la función de transferencia en la cual se amplifican diferentes valores frecuenciales debidos fundamentalmente al espesor de las capas de suelo y la velocidad de corte (Coral H., 2002).

Ante la carencia en las ciudades estudiadas no cuentan con estaciones sismológicas, esta técnica representa una valiosa herramienta que ha sido ya utilizada en varias ciudades de nuestro país por las ventajas tanto técnica como de bajo costo que ofrece; es así como, ha servido también de complemento para estudios de riesgo sísmico de ciudades que si cuentan con estaciones sismológicas pero que el numero de registros son insuficientes para conformar las curvas de igual periodo como son los estudios realizados para ciudades como: Oaxaca, Acapulco, Veracruz , la ciudad de México (Lermo J., 1991) Santiago de Cali y el Salvador entre varias mas; por tanto, la integración de datos de sismos fuertes y de micro tremores (Lermo J., Chávez F., 1993) ha permitido la formulación de mapas de periodos dominantes de varias ciudades.

La técnica de Nakamura basa su hipótesis de partida en que un micro tremor es originado principalmente por la propagación de ondas Rayleigh cuyo efecto fuente puede determinarse a partir del cociente entre las componentes verticales del movimiento en la superficie del estrato del suelo y que la amplificación que se registra en la superficie del terreno se debe a las propiedades mecánicas de los estratos que descansan sobre la capa dura denominada semi-espacio; en base a estas consideraciones se ven involucradas cuatro componentes del movimiento: horizontal y vertical para el semi-espacio y horizontal y vertical para la superficie.

Para estimar de manera aproximada la función de transferencia de las capas superficiales del suelo, supone que el ruido producido por la vibración ambiental está compuesta por varios tipos de ondas. Este método formula eliminar el efecto de las ondas Rayleigh, considerando además que los micro tremores son similares tanto horizontal como verticalmente en la base rocosa.

De acuerdo a la técnica propuesta por Nakamura. (Lermo J., Chávez F., 1993), es posible evaluar el efecto de amplificación de la fuente, A_S mediante el cociente:

$$A_S = \frac{V_S}{V_B}$$

Donde V_S representa el espectro de amplitud de la componente vertical de movimiento en la superficie y V_B el espectro de amplitud de la componente vertical de movimiento en el semi-espacio.

Nakamura define también el efecto de sitio S_E , como el cociente:

$$S_E = \frac{H_S}{H_B}$$

Donde H_S representa el espectro de amplitud de la componente horizontal de movimiento en la superficie y H_B el espectro de amplitud de la componente horizontal de movimiento en la base de la capa de suelo.

Para compensar S_E por el efecto de la fuente, se obtiene una función de efecto de sitio modificada, S_M , como:

$$S_M = \frac{S_E}{A_S}$$

La cual es equivalente a:

$$S_M = \frac{H_E}{A_S} = \frac{\left(\frac{H_S}{V_S} \right)}{\left(\frac{H_B}{V_B} \right)}$$

A partir de mediciones de micro tremores en la superficie y el inicio de la capa dura, Nakamura obtuvo experimentalmente que la relación H_B / V_B se podía considerar igual a la unidad, es decir:

$$\frac{H_B}{V_B} = 1$$

Por lo que, confiabilmente la función de efecto de sitio se obtiene mediante la relación:

$$S_M = \frac{H_S}{V_S}$$

5.4 Proceso de sitios registrados y obtención de periodos

Tomando en cuenta la topografía de la zona y la ubicación de los diferentes pozos que existen en la zona se eligieron los puntos para realizar la instrumentación, en la figura 5.3 se muestran estos sitios con su ubicación, la duración mínima de cada registro fue de por lo menos 60 seg. Tomando la medición de vibraciones 3 veces consecutivas en el mismo sitio y descartando inmediatamente aquellas de duración menor a 60 seg.

Una vez contando con los registros de vibración, y la información geológica posible así como los cortes litológicos de algunos pozos de la región se da aplicación a la técnica de Nakamura, ayudados por programas de computo como lo es el DETGRA 2000 desarrollado en el instituto de Ingeniería de la UNAM por Ordaz y Montoya, con el cual se determinaron los espectros de Furier para las componentes vertical y horizontal en dirección norte- sur y este-oeste (figura 5.1) de acuerdo a la técnica de Nakamura y utilizando la misma herramienta se obtiene el cociente de ambas componentes horizontales con respecto a la componente vertical dando como resultado las funciones de transferencia a manera de grafica. Sistemáticamente se obtuvieron todas las graficas de espectros de Furier y sus respectivas funciones de transferencia se muestran en la figura 5.1 Como resultado en las graficas de las Funciones de Transferencia podemos determinar el valor de la frecuencia predominante, tomando el valor máximo de la frecuencia y siguiendo con la técnica de Nakamura obtenemos el inverso de esta frecuencia y logramos el periodo dominante del suelo. En la tabla 5.1 se resumen los valores del periodo dominante de cada registro los cuales junto con la información recabada sirvieron de base para la propuesta del mapa de isoperíodos.

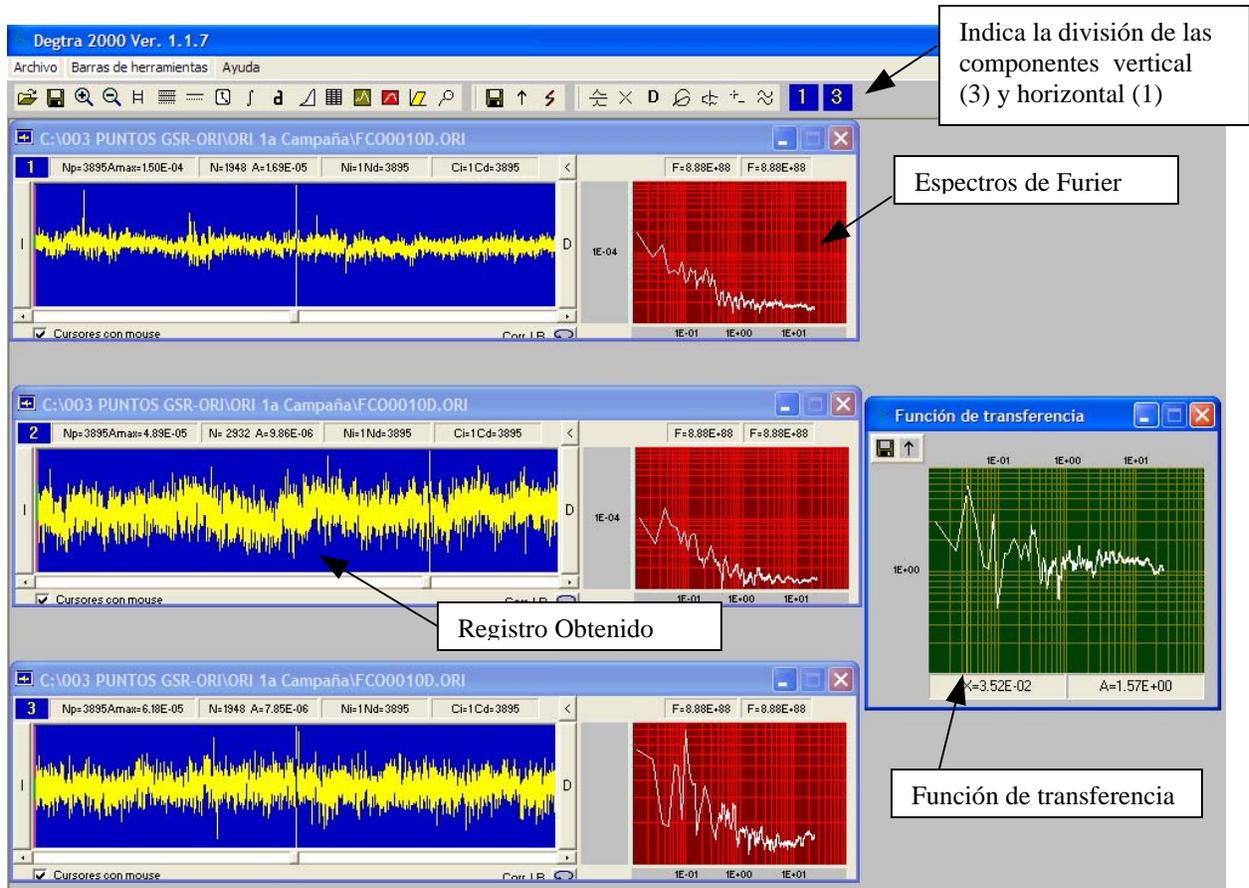


Figura 5.1 muestra de una ventana del DEGTRA 2000 durante el procesamiento de los registros obtenidos.

Cabe resaltar que en este trabajo se tiene como un de los objetivos proponer cartas de isoperíodos naturales de vibrar del suelo.

Estas curvas de isoperíodos permiten además zonificar o delimitar los diferentes tipos de suelo de la ciudad, para fines de diseño sísmico de las construcciones; siendo:

- *Terreno duro* periodos menores a 0.4,
- *Terreno de transición o intermedio* periodos de 0.4 a 1.0 y
- *Terreno blando* para periodos mayores a 1.0 seg.

Tabla 5.1 Periodos obtenidos

NUM DE REG	GRAFICA	FRECUENCIA	PERIODO	UBICACIÓN
1	PMSIL1010M	3.226	0.310	PRESIDENCIA MUNICIPAL
2	SILOOO2.XLS	3.448	0.290	PLAZA LIBERTAD
3	SILOOO3.XLS	2.564	0.390	RINC DE LAS FLORES
4	SILOOO4.XLS	3.215	0.311	JARD DE LA VICTORIA
5	SILOOO5.XLS	3.546	0.282	EL CRUCERO
6	SILOOO6.XLS	2.703	0.370	LOS ANGELES
7	SILOOO7.XLS	3.546	0.282	FRCC LA CRUZ
8	SILOOO8.XLS	2.604	0.384	COL LOPEZ MATEOS
9	SILOOO9.XLS	2.625	0.381	FRACC GUADALUPE
10	SILOO10.XLS	2.703	0.370	COL EL OLIVO
11	SILOO11.XLS	2.941	0.340	COL EL PROGRESO
12	SILOO12.XLS	3.195	0.313	UNIDAD DEPORTIVA
13	SILOO13.XLS	2.882	0.347	COL SOPEÑA
14	SILOO14.XLS	2.857	0.350	FRACC VALLE SAN JOSE
15	SILOO15.XLS	2.646	0.378	GENERAL MOTORS
16	SILOO16.XLS	2.703	0.370	GENERAL MOTORS I
17	SILOO17.XLS	20.000	0.050	EL CUBILETE
18	SILOO18.XLS	2.632	0.380	FIPASI I
19	SILOO19.XLS	5.814	0.172	LAS COLINAS
20	SILOO20.XLS	3.546	0.282	PLANTA SMC
21	SILOO21.XLS	6.667	0.150	AEROPUERTO
22	SILOO22.XLS	12.048	0.083	CAMINO A PABILEROS
23	SILOO23.XLS	2.299	0.557	LA ALDEA
24	SILOO24.XLS	2.639	0.379	NVO REFUGIO
25	SILOO25.XLS	12.048	0.083	VALLEJOS
26	SILOO26.XLS	2.778	0.360	PLANTA CONDUMEX
27	SILOO27.XLS	11.765	0.085	BAJIO DE BONILLAS
28	SILOO28.XLS	1.862	0.537	FRANCO
29	SILOO29.XLS	8.547	0.117	COL NUEVO MEXICO
30	SILOO30.XLS	5.814	0.172	EL COECILLO

5.5 Calibración de periodos con expresiones semi-empíricas

Para la elaboración de las cartas de isoperíodos fue necesario identificar la información geológica regional, cortes litológicos, estudios geofísicos, relieve del basamento somero y estratigrafías, registros sísmicos y trabajos similares al presente, es decir, trabajos que se han realizado para otros lugares de la República Mexicana con características similares como es en la ciudad de Querétaro además de obtener la cartografía urbana actualizada y digitalizada de la zona de estudio, para hacer referencias e ilustraciones más objetivas de las zonas o sitios a que se refiere en este trabajo.

Ante la carencia en muchas ciudades y poblaciones de la República Mexicana para tener estaciones sismológicas y en consecuencia registros de eventos sísmicos, se han empleado expresiones semi-empíricas para obtener los efectos de sitio en suelos suaves. Esta metodología es utilizada en virtud de las ventajas de fácil procedimiento, bajo costo y corto tiempo en que puede ser desarrollada, lo que ha permitido que algunas ciudades cuenten con estudios basados en la misma para la elaboración de cartas de isoperíodos y zonificación por tipos de suelo para fines de diseño sísmico de las construcciones.

5.6 Parámetros de las propiedades dinámicas de los estratos

Para la determinación de las características o propiedades dinámicas del suelo, se puede recurrir a métodos orientados al empleo de técnicas de campo y de laboratorio, donde cada uno de manera particular aporta elementos o parámetros que aproximan el comportamiento dinámico del suelo ante los efectos de sismo.

Los parámetros que básicamente inciden en dicho comportamiento son: la velocidad de compresión, velocidad y módulo de cortante, y relación de Poisson. Los métodos empleados para la obtención de estos parámetros están basados por un lado en el análisis de registros acelerográficos de terremotos ocurridos, por

vibración ambiental o refracción sísmica (métodos directos); por otro lado, basados en métodos analíticos apoyados en estudios de campo y laboratorio (métodos indirectos). Unos tienen como objeto el determinar la velocidad de transmisión de las ondas sísmicas, mientras que los otros se enfocan en determinar su respuesta.

Las propiedades dinámicas que se utilizan en los problemas sismo-geodinámicos se determinan en el “Péndulo de Torsión Libre”, Figura 5.2.- donde se investiga el “Módulo Dinámico de Rigidez” que se utiliza para calcular, en conjunto con la estratigrafía y la masa unitaria del suelo, las celeridades de las ondas sísmicas. De donde se calculan los períodos dominantes de la masa del suelo, y los perfiles de las presiones dinámicas y las deformaciones o bien las distorsiones del suelo durante la acción sísmica.

En este trabajo se utilizaron métodos directos e indirectos ya que ambos se complementan y se ajustan a la información y equipo disponible. Los métodos basados en hechos reales arrojan una mayor aproximación en los resultados, desafortunadamente hasta ahora se ha tenido escaso acceso a registros sísmicos de la zona. Por tal razón se recurre a la técnica de vibración ambiental para la determinación de los periodos naturales del suelo de las poblaciones asentadas sobre el valle.

El comportamiento dinámico de una masa de suelo sometida a movimientos horizontales provocados por un sismo puede aproximarse, por métodos analíticos, a partir de las ecuaciones de la dinámica clásica, bajo las hipótesis de considerar al suelo con propiedades de homogeneidad, isotropía y elasticidad; otra hipótesis simplificadora consiste en despreciar el efecto de flexión en la obtención de los desplazamientos horizontales y tomar en cuenta únicamente el efecto de deformación por cortante.

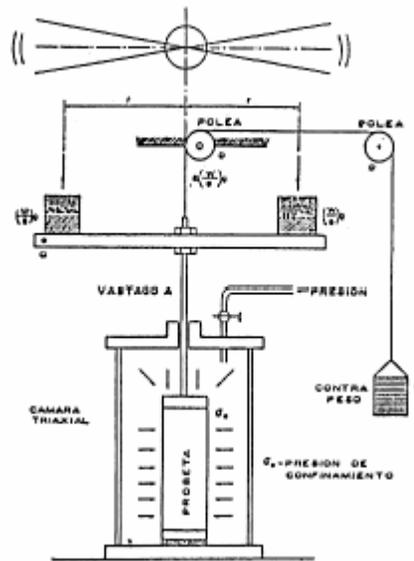


Figura 5.2. Péndulo de torsión de vibración libre

5.7. Expresiones semiempíricas para evaluar periodos

Para determinar analíticamente el periodo natural de vibración del suelo en algunos lugares de la zona de estudio, se utiliza la información litológica disponible de pozos.

Se adoptan los valores tipo del módulo de cortante para los diferentes tipos de suelo de los estratos encontrados, considerando como estrato duro aquel que rebase en cincuenta el número de golpes por cada treinta centímetros de penetración en la prueba de penetración estándar.

Esta información es procesada mediante el modelo elástico de propagación de ondas de cortante (Zeevaert, 1991), la cual queda descrita por las siguientes expresiones:

$$T = 4 \cdot \sum_i \frac{H_i}{V_i} \quad \text{y} \quad V_i = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} \quad (6.12)$$

donde H_i es el espesor del estrato i , V_i la velocidad de las ondas de cortante del estrato i (ver tabla 5.7), G_i es el módulo dinámico de cortante del estrato i y ρ_i la densidad del material del estrato i .

Tabla 5.2 Valores típicos de velocidades de las ondas P y S.

MATERIAL	P Velocidad (m/sec)		S Velocidad (m/sec)		Densidad (gm/cc)
Granito	3,962	6,096	2,134	3,353	2.67
Gabro	6,553		3,444		2.98
Basalto	5,608		3,048		3.00
Dunita	7,986		4,084		3.28
Arenisca	2,438	4,267	914	3,048	2.45
Caliza	3,048	6,096	2,743	3,200	2.65
Lutita	1,829	3,962	1,067	2,286	2.35
Sal	4,389	6,492	-		2.20
Yeso	2,134	3,658	1,097		2.30
Pizarra	3,658	4,450	2,865		2.80
Marmol	5,791		3,505		2.75
Cuarcita	6,050		-		2.85
Esquisto	4,542		2,896		2.80
Roca metamorfica	4,724	5,578	-		2.65
Aluvion	503	1,981	-		1.54
Arcilla	1,128	2,499	579		1.40
Suelo	152	762	91	549	1.1-2.0
Material arenoso (glaciar)	396		-		1.5-2.0
Arena	1,402		457		1.93
Agua	1,463		0		1.00
Hielo	3,353		-		0.90
Aire	341		0		-
Acero	6,096		3,048		7.70
Hierro	5,791		3,200		7.85
Aluminio	6,553		2,987		2.70
Concreto	3,566		2,164		2.7-3.0
Hule	1,036		27		1.15
Plastico	2,347		1,524		-
Celulosa	3,597		1,707		-

Tabla 5.3 Corte litológico pozo No.- 20 Nombre: Planta SMC

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPEJOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLA	B-A
0	2	Arcilla Negra (suelo)	2
2	6	Basalto	4
6	8	Basalto alterado	2
8	12	Basalto	4
12	14	Basalto alterado	2
14	20	Arena volcánica color verde olivo y café	6
20	28	Arena volcánica color verde olivo	8
28	30	Arena volcánica color verde olivo y café claro	2
30	38	Arena volcánica color verde olivo y rojo	8
38	48	Basalto	10
48	60	Basalto alterado	12
60	66	Basalto	6
66	70	Basalto alterado	4
70	74	Basalto	4
74	78	Basalto alterado	4
78	84	Toba de color negro y café claro	6
84	88	Toba de color café oscuro	4
88	90	Arena volcánica negra	2
90	96	Toba y arena volcánica de color café	6
96	100	Arena volcánica negra	4
100	102	Basalto	2
102	110	Basalto alterado	8
110	116	Basalto	6
116	120	Basalto alterado	4
120	124	Basalto	4
124	128	Basalto alterado	4
128	138	Basalto	10
138	144	Basalto alterado	6
144	148	Basalto	4
148	152	Basalto alterado	4
152	158	Basalto	6
158	166	Basalto alterado con tezontle	8
166	216	Basalto alterado	50
216	228	Gravas y arenas	12
228	236	Gravas, arenas y arcillas	8
236	248	Arenas, arcillas y poca grava	12
248	258	Gravas , arena y arcillas	10
258	268	Gravas y arenas	10
268	272	Gravas y poca arena	4
272	294	Gravas y arenas	22
294	298	Gravas	4
298	300	Gravas y arenas	2
300	308	Arena gruesa media y fina y poca grava	8
308	314	Gravas, arena gruesa, media y fina.	6

Tabla 5.4 Corte litológico pozo No.- 24 Nombre: Nuevo Refugio

PROFUNDIDAD		TIPO DE SUELO	ESPESOR DEL ESTRATO EN (m)
DE	A	ARCILLAS	B-A
0	8	Boleos	8
8	18	Colada de Basaltos	10
18	34	Conglomerados	16
34	50	Basaltos	16
50	70	Conglomerados	20
70	86	Basaltos	16
86	158	Conglomerado con matriz silícica	72
158	174	Basalto parcialmente fracturado	16
174	214	Basalto de tipo masivo sano	40
214	228	Basalto fracturado	14
228	280	Basalto de tipo masivo sano	52
280	300	Toba híbrida arcillo arenosa	20

Utilizando el programa Harscor se obtuvieron las graficas de Nakamura y Zeevaert, las cuales se superponen, para mostrar la convergencia de resultados.

Tabla 5.5 Velocidades de onda pozo No.- 20 Nombre: Planta SMC

PLANTA SMC		SILO No. 20		
Tipo de suelo	Profundidad	Ondas P	Ondas S	Densidad
Arcilla Negra (suelo)	2	1128	579	1.40
Basalto	4	5608	3048	3.00
Basalto alterado	2	5608	3048	3.00
Basalto	4	5608	3048	3.00
Basalto alterado	2	5608	3048	3.00
Arena volcánica color verde olivo y café	6	1128	579	1.40
Arena volcánica color verde olivo	8	1128	579	1.40
Arena volcánica color verde olivo y café claro	2	1128	579	1.40
Arena volcánica color verde olivo y rojo	8	1128	579	1.40
Basalto	10	5608	3048	3.00
Basalto alterado	12	5608	3048	3.00
Basalto	6	5608	3048	3.00
Basalto alterado	4	5608	3048	3.00
Basalto	4	5608	3048	3.00
Basalto alterado	4	5608	3048	3.00
Toba de color negro y café claro	6	3048	2743	2.65
Toba de color café oscuro	4	3048	2743	2.65
Arena volcánica negra	2	1128	579	1.40
Toba y arena volcánica de color café	6	3048	2743	2.65
Arena volcánica negra	4	1128	579	1.40
Basalto	2	5608	3048	3.00
Basalto alterado	8	5608	3048	3.00
Basalto	6	5608	3048	3.00
Basalto alterado	4	5608	3048	3.00
Basalto	4	5608	3048	3.00
Basalto alterado	4	5608	3048	3.00
Basalto	10	5608	3048	3.00
Basalto alterado	6	5608	3048	3.00
Basalto	4	5608	3048	3.00
Basalto alterado	4	5608	3048	3.00
Basalto	6	5608	3048	3.00
Basalto alterado con tezontle	8	5608	3048	3.00
Basalto alterado	50	5608	3048	3.00
Gravas y arenas	12	4542	2896	2.8
Gravas, arenas y arcillas	8	4542	2896	2.8
Arenas, arcillas y poca grava	12	1128	579	1.40
Gravas , arena y arcillas	10	4542	2896	2.8
Gravas y arenas	10	4542	2896	2.8
Gravas y poca arena	4	4542	2896	2.8
Gravas y arenas	22	4542	2896	2.8
Gravas	4	4542	2896	2.8
Gravas y arenas	2	4542	2896	2.8
Arena gruesa media y fina y poca grava	8	1128	579	1.40
Gravas, arena gruesa, media y fina.	6	4542	2896	2.8

Tabla 5.6 Velocidades de onda pozo No.- 20 Nombre: Nuevo Refugio

NUEVO REFUGIO		SILO No. 24		
Tipo de suelo	Profundidad	Ondas P	Ondas S	Densidad
Boleos	8	5608	3048	3.00
Colada de Basaltos	10	5608	3048	3.00
Conglomerados	16	2438	914	2.45
Basaltos	16	5608	3048	3.00
Conglomerados	20	2438	914	2.45
Basaltos	16	5608	3048	3.00
Conglomerado con matriz silícica	72	2438	914	2.45
Basalto parcialmente fracturado	16	5608	3048	3.00
Basalto de tipo masivo sano	40	5608	3048	3.00
Basalto fracturado	14	5608	3048	3.00
Basalto de tipo masivo sano	52	5608	3048	3.00
Toba híbrida arcillo arenosa	20	3048	2743	2.65

5.8. Comparativa de resultados

En base a los resultados obtenidos por ambos métodos se hace la superposición de resultados mediante la superposición de las graficas del método de Nakamura y de Zeevaert, obteniéndose las graficas que a continuación se muestran:

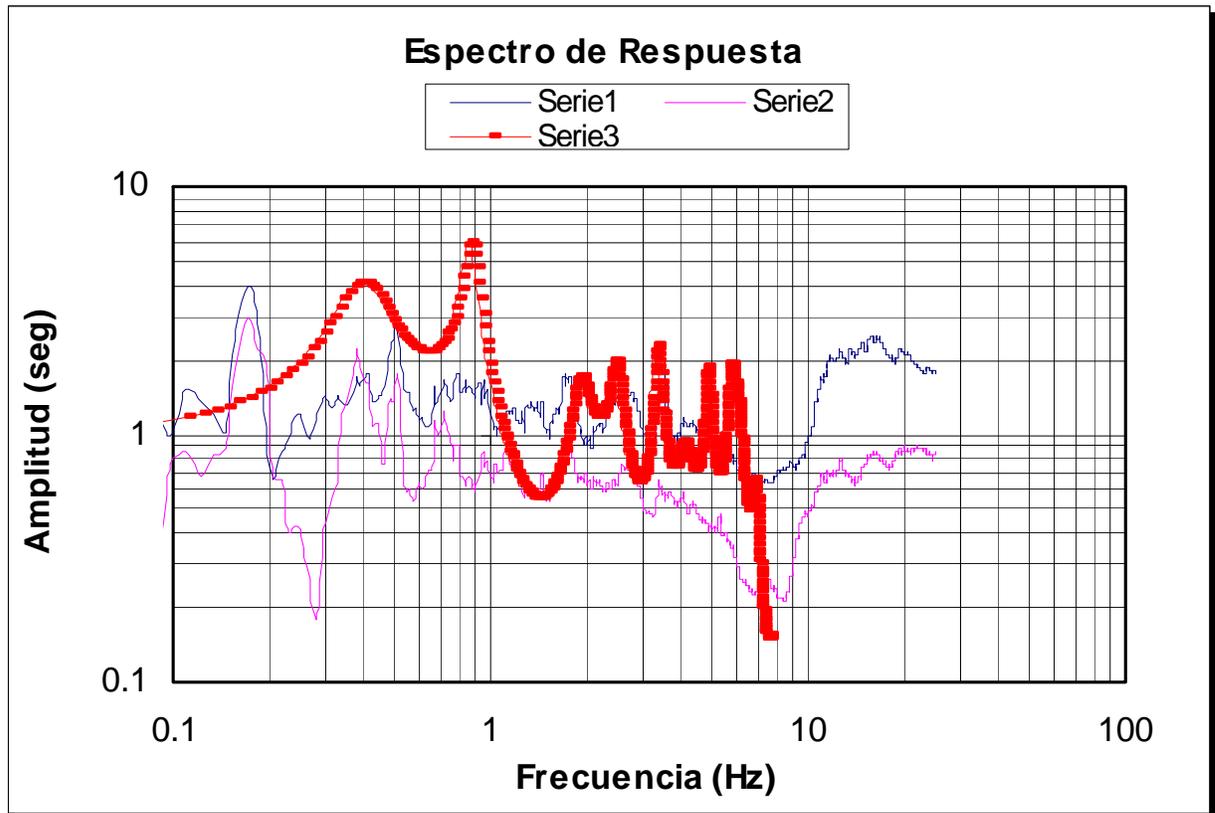


Figura 5.3. Comparativa de frecuencias pozo 20

Registro Silo No 20 Planta SMC

Método de Nakamura

Periodo en segundos 3.546 Seg.

Método de Zeevaert

Periodo en segundos 3.320 Seg.

La diferencia es de 226 milésimas

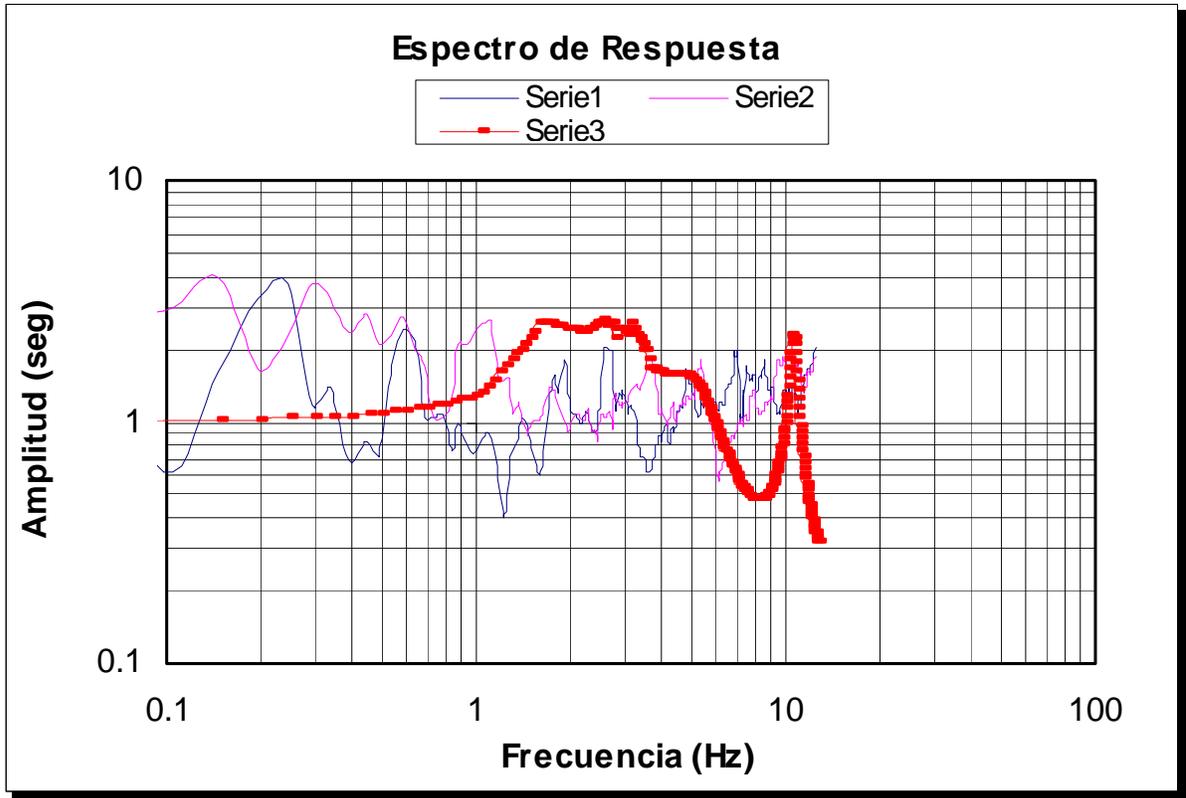


Figura 5.4. Comparativa de frecuencias pozo 24

Registro Silo No 24 NUEVO REFUGIO

Método de Nakamura

Periodo en segundos 2.639 Seg.

Método de Zeevaert

Periodo en segundos 2.685 Seg.

La diferencia es de 46 milésimas

En la comparativa de resultados se aprecian diferencias de 226 y 46 milésimas respectivamente entre ambos métodos, por lo que se concluye que los resultados obtenidos por ambos métodos convergen, dando una confiabilidad a los resultados obtenidos en este trabajo y enseguida se muestra gráficamente la carta de isoperíodos y la propuesta de zonación del sitio.

5.8 Carta de Isoperíodos y Propuesta de Zonación

Con la información procesada de las funciones de transferencia de cada uno de los registros se realiza la propuesta del mapa de isoperíodos de Silao de la Victoria Guanajuato, la clasificación propuesta es:

Para suelos con periodos menores o iguales de 0.40 seg. Serán clasificados como suelos duros o “zonas duras”

Se considerara como “zona intermedia” y para aquellos valores entre 0.4 seg a 1.00 seg.

Se considerara “zona de terreno suave” para valores mayores a 1.0 seg

Para el caso que nos ocupa se pudo determinar según la aplicación de la técnica de Nakamura y con la instrumentación descrita anteriormente que no existen zonas de terreno suave en el área de estudio indicada al inicio de este trabajo.

Puede observarse en la carta de zonificación carta 1.2 que la ciudad de Silao de la Victoria tiene dos zonas una de suelo duro y otra de suelo intermedio, que coincide con lo propuesto en su informe por el Dr. Juventino Martínez, Para el caso del reglamento de construcción se propone la existencia de dos tipos de suelos, la zona A (zona dura) y zona B (zona intermedia)

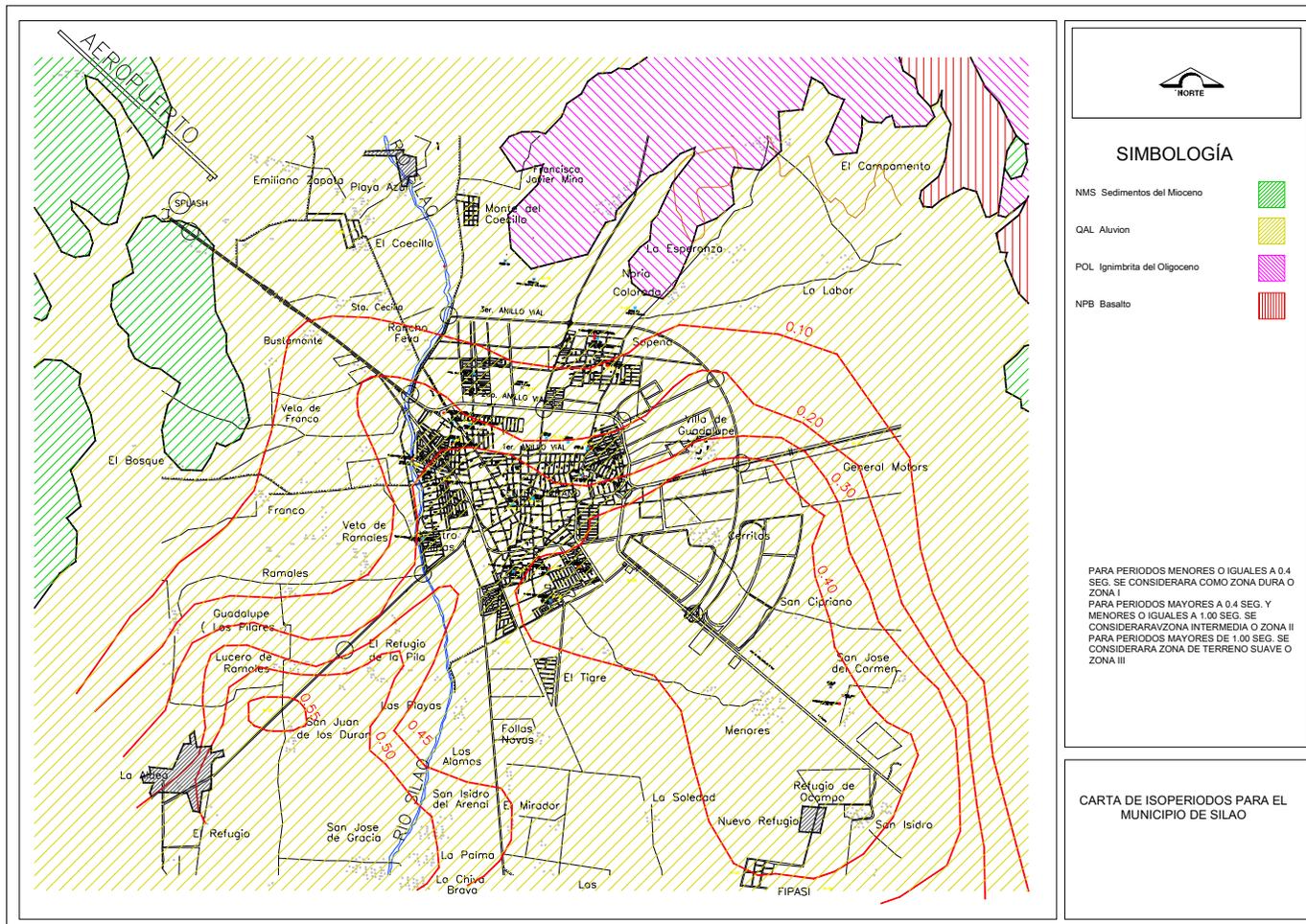


Figura 5.5 Carta de Isoperíodos y localización de puntos registrados

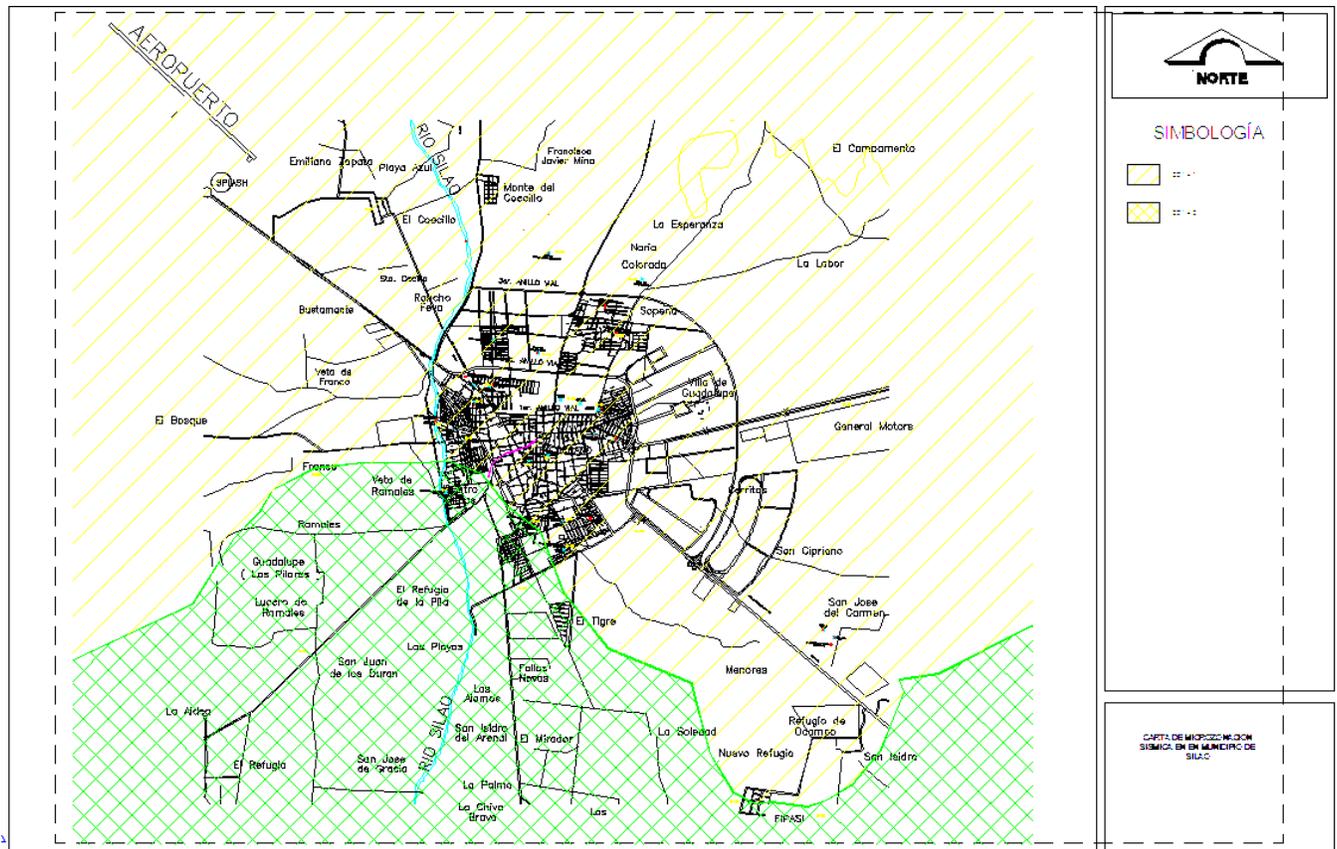


Figura 5.6 Carta de Zonación sísmica para el municipio de Silao de la Victoria

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Concluyendo pues, existen dos zonas o dos diferencias relativas entre suelos que se denominaran Zona I y Zona II, las cuales podrán ser utilizadas para la selección del tipo de suelo y así poder elegir el coeficiente sísmico correspondiente con la confianza de que se esta seleccionando para el tipo de suelo correcto y podrá descartarse definitivamente las referencias para el tipo de suelo III ya que en la zona de estudio no se encontró este tipo de suelo.

Es de importancia mencionar que existe una zona donde se están presentando asentamientos importantes, que de alguna forma pudieran influir en un futuro en una variación de los resultados obtenidos y que coinciden con la falla encontrada en el estudio geológico del Dr. Juventino Martínez, de acuerdo a platicas con el Dr: Martínez y con Dr. Arroyo estos asentamientos se deben fundamentalmente a la extracción inmoderada de agua del subsuelo en el bajío que ocasiona la contracción de los estratos subyacentes ocasionando fenómenos de consolidación en los diferentes estratos del subsuelo, esto se comprueba con al abatimiento del nivel freático del municipio, pues anteriormente, hace 20 años el nivel se encontraba a 150 mts bajo el nivel medio de la ciudad, ahora este nivel se ha ido hasta los 650 mts por debajo de este nivel.

Este fenómeno representa un riesgo alto ya que las construcciones cercanas a este asentamiento presentan daños severos debido al desnivel que se ha manifestado creciendo alrededor de 10 cm por año, por lo que resulta de manera imprescindible, señalar la trayectoria de esta línea de falla debido al alto riesgo que representaría el construir un edificio alto en esta trayectoria de falla y comprende desde el cruce del FFCC en la salida al municipio de Romita pasando por la calzada Hidalgo, calle 5 de Febrero, Av. Álvaro Obregón en donde se encuentra un desnivel sobre el arroyo vehicular de más de 1 Mt en un tramo de no más de 10 mts de longitud y finalmente la calle Guadalupe y Vicente Guerrero donde comienza a propagarse el desnivel.

Se sugiere una revisión del reglamento de construcción vigente a fin de incorporar estas conclusiones con el fin de que este trabajo sirva de referencia a los compañeros de la especialidad y a las autoridades que se encargan de normar el Desarrollo urbano.

Se hace una invitación a los colegios de las ciudades en el bajío con el objeto de tener la participación multidisciplinaria para la realización de diversos reglamentos y adecuaciones de los mismos y las autoridades a actualizar los reglamentos existentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alfaro A. y Navarro M. 1999. Estimación del período predominante del suelo a partir de microtemblores. 1ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Arroyo M. y Pérez H. 2003. Microzonificación sísmica de las poblaciones más importantes en el valle de Aguascalientes, Ags. Artículo II-13. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto; México.

Gabriel Valdez Chávez Microzonificación Sísmica de la Ciudades de San Francisco y Purísima del Rincón Gto. Tesis de Maestría Universidad Autónoma de Querétaro 2008

Coral H. 2002 Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

Fäh D., Noack T., Kruspan P., and Rüttener E.: Microzonation of the city of Basel (Switzerland) based on numerical simulations and in-situ measurements. Proc. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 23-28 June 1996, Paper number 727, 1996.

Lermo J., J. Cuenca (1994) "Características espectrales de temblores tipo A, tipo B y tremores asociados a la erupción del volcán Popocatepelt .México (1994) Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Universidad Nacional Autónoma de México.

Lermo J. Y Chávez F. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation? Bulletin of the Seismo Logical Society of America, vol. 84, México.

Lermo J. R Cabrera, G Cesati y R Ortega" Estimación del periodo dominante en el subsuelo de 18 sitios del Distrito Federal" XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos 1990 Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos San Luis Potosí México.

Lermo J. y Chávez F. 1993 "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station" Bulletin of the seismological Society of America 83 pp 1574-1594

Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo. 1993. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de investigaciones eléctricas, México.

Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR of RTRI, 30, No. 1, USA.

Ordaz M. y Montoya D. (2002) programa DETGRA versión 3.2.4 Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México.

Reglamento de construcciones para la ciudad de Silao Guanajuato (2002)

Rojas E, Arzate J. y Arroyo M. 2002. A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline. Engineering geology 65: 245-260, Elsevier, México.

García Acosta Virginia y Suárez Reynoso Gerardo. Los sismos en la historia de México (1996). Ed. Fondo de Cultura Económica/Universidad Nacional Autónoma de México.

Villegas Rodríguez J. Antonio Zonación Sísmica de la Ciudad de León Gto. Tesis de Maestría Universidad Autónoma de Querétaro 2007

Wegener Alfred "Die Entstehung der Kontinente und Ozeane" (*"The Origin of Continents and Oceans"*) publicado en 1915.

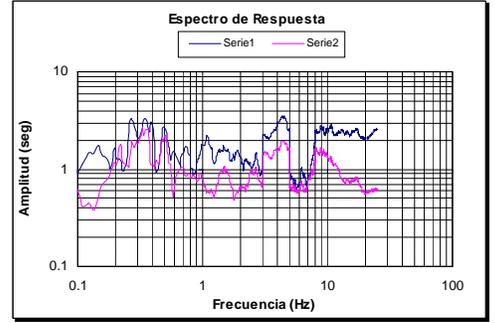
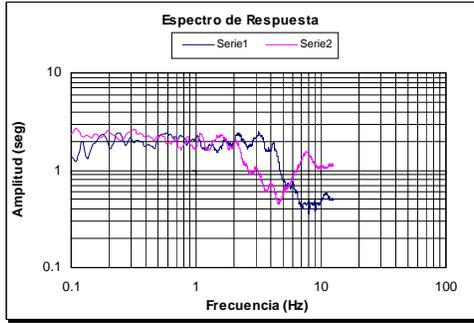
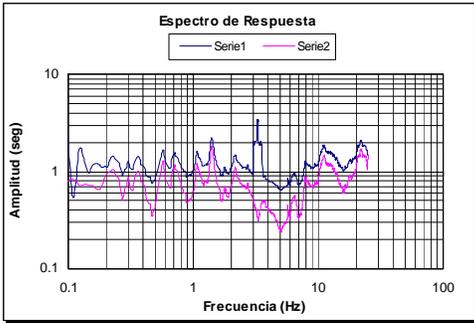
Zavala Sánchez Raúl Gerardo, Zonación Sísmica de la Ciudad de Irapuato Gto.
Tesis de Maestría Universidad Autónoma de Querétaro 2007

Zeevaert L. 1980. Interacción suelo-estructura de cimentación. Editorial Limusa,
México.

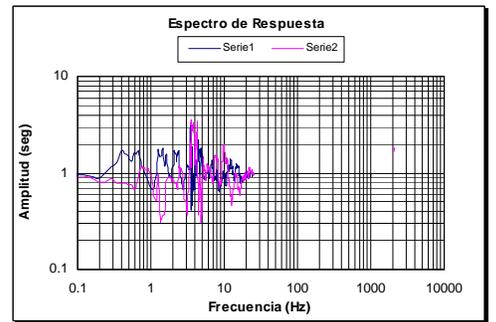
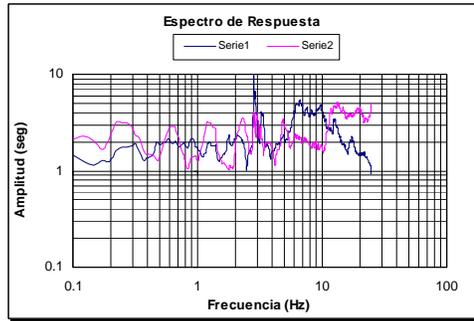
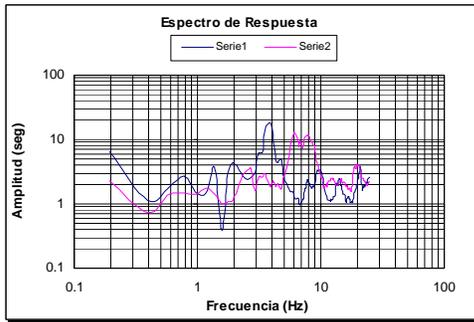
Zúñiga, G. Suarez, M. Ordaz y V. García Acosta (1997) Peligro sísmico en
Latinoamérica y El Caribe, Capitulo 2 México, Centro Internacional para el
desarrollo Ottawa Canadá.

APENDICE 1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

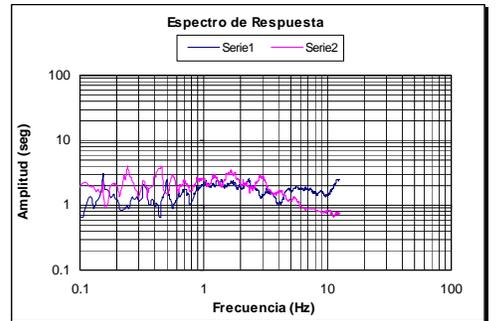
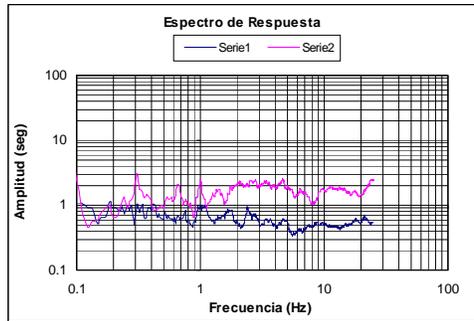
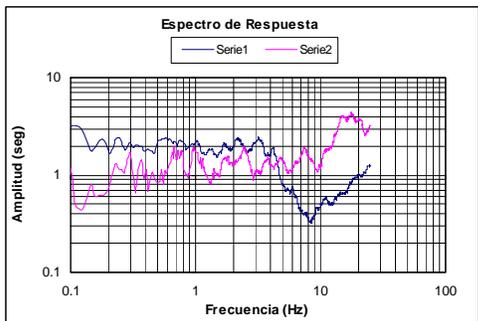
Presidencia Municipal



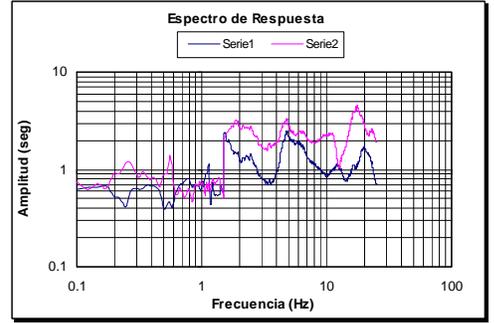
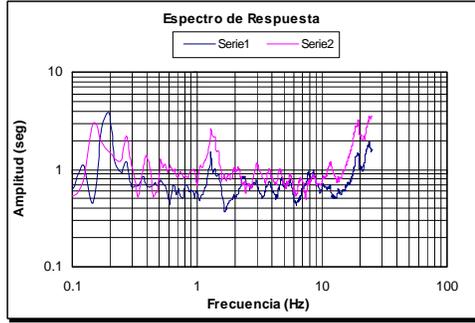
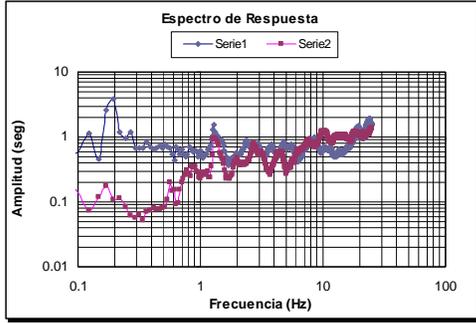
Plaza Libertad



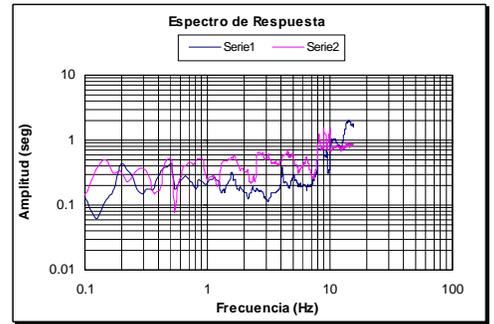
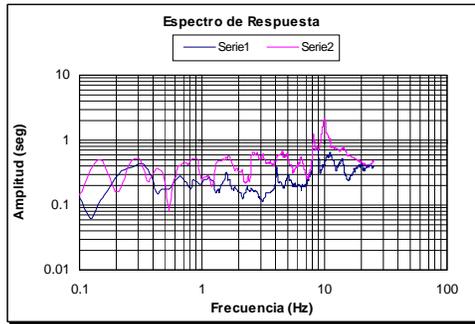
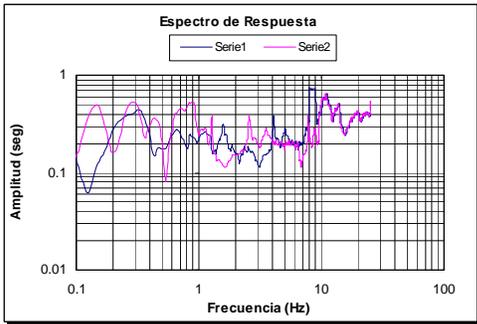
Fraccionamiento Rinconada de las Flores



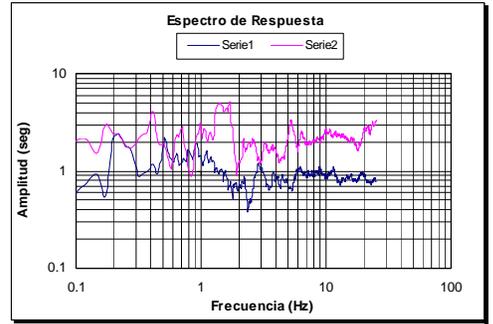
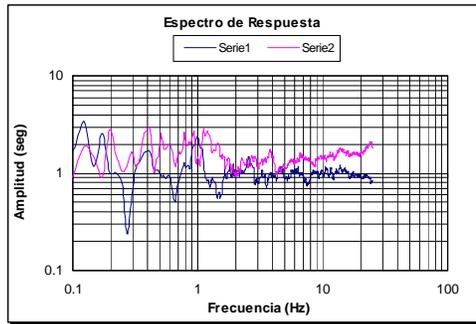
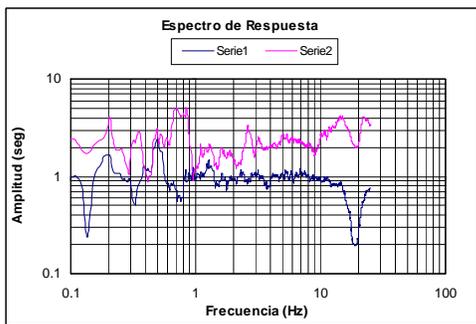
Jardines de la Victoria



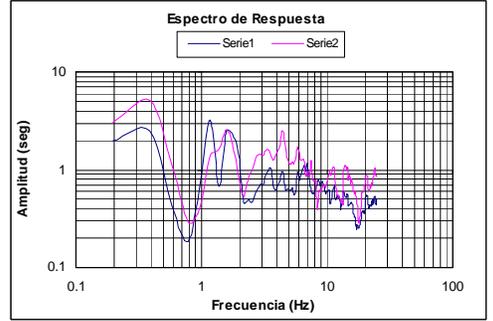
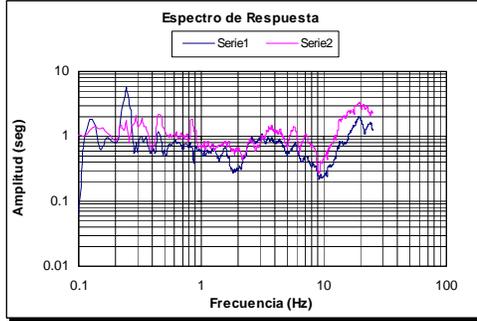
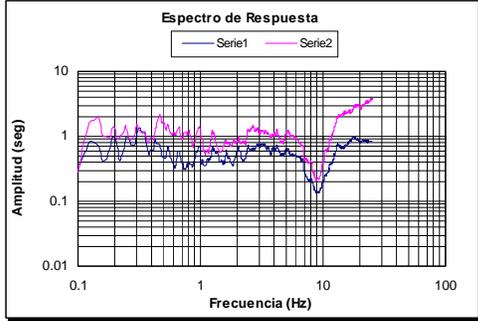
Fraccionamiento El Crucero



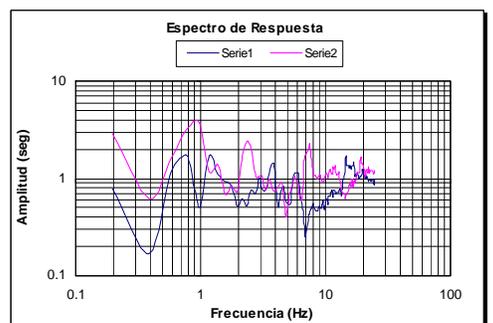
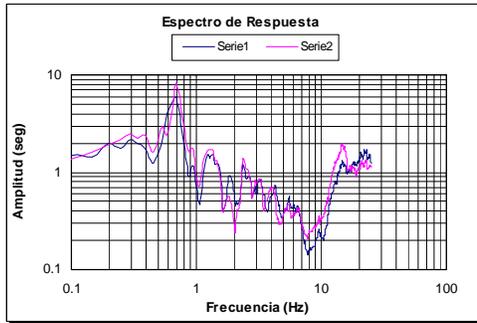
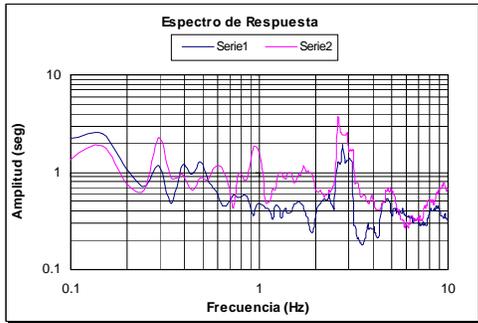
Colonia Los Ángeles



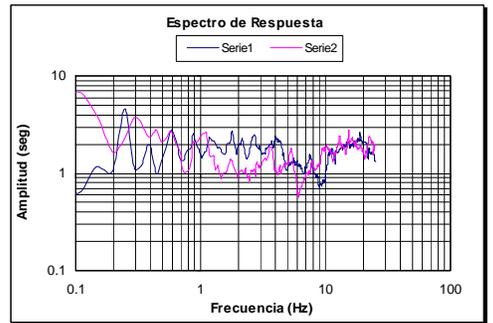
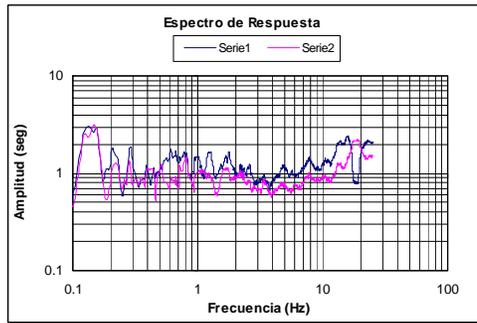
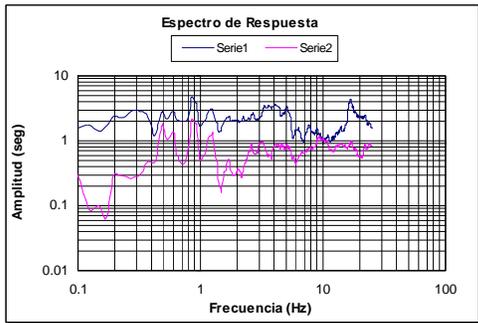
Fraccionamiento La Cruz



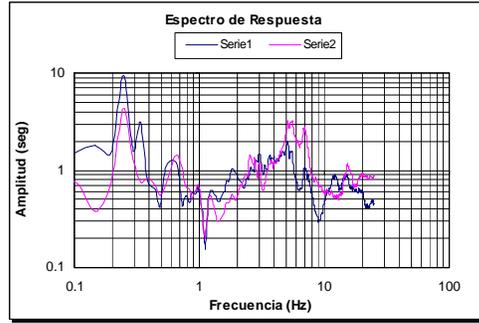
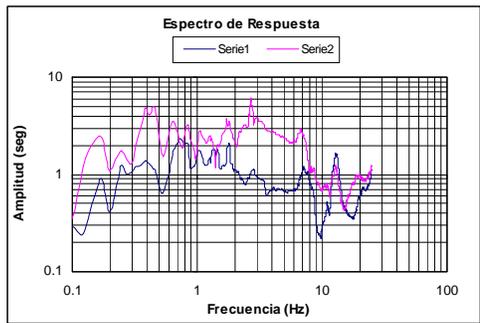
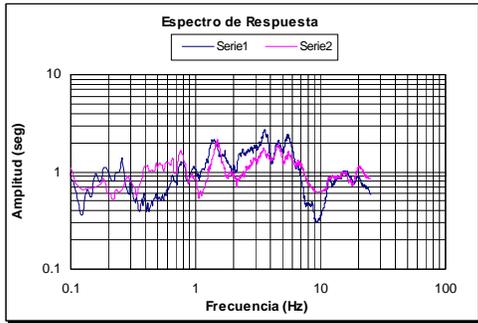
Colonia López Mateos



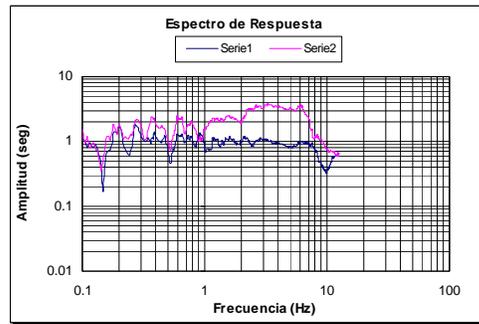
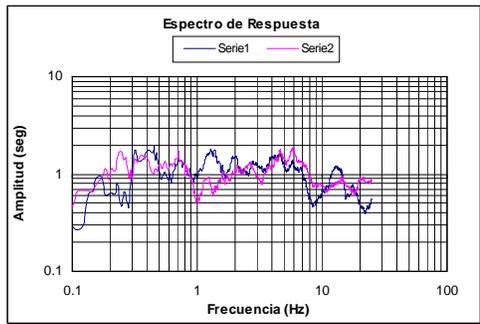
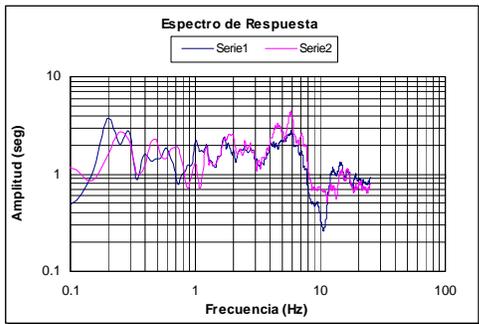
Fraccionamiento Guadalupe



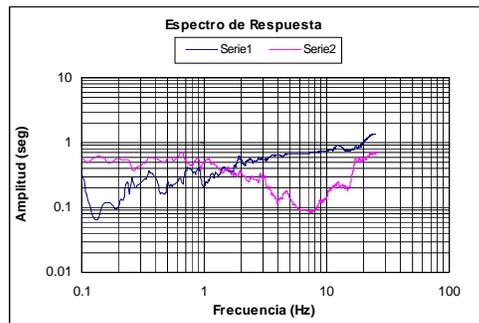
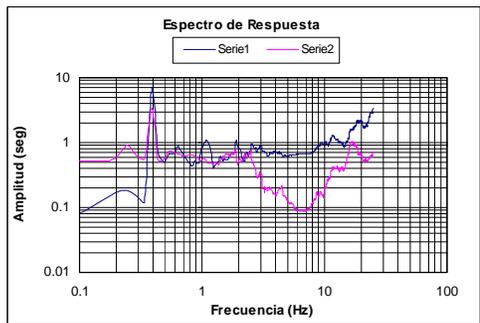
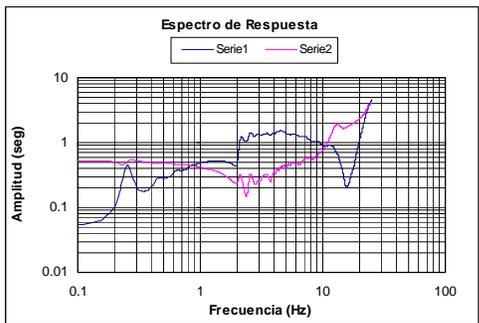
Colonia El Olivo



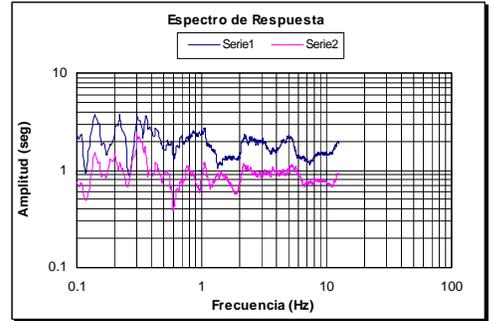
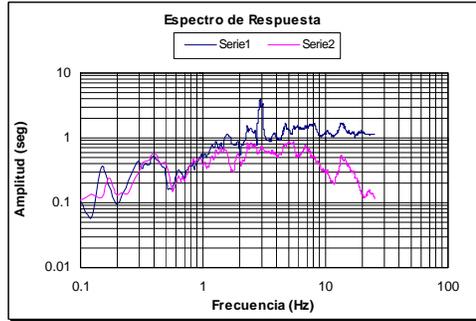
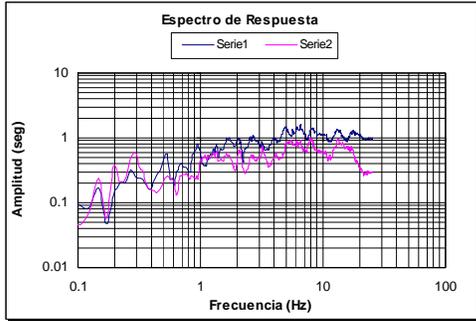
Colonia El Progreso



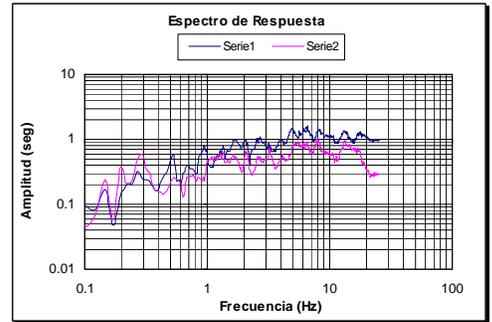
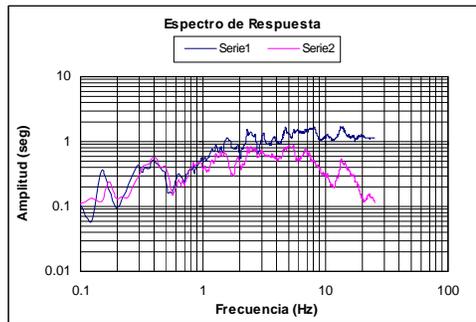
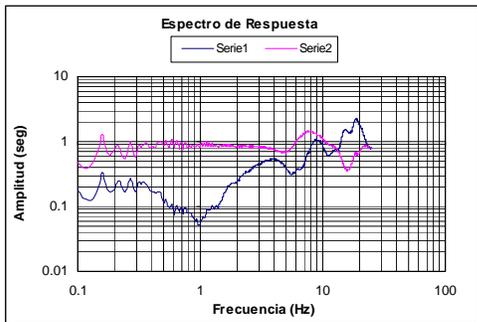
Unidad Deportiva



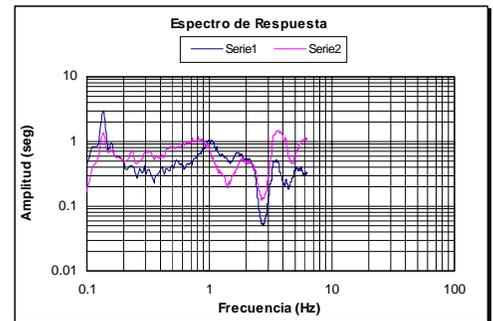
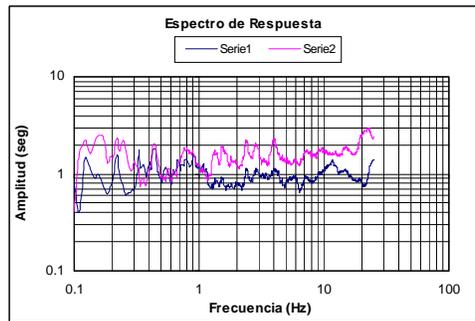
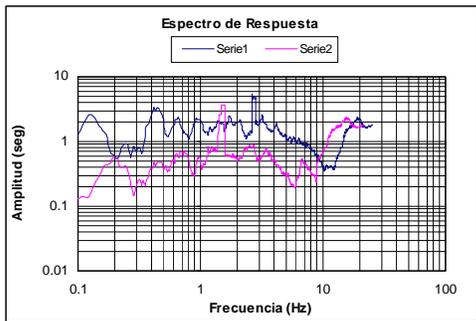
Colonia Sopena



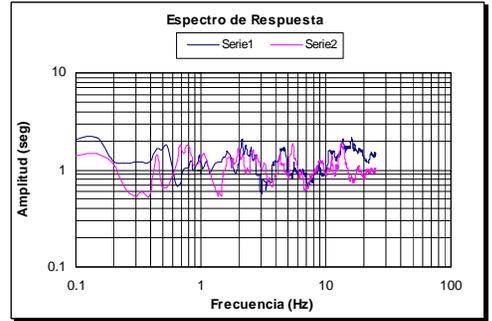
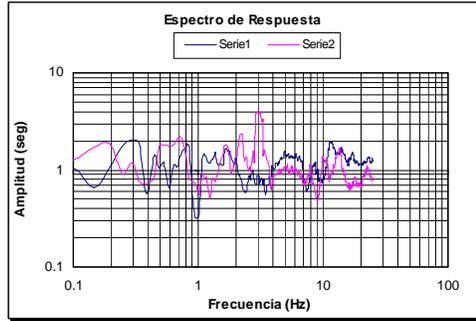
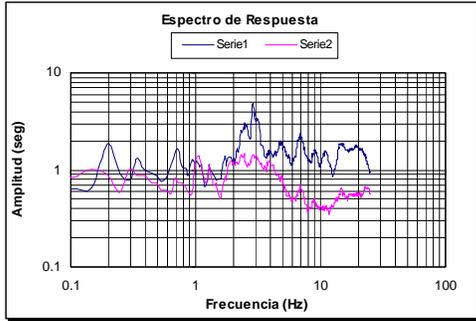
Fraccionamiento Valle de San José



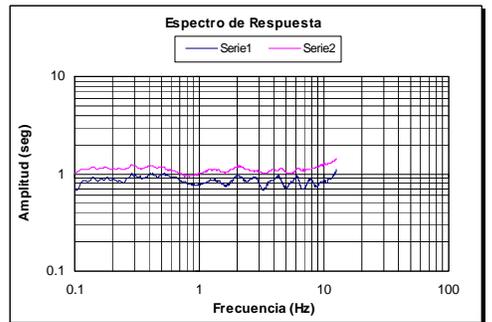
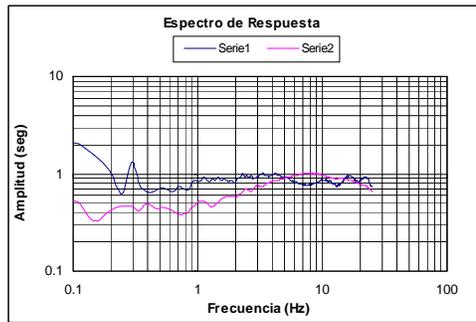
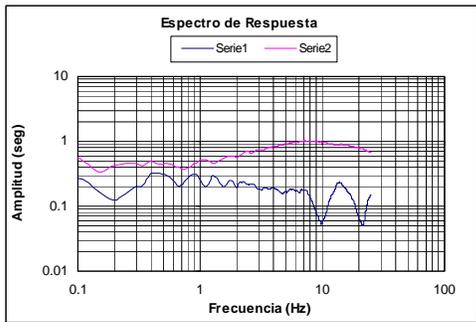
General Motors



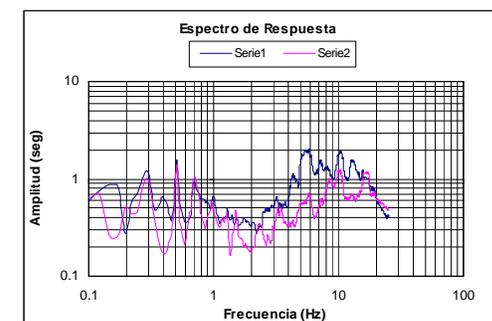
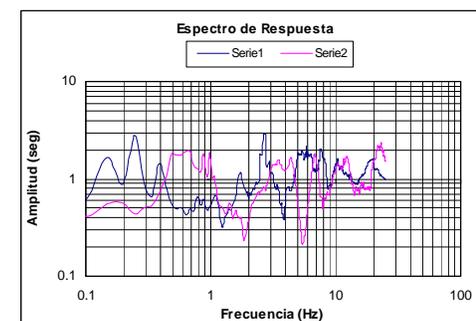
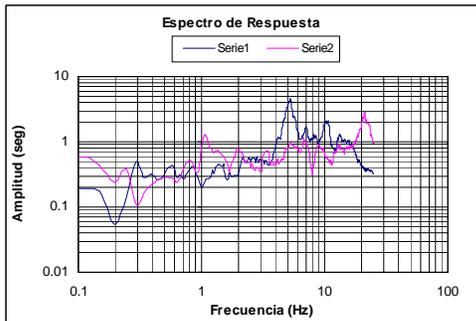
General Motors 1



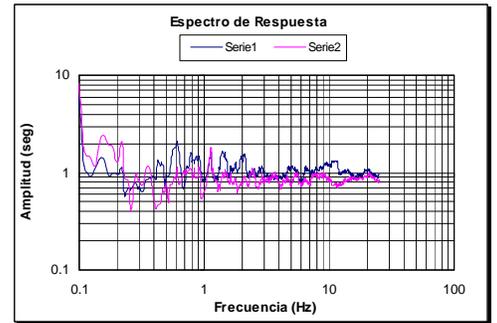
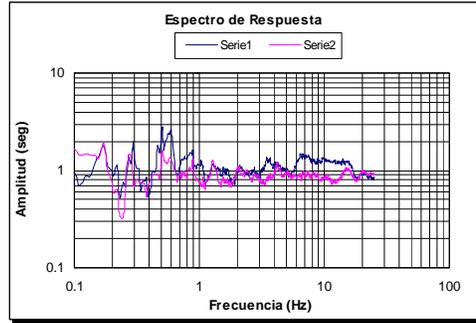
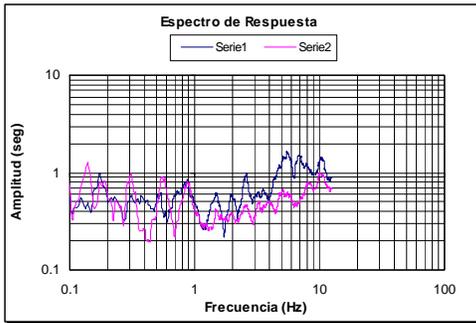
Cubilete



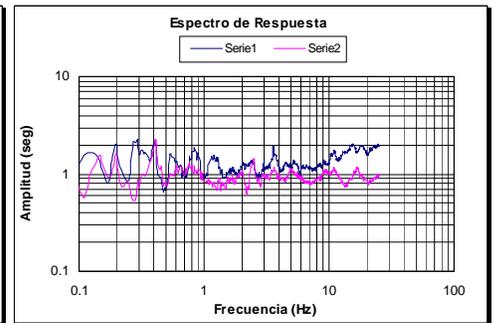
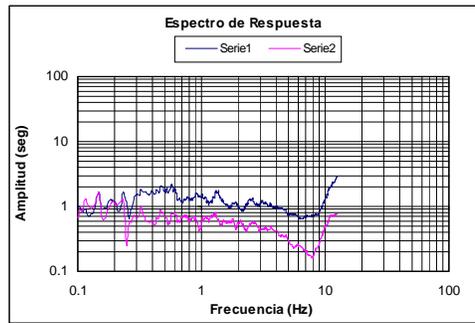
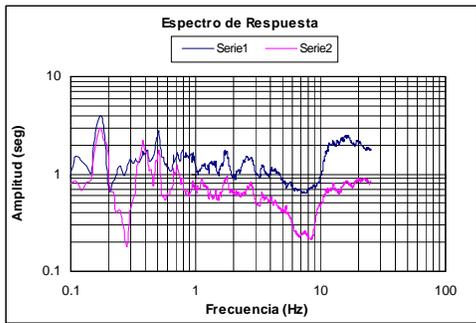
FIPASI



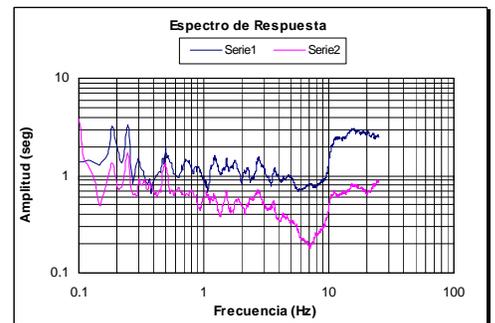
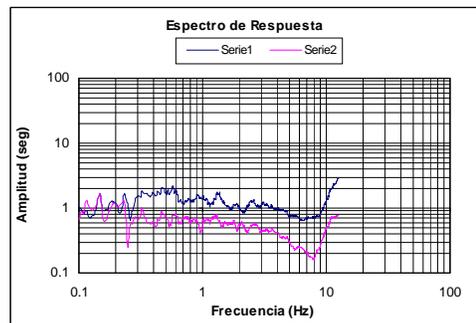
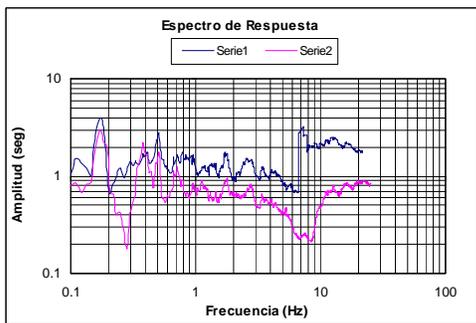
Las Colinas



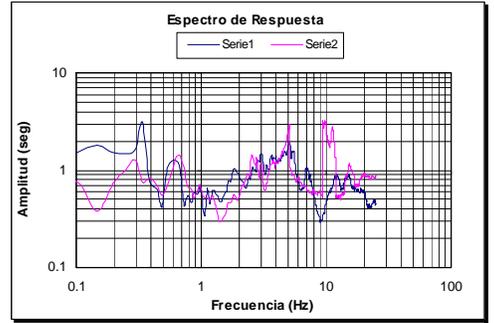
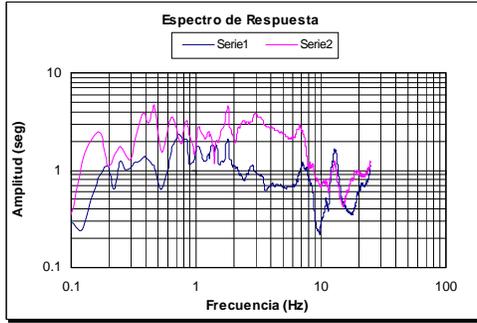
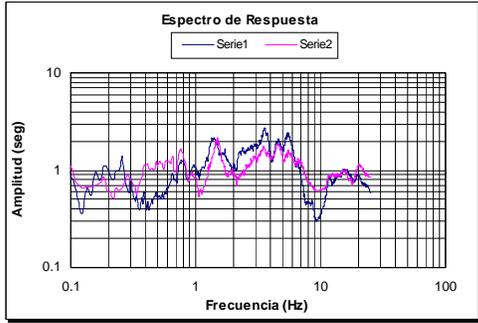
Planta SMC



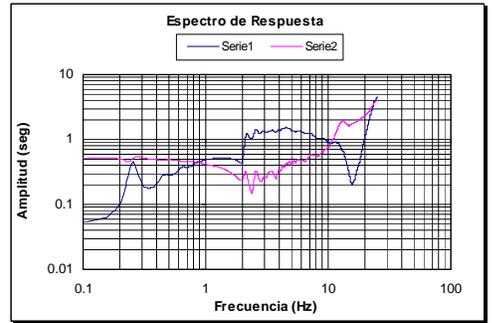
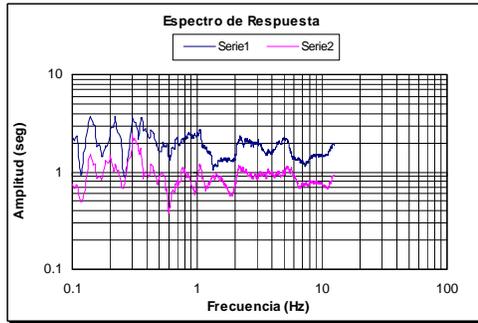
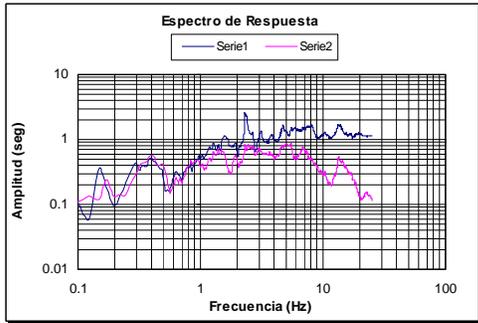
Aeropuerto



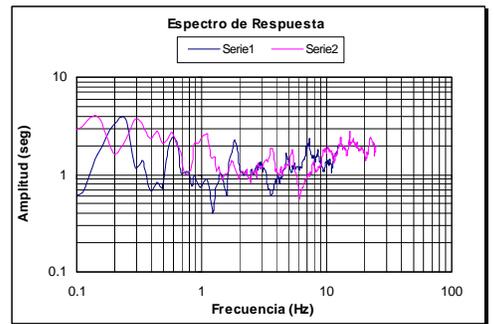
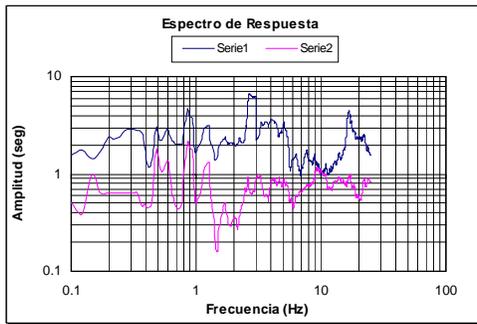
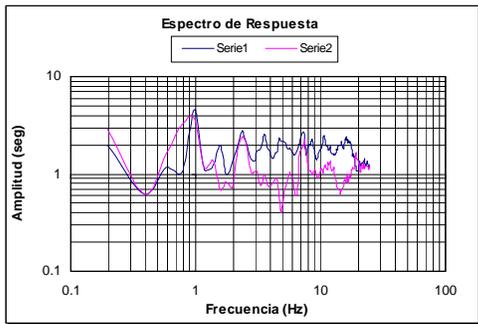
Pabileros



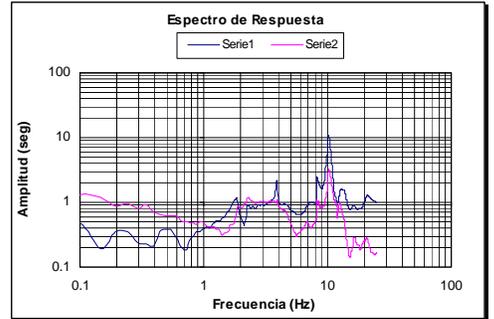
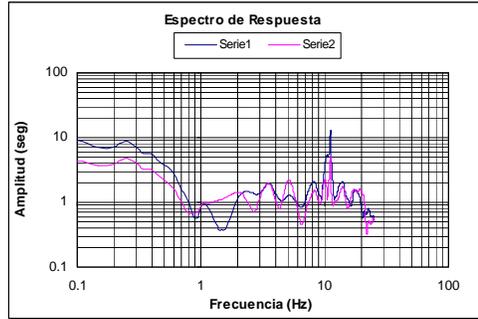
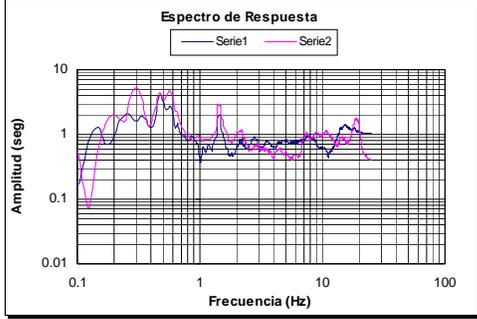
La Aldea



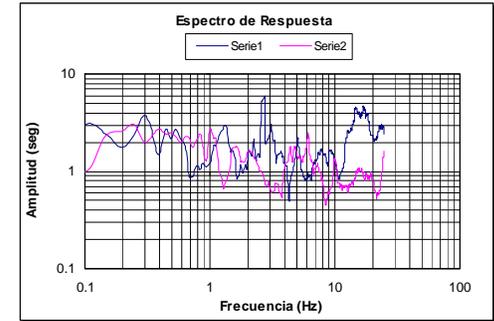
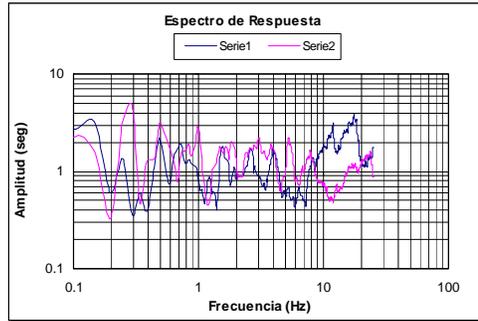
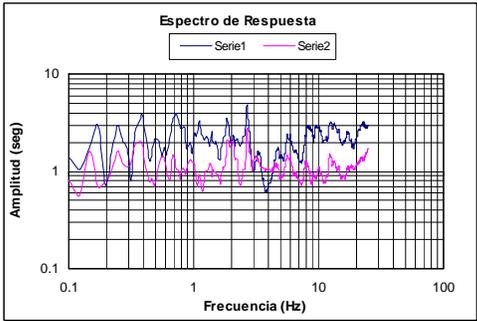
Nuevo Refugio



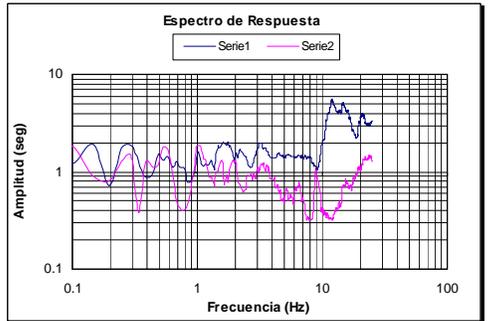
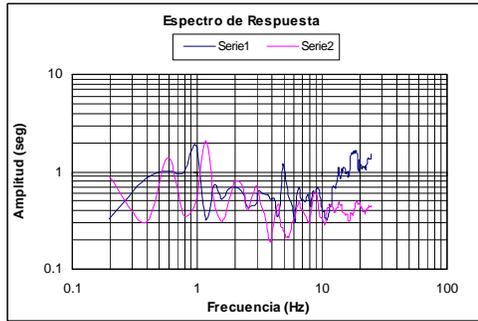
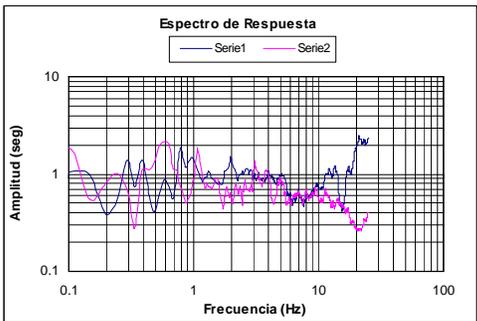
Vallejos



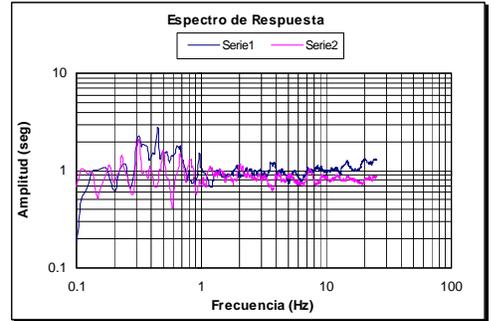
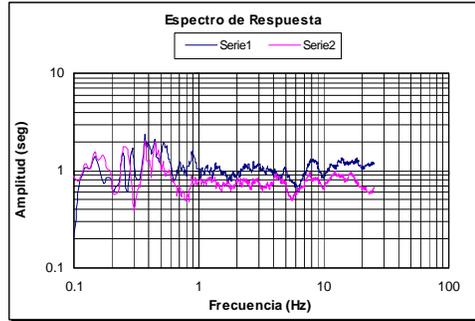
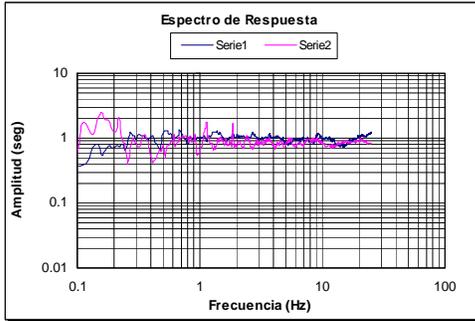
Planta CONDUMEX



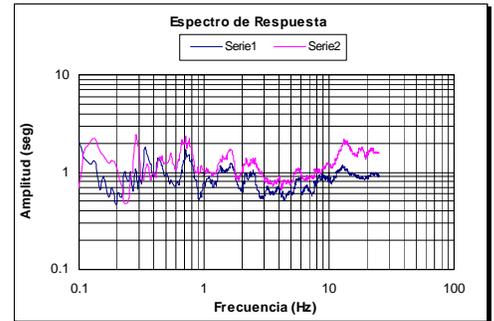
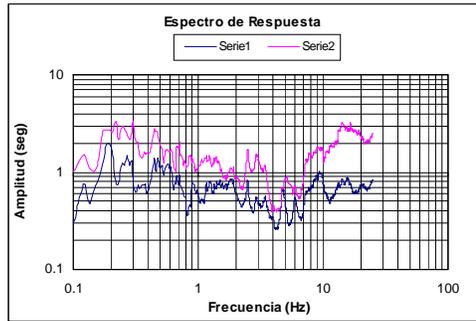
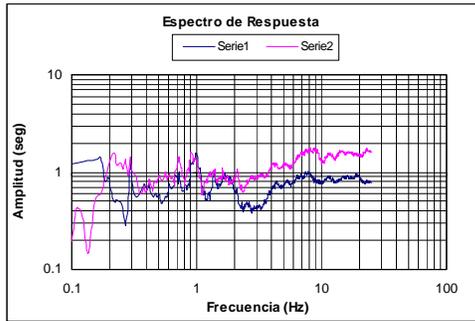
Bajío de Bonillas



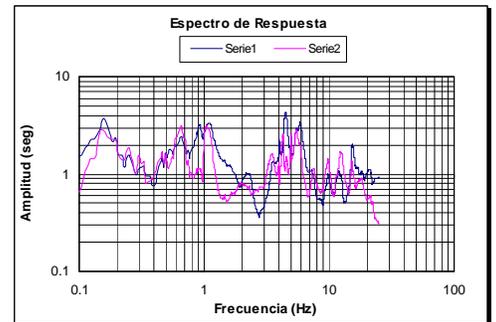
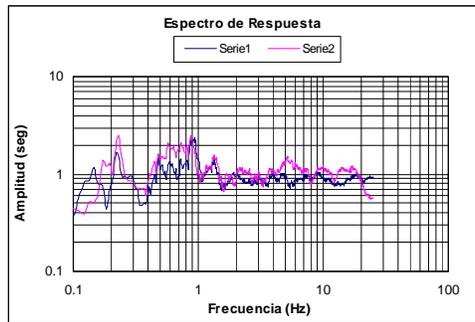
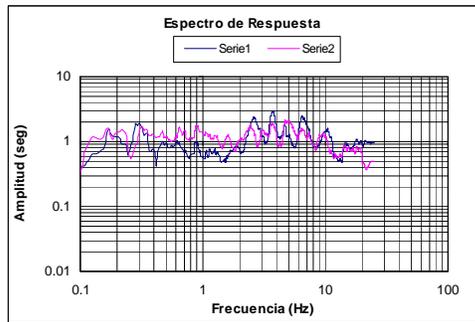
Franco



Colonia Nuevo México



El Coecillo



APENDICE 2

PLANOS

ESTRUCTURA URBANA

CARTA GEOHIDROLOGICA

PUNTOS INSTRUMENTADOS

CARTA DE ISOPERIODOS CON GEOLOGIA

CARTA DE MICROZONACION SISMICA