

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE DIVISIÓN
DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE
INGENIERÍA CIVIL**



**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA LAS ZONAS 2 Y 4
EMPLEANDO EL MÉTODO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V (MÉTODO DE
NAKAMURA) DE LA CABECERA DEPARTAMENTAL DE SAN
MARCOS**

JULIO ARMANDO BRAVO NAVARRO

QUETZALTENANGO, MAYO DE 2018

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE GRÁFICAS	IX
GLOSARIO	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS.....	1
1.1 Municipio de San Marcos.....	1
1.2 Ubicación y localización geográfica.....	1
1.3 Extensión territorial	1
1.4 Límites y colindancias territoriales.....	1
1.5 Ubicación de zonas de estudio.....	2
1.6 Población	3
1.7 Sismología	3
1.8 Sismo	3
1.9 Tipos de sismos	3
1.9.1 Sismo de origen tectónico	4
1.9.2 Sismo de origen volcánico	4
1.9.3 Sismo de origen artificial	4
1.10 Causa de los sismos	4
1.11 Teoría de la tectónica de placas	5
1.11.1 Teoría de placas en la zona de estudio	9
1.12 Fallas geológicas.....	10
1.12.1 Tipos de falla.....	11
1.13 Premonitorios y réplicas	15
1.14 Importancia del estudio de los sismos	15
1.15 Hipocentro, epicentro y ondas sísmicas.....	16

II

1.15.1	Hipocentro.....	16
1.15.2	Epicentro.....	16
1.15.3	Ondas sísmicas.....	16
1.15.4	Ondas internas o de cuerpo.....	17
1.15.5	Ondas superficiales.....	18
1.16	Riesgo, amenaza y vulnerabilidad.....	19
1.17	Medidas de los sismos.....	21
1.17.1	Intensidad.....	21
1.17.2	Magnitud.....	22
1.18	Sismicidad en Guatemala.....	24
1.19	Sismicidad y niveles de protección sísmica.....	27
1.20	Zonificación sísmica para la República de Guatemala.....	28
1.21	Terremotos históricos de Guatemala.....	28
1.22	Sismos recientes que han afectado a la ciudad de San Marcos.....	35
CAPÍTULO 2	.....	37
MÉTODO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V	.....	37
2.1	Método de Nakamura.....	37
2.2	Ruido sísmico ambiental.....	40
2.3	Transformada de Fourier (Amplitudes Espectrales).....	42
2.4	Función de transferencia empírica.....	42
2.5	Microzonificación sísmica.....	42
2.6	Instrumentación.....	43
2.7	Software.....	45
CAPÍTULO 3	.....	47
UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V (MÉTODO DE NAKAMURA) EN LAS ZONAS 2 Y 4.	.....	47
3.1	Identificación de los puntos.....	47
3.2	Toma de registros.....	49
3.2.1	Ubicación de puntos.....	49
3.2.2	Medición de ruido ambiental.....	53
3.3	Estudio de datos.....	55
3.3.1	Análisis de componentes de archivo.....	55

3.3.2	Uso del método de razón espectral H/V (Método de Nakamura)	55
3.3.2.1.	Corrección de línea base	55
3.3.2.2.	Selección de ruido estable.....	55
3.3.2.3.	Eliminación del ruido puntual.....	55
3.3.2.4.	Cálculo de espectro de Fourier	55
3.3.2.5.	Cálculo de cocientes (H/V).....	56
3.3.3	Gráficas de razones espectrales.....	57
3.3.4	Creación de tabla de frecuencias.....	59
3.4	Mapa de microzonificación sísmica para las zonas 2 y 4 de San Marcos	61
3.4.1	Interpolación de frecuencias.....	61
3.5	Realización del mapa de microzonificación para las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos	62
3.6	Información útil a Ingeniería Civil	66
3.6.1	Familia de curvas HVSR.....	66
3.6.2	Familia de frecuencias bajas	66
3.6.3	Familia de frecuencias medias	66
3.6.4	Familia de frecuencias altas	66
3.7	Modelos de velocidades invertidos.....	68
3.7.1	Modelos de frecuencias bajas.....	69
3.7.2	Modelo de frecuencias medias	71
3.7.3	Modelo de frecuencias altas	74
3.8	Clasificación de sitio en base a las Normas de Seguridad Estructural	76
3.9	Propuesta de espectro de respuesta.....	77
3.10	Propuestas de espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones en superficie .	79
3.11	Propuestas de espectro de amplificación de sitio.....	84
CAPÍTULO 4	.....	89
CARACTERIZACIÓN DE SUELOS	.....	89
4.1	Mecánica de suelos.....	89
4.1.1	Definición.....	89
4.1.2	Importancia.....	89
4.1.3	Tipos de suelos	89
4.1.4	Características de los suelos.....	90

IV

4.1.5	Calicatas.....	91
4.1.6	Obtención y manejo de muestras de suelo.....	91
4.1.7	Estratigrafía y perfiles estratigráficos.....	92
4.2	Teoría de estudios de laboratorio.....	92
4.2.1	Ensayo de corte directo.....	92
4.2.2	Ensayo de granulometría.....	94
4.2.3	Ensayo de humedad natural del suelo.....	95
4.2.4	Ensayo de gravedad específica.....	95
4.2.5	Ensayo de límites de Atterberg.....	96
4.3	Caracterización de suelos.....	96
4.3.1	Sistema de clasificación de suelos AASHTO.....	97
4.3.2	Sistema de clasificación de suelos SUCS.....	97
CONCLUSIONES.....		101
RECOMENDACIONES.....		103
BIBLIOGRAFÍA.....		105
ANEXOS.....		XVII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de zonas de estudio	2
Figura 2. Analogía de la corteza terrestre con la cascara de un huevo	6
Figura 3. Modelo de las placas de la Tierra.....	6
Figura 4. Placas tectónicas alrededor del mundo	7
Figura 5. Movimiento de las placas, (a) expansión, (b) subducción	8
Figura 6. Placas tectónicas que interactúan en Guatemala	9
Figura 7. Falla de San Andrés	10
Figura 8. Orientación y desplazamientos de los tipos básicos de fallas	12
Figura 9. Falla geológica normal, genera esfuerzos de tensión	12
Figura 10. Falla geológica inversa, genera esfuerzos de compresión	13
Figura 11. Falla geológica de desgarradura, genera esfuerzos de corte	13
Figura 12. Fallas geológicas de Guatemala	14
Figura 13. Idealización geométrica en la relación de fuente y sitio	17
Figura 14. Deformaciones producidas por las ondas de un cuerpo: (a) onda P, (b) onda S	18
Figura 15. Deformaciones producidas por las ondas superficiales (a) Onda Rayleigh, (b) Onda Love	19
Figura 16. Mapa de macro zonificación sísmica	25
Figura 17. Zonas predominantes de sismos	26
Figura 18. Aceleraciones en m/seg/seg esperadas al menos, una vez en cincuenta años	27
Figura 19. Zonificación sísmica para la República de Guatemala	29
Figura 20. Fuentes de origen natural y artificial que originan ruido ambiental	41
Figura 21. Evento sísmico registrado	41
Figura 22. Señal de ruido ambiental	42
Figura 23. Acelerógrafo Altus Kinematics K2.....	44
Figura 24. Acelerógrafo Altus Kinematics K2 propiedad de la División de Ciencias de Ingeniería CUNOC	44
Figura 25. GPS Garmin eTrex 10.....	45
Figura 26. Grilla propuesta para la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos	47
Figura 27. Grilla propuesta para la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos	48

Figura 28. Ubicación de puntos de medición de señales de ruido sísmico para la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos.....	52
Figura 29. Ubicación de puntos de medición de señales de ruido sísmico para la zona 4 de la cabecera departamental de San Marcos.....	52
Figura 30. Ejemplo de señal estable cortada, punto 22 zona 4 San Marcos	56
Figura 31. Ventana resultante en programa Degtra A4 luego del cálculo de espectros de Fourier	56
Figura 32. Ventana resultante luego del cálculo de una función de transferencia (Razón espectral)	57
Figura 33. Mapa de microzonificación sísmica de la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos	62
Figura 34. Mapa de microzonificación sísmica, con valores de frecuencia de la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos.....	63
Figura 35. Mapa de microzonificación sísmica de la zona 4 de la cabecera departamental de San Marcos	64
Figura 36. Mapa de microzonificación sísmica, con valores de frecuencia de la zona 4 de la cabecera departamental de San Marcos.....	65
Figura 37. Ubicación de calicatas, zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos	92
Figura 38. Perfiles estratigráficos pozos	93
Figura 39. Obtención y manejo de muestras zona 2 de San Marcos.....	94
Figura 40. Detalle del ensayo de corte directo y la caja de corte	97
Figura 41. Ensayo de granulometría.....	98
Figura 42. Ensayo humedad natural del suelo.....	98
Figura 43. Ensayo gravedad específica	99
Figura 44. Ensayo límites de Atterberg.....	99

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Orientación de acelerógrafo Altus Kinematics K2	53
Fotografía 2. Acelerógrafo, registrando medición de ruido ambiental.....	53
Fotografía 3. Mediciones zona 2, cabecera departamental de San Marcos	54
Fotografía 4. Mediciones zona 4, cabecera departamental de San Marcos	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de las escalas de magnitud	23
Tabla 2. Macrozonificación sísmica Guatemala.....	24
Tabla 3. Niveles de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño.....	28
Tabla 4. Georreferencia de puntos estudiados de la zona 2, San Marcos.....	49
Tabla 5. Georreferencia de puntos estudiados de la zona 4, San Marcos.....	50
Tabla 6. Segmento de tabla de ordenamiento de datos de razones espectrales	57
Tabla 7. Frecuencias generadas y frecuencia promedio de cada punto de estudio zona 2 cabecera departamental de San Marcos.....	59
Tabla 8. Frecuencias generadas y frecuencia promedio de cada punto de estudio zona 4 cabecera departamental de San Marcos.....	60
Tabla 8. Guía de clasificación de sitio según NSE 2-10	76
Tabla 9. Clasificación de sitio en base a microzonificación y NSE	76
Tabla 10. Datos característicos de eventos utilizados para obtener gráficas espectrales	78

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Ejemplo de grafica de Razón Espectral (2da. medición punto 22, zona 2).....	58
Gráfica 2. Familia de frecuencias bajas.....	67
Gráfica 3. Familia de frecuencias medias.....	67
Gráfica 4. Familia de frecuencias altas.....	68
Gráfica 5. Curva promedio de familia de curvas con frecuencias bajas.....	69
Gráfica 6. Curva de comparación de FTT y FTE de la familia de curvas con frecuencias bajas	70
Gráfica 7. Modelos de velocidad de onda de corte propuestos para microzonas con frecuencias bajas.....	71
Gráfica 8. Curva promedio de familia de curvas con frecuencias medias.....	72
Gráfica 9. Curva de comparación de FTT y FTE de la familia de curvas con frecuencias medias.....	72
Gráfica 10. Modelos de velocidad de onda de corte propuestos para microzonas con frecuencias medias.....	73
Gráfica 11. Curva promedio de familia de curvas con frecuencias.....	74
Gráfica 12. Curva de comparación de FTT y FTE de la familia de curvas con frecuencias altas	75
Gráfica 13. Modelos de velocidad de onda de corte propuestos para microzonas con frecuencias altas.....	75
Gráfica 14. Acelerograma del evento WittierNarrows.....	78
Gráfica 15. Acelerograma del evento Mammothlake.....	78
Gráfica 16. Acelerograma del evento Northridge.....	79
Gráfica 17. Acelerograma del evento Northridge 2.....	79
Gráfica 18. Acelerograma del evento Nahnni.....	79
Gráfica 19. Espectros de superficie para microzona de frecuencias altas.....	80
Gráfica 20. Espectros de superficie promedio para microzona de frecuencias altas.....	81
Gráfica 21. Espectros de superficie para microzona de frecuencias medias.....	81
Gráfica 22. Espectros de superficie promedio para microzona de frecuencias medias.....	82
Gráfica 23. Espectros de superficie para microzona de frecuencias bajas.....	82
Gráfica 24. Espectros de superficie promedio para microzona de frecuencias bajas.....	83

Gráfica 25. Comparación de espectros de respuesta promedio por microzona sísmica	83
Gráfica 26. Amplificación espectral para eventos analizados en frecuencias altas	84
Gráfica 27. Amplificación espectral promedio para microzona de frecuencias altas	85
Gráfica 28. Amplificación espectral para eventos analizados en frecuencias medias	85
Gráfica 29. Amplificación espectral promedio para microzona de frecuencias medias	86
Gráfica 30. Amplificación espectral para eventos analizados en frecuencias bajas	86
Gráfica 31. Amplificación espectral promedio para microzona de frecuencias bajas	87
Gráfica 32. Comparación de espectros de amplificación promedio por microzona sísmica	87

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).
Acelerograma	Es una representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un terremoto.
AGIES	Asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica.
Densidad	Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.
Estratos	Capas de rocas agrupadas en formaciones.
Esfuerzo	Es la resistencia que ofrece un área unitaria (A) del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa (fuerza, F).
Fallas	Se llama fallas, cuando en las fracturas, fisuras o diaclasas se ha efectuado un desplazamiento apreciable.
FTE	Función de transferencia empírica.
FTT	Función de transferencia teórica.
Geofísica	Parte de la geología que estudia la estructura y composición de la Tierra y los agentes físicos que la modifican.
Geología	Ciencia que estudia la composición y estructura interna de la Tierra, y los procesos por los cuales ha ido evolucionando a lo largo del tiempo geológico.
HVSR	Razón espectral H/V.
INE	Instituto Nacional de Estadística.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Latitud	Es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado en la tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto.
Longitud	Es la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano base, medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto.

XII

Magma	Mezcla líquida, sólida y gaseosa de silicatos, generada por la fusión de las rocas que se encuentran en el interior de la tierra entre los 20 a 300 Km. de profundidad.
Microzonificación	Pequeñas zonas dentro de una zona urbana que presenta similar comportamiento sísmico
Muestra	Porción o parte extraída de un producto que sirve para conocer la calidad del género, que permite considerarla representativa de él.
NSE	Norma de seguridad estructural (en Guatemala)
Norma	Documento establecido por consenso y aprobado por organismo conocido, que proporciona, para uso común y repetido, reglas, directrices o características para actividades o sus resultados, con el fin de conseguir un grado óptimo de orden en un contexto dado.
Placa tectónica	Fragmento de la litósfera que se mueve como bloque rígido sin que ocurra deformación interna sobre la astenósfera.
Plasticidad	Propiedad que presentan los suelos de poder deformarse hasta cierto límite.
UNDRO	United Nations Disaster Relief Organization (Oficina de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre).
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).
Sedimento	Depósito o acumulación de materiales arrastrados mecánicamente por las aguas o el viento.
Sismicidad	Es el estudio de los sismos que ocurren en algún lugar en específico.
Zonificación	Indica la división de un área geográfica en sectores heterogéneos ya que conforme a ciertos criterios; como capacidad productiva, tipo de construcciones permitidas, intensidad de una amenaza, grado de riesgo, etc.

INTRODUCCIÓN

En los años 2012, 2013 y 2014 ocurrieron sismos en el departamento de San Marcos los cuales afectaron estructuralmente la mayoría de viviendas y edificios de la cabecera departamental, con estructuras las cuales colapsaron o quedaron con daños leves, estos sismos dejan al descubierto la vulnerabilidad que existe en las edificaciones empíricas, que carecen de un diseño sismo resistente y presentan deficiencias constructivas, por tal motivo es necesario contemplar diversos factores que puedan ayudar para tener una normativa que sirva como parámetro para regular las construcciones futuras de esta cabecera departamental de San Marcos.

La sismicidad en Guatemala se divide en macro zonas de amenazas sísmicas, con valores definidos; por lo cual, es de un valor importante el estudio de microzonificación sísmica, el cual trabajó en puntos específicos de la cabecera departamental de San Marcos en sus zonas 2 y 4 respectivamente.

El estudio de microzonificación sísmica establece zonas de suelos con similar comportamiento, agrupándolas de acuerdo a familias de frecuencias, cada una por punto. Los resultados contenidos en un mapa que ayuda al diseño sismo resistente, datos que con un proceso de trabajo tiene como resultado la clasificación del suelo, con base a la norma AGIES NSE 2-10 demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección. Con este tipo de estudios se puede adelantar la planificación y desarrollo urbanístico. Antes de dar inicio al proyecto de microzonificación sísmica en las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos se instruyó sobre el tema y después de haber realizado el proyecto se compartió cada uno de los resultados con la dirección de planificación municipal y estudiantes de la carrera de ingeniería civil del centro universitario de San Marcos.

No se cuenta con la tecnología que ayude a predecir, pero sí se puede disminuir de forma considerable los efectos de un terremoto, una es estudiando de manera adecuada cualquier tipo de amenaza sísmica, contando con estudios, en este caso el comportamiento del suelo, que ayuda a definir tanto la acción en el diseño de nuevas estructuras como en el sitio donde pueden ser construidas. Se sabe que la señal sísmica se modifica debido a las condiciones geológicas y

XIV

topográficas del lugar, lo cual se conoce como efecto de sitio, estas condiciones alteran dicha señal sísmica en varias magnitudes.

Los diversos desastres naturales provocados por diferentes tipos de fenómenos naturales, dejan diversas pérdidas tanto económicas, materiales y humanas. Existen algunos fenómenos que pueden ser pronosticados para poder así prepararse para enfrentarlos de manera adecuada. En el caso de los fenómenos sísmicos México cuenta con un sistema de alerta sísmica que ayuda a preparar a la población ante un evento sísmico con una anticipación de 50 segundos. En Guatemala específicamente en el departamento de San Marcos y su cabecera no se cuenta con este tipo de alertas que ayude a la predicción de movimientos, los cuales representan manifestaciones naturales que demuestran potencial destructor.

Se realizó la ampliación de la caracterización de suelos realizada en puntos específicos de la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos, siendo necesario hacer calicatas en lugares definidos con previa autorización, esto para la extracción de muestras alteradas e inalteradas, para luego ser llevadas a laboratorio para la realización de los ensayos propuestos y su debida clasificación.

OBJETIVOS

GENERAL:

Contribuir con la realización del estudio de microzonificación sísmica para las zonas 2 y 4 empleando el método de razón espectral H/V (Método de Nakamura) en la cabecera departamental de San Marcos.

ESPECIFICOS:

- Realizar el método de razón espectral (Método de Nakamura) de forma detallada en las zonas 2 y 4 de la cabecera de San Marcos.
- Establecer el comportamiento de los suelos en diversos puntos de las zonas 2 y 4 de la cabecera de San Marcos.
- Elaborar los mapas de microzonificación sísmica para las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos.
- Establecer cada uno de los puntos de obtención de datos, dejarlos indicados y georreferenciados con coordenadas UTM en las zonas 2 y 4 de la cabecera de San Marcos.
- Capacitar al inicio y final de la realización del estudio al personal de la dirección municipal de planificación sobre el tema de microzonificación sísmica.
- Capacitar al inicio y al final de la realización del estudio a los estudiantes de la carrera de ingeniería civil del centro universitario de San Marcos sobre el tema de microzonificación sísmica.
- Realizar la ampliación de la caracterización de suelos de la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS

1.1 Municipio de San Marcos

La cabecera departamental de San Marcos posee el mismo nombre, forma parte de los 340 municipios de la República de Guatemala, considerado como un municipio de primera categoría dentro del territorio de Guatemala. Según Municipalidad de San Marcos (s.f.) el poblado fundado el 25 de abril de 1,533 por un contingente al mando del Capitán Juan de León Cardona, esto con el fin de extender dominios, algunos de los poblados de San Marcos en sus inicios se asentaron sobre pueblos prehispánicos que ya estaban ubicados en el área, tal es el caso de San Pedro Sacatepéquez que cabe mencionar fue la primera cabecera departamental. Por consecuencia de los terremotos provocados por el volcán Santa María en 1902, los municipios de San Marcos y San Pedro Sacatepéquez fueron destruidos. Fue con el acuerdo gubernativo No. 624 donde el gobierno ordenó la reconstrucción de estos, dando paso a la creación de la ciudad de La Unión, declarado de necesidad y utilidad pública el 16 de diciembre de 1935, se forma el municipio de San Marcos La Unión y se nombra a San Marcos como cabecera nuevamente.

1.2 Ubicación y localización geográfica

La cabecera departamental de San Marcos pertenece a la región VI suroccidental de la República de Guatemala, se encuentra localizada 14° 57' 40" latitud Norte y 91° 47' 44" longitud oeste, encontrándose a una distancia de 252 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala. Cuenta con una altitud media de 2,398 msnm equivalente a 7,867 pies.

1.3 Extensión territorial

San Marcos cabecera tiene una extensión territorial de 121 kilómetros cuadrados. El municipio cuenta con una ciudad, la cual esta subdividida en seis cantones, una colonia residencial, 16 aldeas y 23 caseríos que forman parte del área rural, datos con base al instituto nacional de estadística 2002.

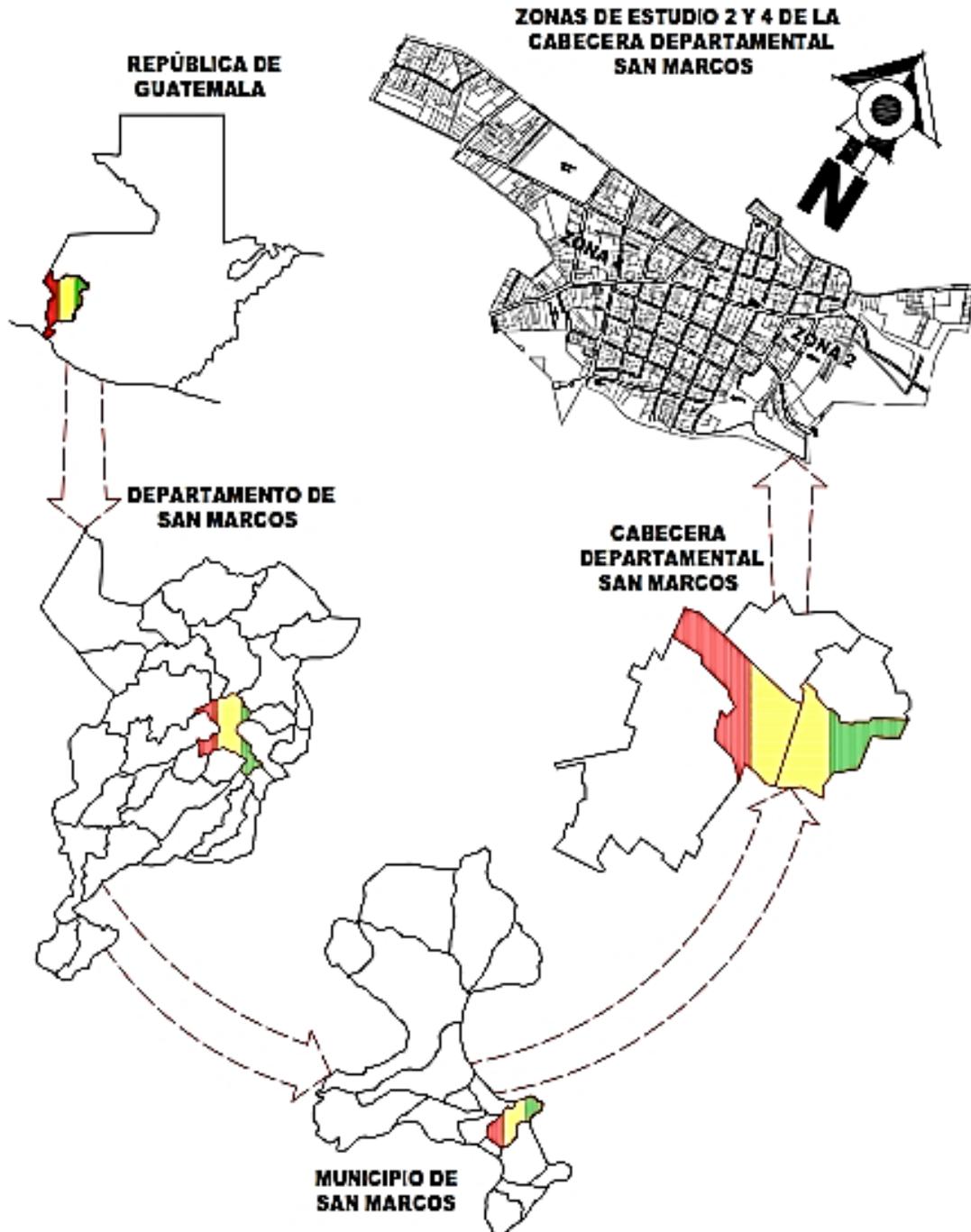
1.4 Límites y colindancias territoriales

El departamento de San Marcos limita al Norte con el departamento de Huehuetenango, al sur con Retalhuleu y el Océano Pacífico, al Este con el departamento de Quetzaltenango y al Oeste con el estado de Chiapas que pertenece a la República de México. La cabecera

departamental de San Marcos colinda con los municipios de San Pedro Sacatepéquez, Tajumulco, San Lorenzo, San Pablo, Esquipulas Palo Gordo.

1.5 Ubicación de zonas de estudio

Figura 1. Ubicación de zonas de estudio



Fuente: Autor

1.6 Población

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística el departamento de San Marcos (2013), según las proyecciones de población, el número de habitantes del departamento fue de 1,070,215, representando así el 6.9% de la población total, estimada para el año 2013 en 15,438,383. La población creció 2.45% entre 2012 y 2013, porcentaje superior a la tasa de crecimiento nacional, la cual fue de 2.32%. Teniendo en cuenta que del total de la población, 48.8 % son hombres y 51.2 % son mujeres. Basado en INE (s.f.) para la fecha 30 de junio de 2018 la estimación de población es de 1,199,615 en el departamento de San Marcos, pero específicamente en la cabecera departamental la estimación de población es de 62,122 personas.

1.7 Sismología

La sismología forma parte de la Geofísica, esta se enfoca en el estudio de la tierra pero de manera directa sobre los fenómenos sísmicos. Se utiliza el registro del movimiento del suelo producido por un sismo esto para determinar el origen y propagación de la onda sísmica. El estudio de la sismología involucra el análisis de los tipos de vibraciones, tales como vibraciones naturales del suelo y señales sísmicas generadas de forma artificial. Un aporte de la sismología ha sido de ayuda a la comprensión de la tectónica de las placas, la estructura interior de la tierra y también la predicción de sismos contando con la tecnología adecuada.

1.8 Sismo

Aunque existen diversas teorías sobre las posibles causas que generan los sismos, la más aceptable es la de placas tectónicas que explica el comportamiento de la superficie terrestre, proponiendo que en los primeros 100 Km. de la superficie existe un comportamiento como un material rígido, quebradizo y un poco denso, denominado litósfera. Se le denomina sismo a cualquier movimiento repentino del terreno o litósfera que libera energía. Sismo o seísmo, aunque también se le suele llamar terremoto o temblor en algunas ocasiones, se debe de tener en cuenta que hay una diferencia, ya que terremoto es un sismo grande o macro sismo que provoca daños considerables, mientras que un temblor es un movimiento telúrico pequeño.

1.9 Tipos de sismos

Los sismo pueden clasificarse con base a su origen, estos pueden ser de origen tectónico, volcánico y artificial. Estos últimos producidos debido al derrumbamiento de techos, cavernas o minas y solo son percibidos en áreas reducidas.

1.9.1 *Sismo de origen tectónico*

Estos sismos se producen por el desplazamiento repentino de las placas tectónicas a lo largo de las fracturas llamadas “fallas”. Estos movimientos bruscos liberan el esfuerzo al que están sometidas las rocas corticiales. El esfuerzo se acumula localmente por diversas causas hasta que supera la resistencia de las rocas, que es cuando ocurre la ruptura o deslizamiento a lo largo de las fracturas.

El disparo sísmico o choque se traduce en una gran liberación de energía, esto seguido algunas veces de un rebote elástico. Los sismos tectónicos pueden ser interplaca producidos por rupturas de grandes dimensiones en la zona de contacto entre placas tectónicas, o bien en las zonas internas de las placas tectónicas llamados sismos intraplaca. Estos sismos son considerados los más devastadores, por ende generan mayor interés dentro de la ingeniería.

1.9.2 *Sismo de origen volcánico*

Son aquellos que acompañan o anuncian erupciones volcánicas, las cuales son ocasionadas principalmente por el fracturamiento de rocas debido al movimiento del magma. Los temblores se originan a causa de la subida de magma, llenando cámaras internas del volcán, los cuales tienden a cambiar la orografía por los deslizamientos de las fallas; lo cual da como resultado en elevación o descenso de niveles de agua. Este tipo de sismo generalmente no llega a ser más grandes que los de origen tectónico.

1.9.3 *Sismo de origen artificial*

En este caso el hombre puede provocar este tipo de sismos mediante diversas actividades, tal como el relleno de nuevos depósitos, la detonación subterránea de explosivos atómicos, o el bombeo profundo de fluidos en la tierra mediante pozos.

1.10 Causa de los sismos

El origen de los sismos se ha asignado a varias causas a lo largo de la historia. En varios casos, estas explicaciones se vinculan a las creencias religiosas por cada pueblo, todos con diferencias. Algunos han sido atribuidos a la acción de los dioses (un ejemplo, a Poseidón en la

teogonía griega), o la lucha entre deidades maléficas y protectoras. No faltan los intentos de explicación científica. No obstante la consideración de un sismo como la respuesta elástica a fenómenos geológicos ya fue anunciada por Hooke en su “Discurso sobre los sismos” (1668), a principios del siglo antepasado se considera que se inició el planteamiento moderno.

El planteamiento moderno se da cuando los sismos comienzan a vincularse con fallas geológicas observables en el terreno. Von Humboldt parece ser uno de los defensores de este punto de vista, aunque no es compartido por Robert Mallet en su estudio sobre el sismo de Nápoles, trabajo que es considerado pionero de la sismología moderna; ni por Lyell, quien en 1868 describió el fallamiento y la deformación que son producidos por sismos. Para este autor y en continuidad con las teorías del siglo XVII, los sismos tenían origen térmico; como manifestación de un proceso volcánico o como resultado de la contracción y expansión térmicas.

La relación entre los sismos y las fallas geológicas fue abriéndose paso con los años, esto en buena medida gracias a los trabajos de Gilbert en 1884, por eso que a finales del siglo XIX ya era común aceptar que los sismos se originaban por el movimiento relativo de las dos partes de una fractura de la corteza terrestre. A ciencia cierta no se sabe el génesis del sismo, pero varios fenómenos son los causantes que la superficie de la tierra tiemble.

1.11 Teoría de la tectónica de placas

La corteza de la tierra es relativamente delgada. Esta se extiende hasta profundidades de 70 km en los océanos y 150 km bajo los continentes, siendo válida la analogía de comparar el planeta Tierra con un huevo duro (Gere Shah, 1984), en este caso la corteza terrestre tendría el espesor semejante a la cáscara, la cual estaría fracturada en una serie de fragmentos que se conocen con el nombre de placas tectónicas.

En la actualidad la teoría de placas tectónicas es la que tiene mayor aceptación, esta considera que la litósfera es la capa correspondiente a los 100 km que se encuentran de primero en la superficie terrestre, comportándose como un material rígido, quebradizo y poco denso, que descansa sobre una capa de material más denso y fluido denominado astenosfera, con 75 – 100 km de espesor, a una profundidad total desde la superficie de unos 200 km, ver figura 3.

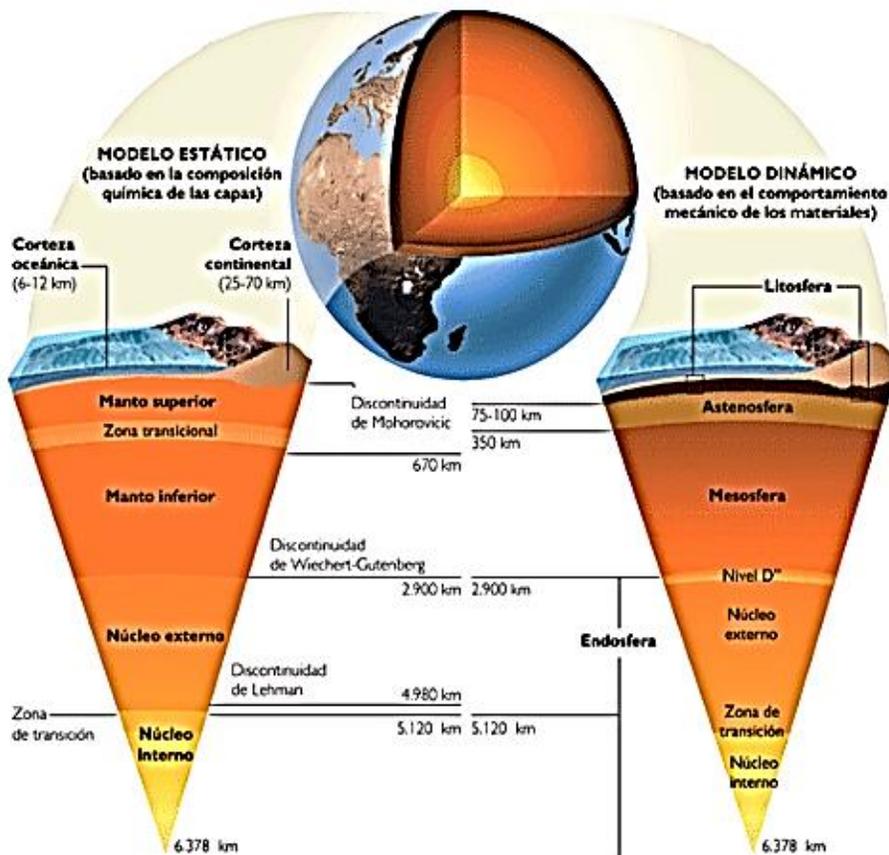
La dirección del movimiento relativo y la composición de las placas definan las características del límite o contacto entre las mismas, estos límites se refieren a la evolución de la forma de la corteza terrestre pueden ser:

Figura 2. Analogía de la corteza terrestre con la cascara de un huevo



Fuente: Corzo, Mario. Base sismológica de Guatemala. p. 5.

Figura 3. Modelo de las placas de la Tierra



Fuente: Corzo, Mario. Base sismológica de Guatemala. p. 6.

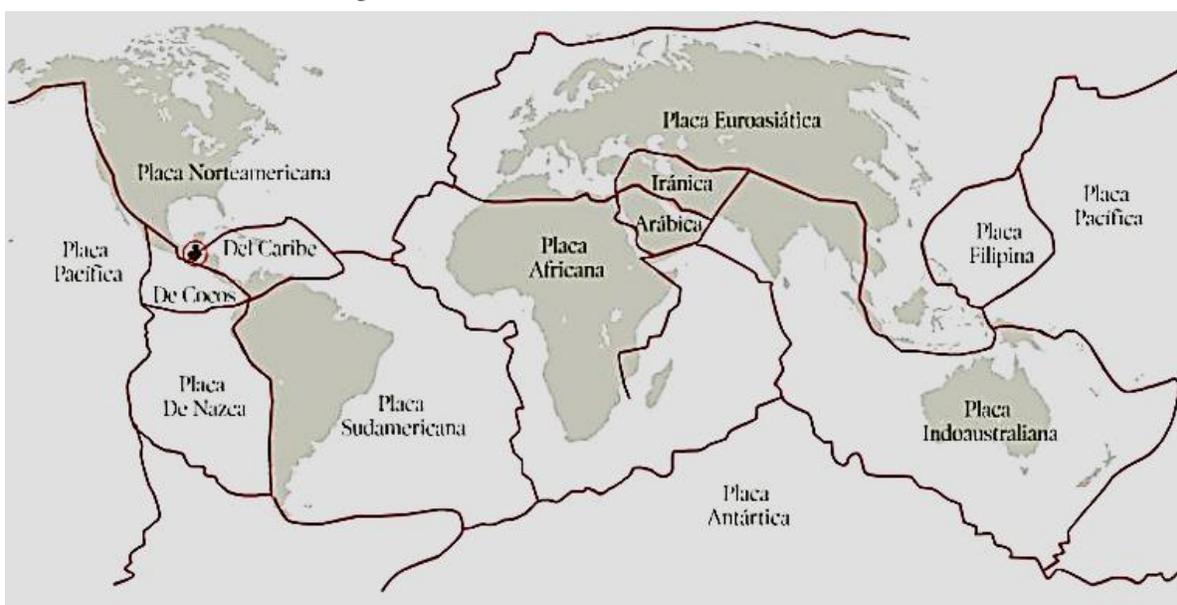
- Divergente (generación de corteza)
- Convergente (destrucción de corteza)
- Transcurrente (conservación de corteza)

En cuanto a la idea fundamental es que la corteza terrestre, la litosfera, está compuesta por mosaico de doce bloques o más grandes y rígidos llamados placas, que se mueven uno con respecto de otro, esto explicando de manera satisfactoria por la “teoría de la tectónica de placas”.

La corteza terrestre se halla dividida en:

- Placas continentales:
- Placas subcontinentales

Figura 4. Placas tectónicas alrededor del mundo



Fuente: Corzo, Mario. Base sismológica de Guatemala. p. 3.

La teoría tectónica de placas recibió un gran apoyo de los datos sísmicos reunidos a través de los años, mediante la red sísmica mundial, que fue establecida en el final de la década de 1950 ayudando esto a su validez. Demostrando que las zonas donde ocurren la mayor parte de los terremotos del mundo, son muy estrechas y muy bien definidas, sugiriendo que la mayoría de los sismos registrados resultan de los movimientos de las placas en las zonas donde chocan unas contra otras.

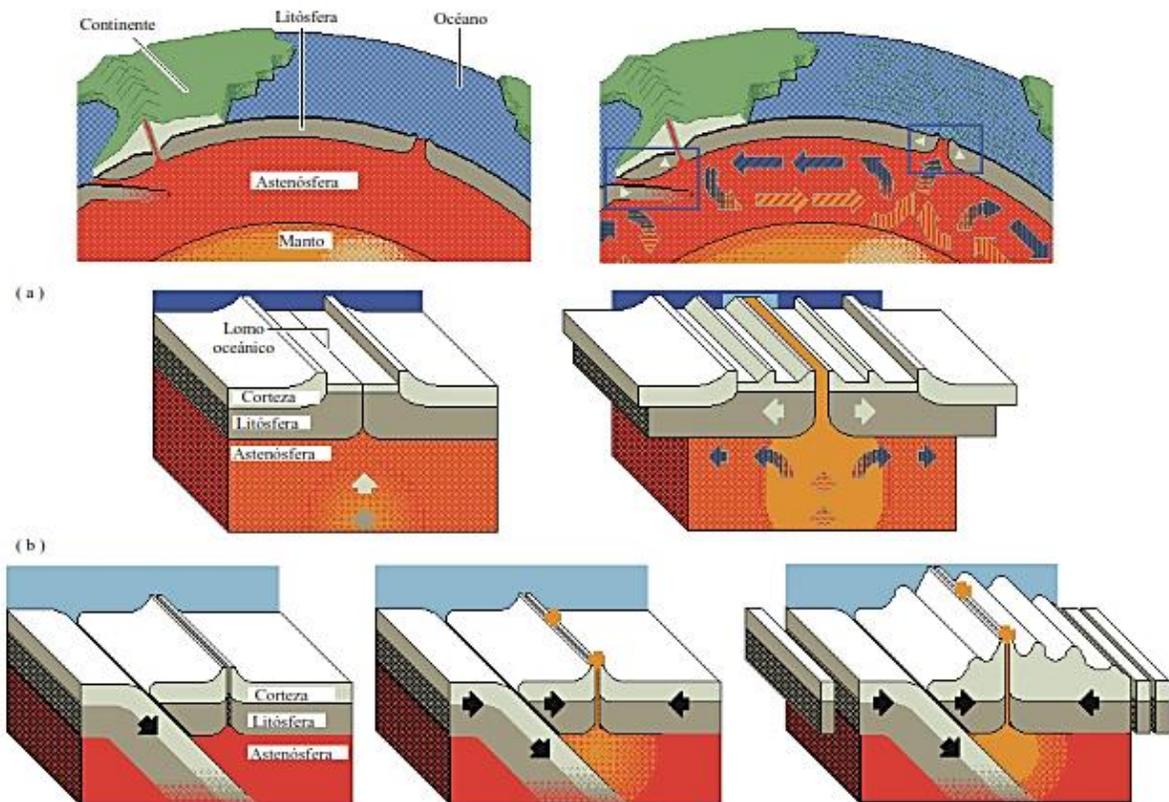
El equilibrio térmico de los materiales que componen la Tierra, es una explicación para la causa del movimiento de las placas (Rosenblueth, 1992).

Las placas se mueven libremente respecto de la astenosfera subyacente, y también pueden moverse una con respecto de la otra de tres formas:

- Una placa se desliza pasando frente a la otra a lo largo de su margen, este movimiento tiene su expresión en la superficie de la tierra.
- Dos placas se mueven alejándose mutuamente, da origen a los “lomos oceánicos”.
- Dos placas se mueven de forma que una se desliza por debajo de la otra, este tiene su acción en las profundas trincheras oceánicas donde el borde de una placa se mueve por debajo de la otra, lo cual se conoce como “subducción”

En la figura 5 se ilustran los conceptos anteriormente expuestos.

Figura 5. Movimiento de las placas, (a) expansión, (b) subducción

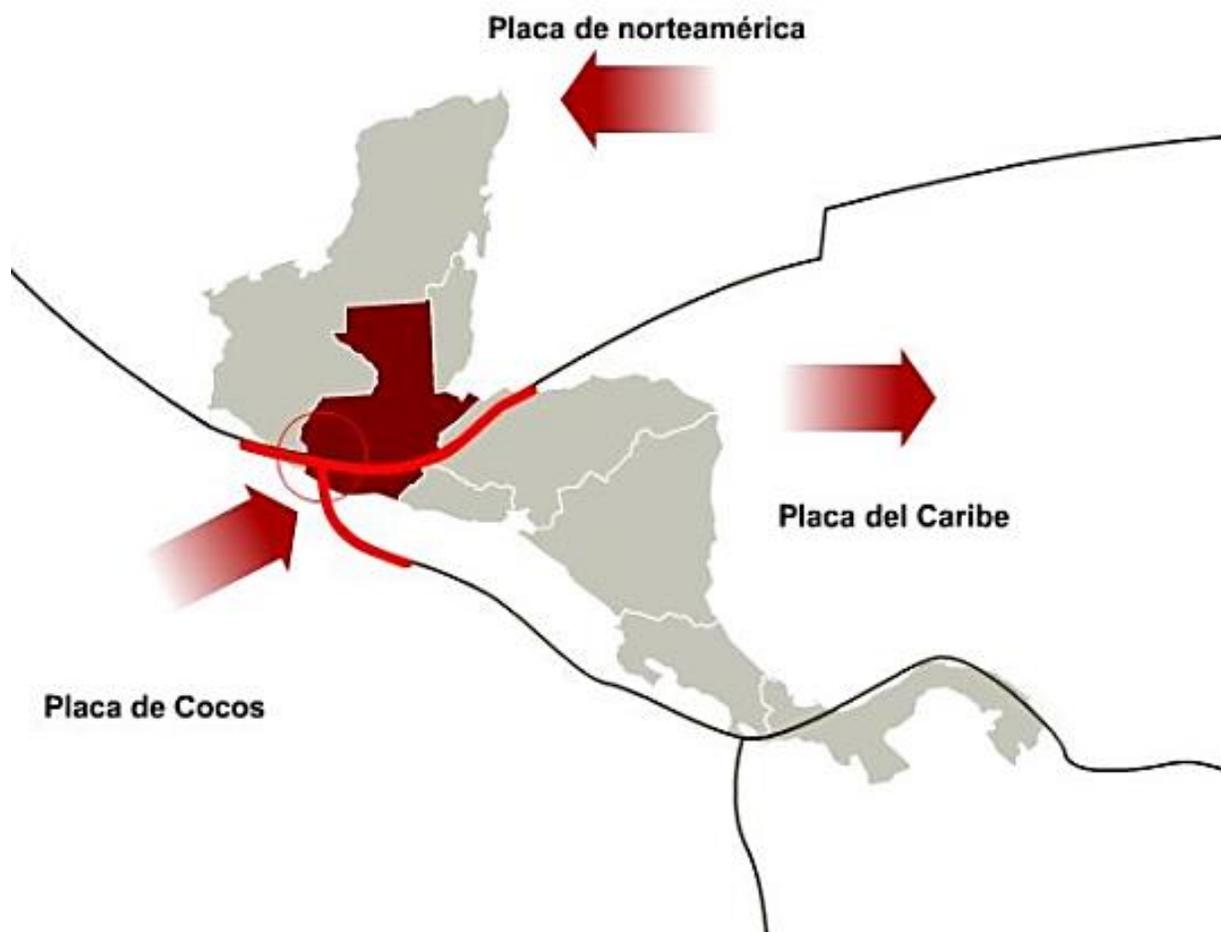


1.11.1 *Teoría de placas en la zona de estudio*

Guatemala ubicada entre la placa de Norteamérica, Cocos y el del Caribe De las placas tectónicas de la tierra, las que son para Guatemala amenaza sísmica que determina la actividad que tiene el lugar en los márgenes de dichas placas. Teniendo en cuenta que una de las fuentes principales de sismos es la fosa de subducción, asociada al límite de la Placa de Cocos y el Caribe que es del tipo convergente. Cabe distinguir dentro de ella una zona de subducción superficial ($h = 50$ km), que está localizada a 120 km de la costa, donde la Placa de Cocos comienza a sumergirse bajo la Placa del Caribe, y otra de subducción intermedia y profunda ($h > 50$ km), localizada ya bajo el continente, llegando a profundidades de hasta 250 km.

Cada una de estas placas tiene un movimiento distinto, lo que produce que entre ellas se acumulen grandes tensiones al empujarse y chocar entre sí.

Figura 6. Placas tectónicas que interactúan en Guatemala



Fuente: Corzo, Mario. Base sismológica de Guatemala. p. 8.

Para el departamento de San Marcos el marco tectónico está sometido por la interacción del extremo Oeste de la placa del Caribe con las placas de Cocos y Norteamérica, el límite entre la placa del Caribe y la placa de Cocos se encuentra en zona de subducción.

Se considera otra fuente de actividad sísmica la cadena de volcanes paralela a la fosa de subducción del Pacífico, la cual se extiende desde México hasta El Salvador. A razón de las fuerzas originadas por una componente de colisión oblicua en la zona de subducción, los sismos van acompañados de erupciones volcánicas. Estos sismos de magnitud menores a 6,5 grados, han originado destrucción, esto debido a que tienen un foco superficial (profundidad menor que 25 km) y los epicentros respectivos se encuentran en áreas pobladas.

- **Subducción:** proceso de hundimiento de una de las placas litosféricas bajo otra. La litosfera oceánica es la de mayor peso específico, es por eso que se subduce bajo la litosfera continental más densa.

En Guatemala se produce la subducción entre la placa de Cocos en el océano Pacífico, la cual subduce a la placa del Caribe, conocida como el cinturón de fuego del Pacífico, provocando sismos de gran magnitud. Existen tres tipos de subducción:

- a) Colisión intercontinental.
- b) Litósfera oceánica bajo litósfera oceánica.
- c) Litósfera oceánica bajo litósfera continental.

1.12 Fallas geológicas

La corteza terrestre se encuentra fracturada, y cada bloque se le denomina placa y a los bordes de las placas se les llama fallas.

Las fallas son fracturas en las cuales ha tenido lugar el desplazamiento relativo de los dos lados de la ruptura. Se dice que una falla geológica es activa cuando son capaces de producir sismos, su longitud puede alcanzar varios metros inclusive cientos de kilómetros y a una profundidad de varias decenas de kilómetros desde la superficie. La existencia de fallas en la superficie no implica necesariamente que el área cuenta con actividad sísmica, de la misma manera la inexistencia de ellas no implica que el área sea asísmica, ver ejemplo en figura 7.

1.12.1 *Tipos de falla*

Se define como falla geológica al plano de la fractura de la roca de la corteza terrestre, a través del cual se han producido desplazamientos relativos bloque respecto de otro adyacente, la falla puede ser representada como un plano aproximadamente, aunque su superficie sea irregular.

La categorización de las fallas toma en cuenta las características de geometría propia de la falla, ángulo de la falla (dip) formado por la falla en la superficie del terreno en plano horizontal y la línea de corte de un plano horizontal y la línea de corte hacia abajo del suelo. La dirección relativa del deslizamiento (slip), el agrietamiento repentino forma un ángulo (strike) que es medido en relación con el norte y la dirección de ruptura superficial del suelo de la línea de falla geológica.

Los tipos de falla son:

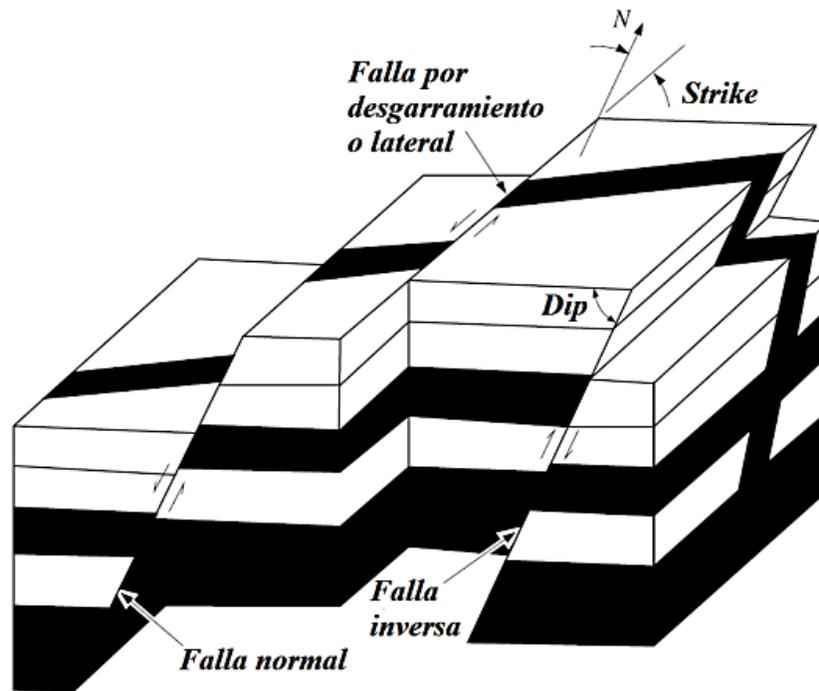
- a. Vertical: distintivo de las fallas normal o inversa, ya que el plano de falla y el movimiento relativo es vertical de manera predominante entre los bloques.
- b. Normal: falla en la cual los bloques están sometidos a esfuerzos de tensión.
- c. Inversa: en esta falla los bloques están sometidos a esfuerzos de compresión.
- d. Desgarradura: los bloques están sometidos a esfuerzos de corte.

Figura 7. Falla de San Andrés



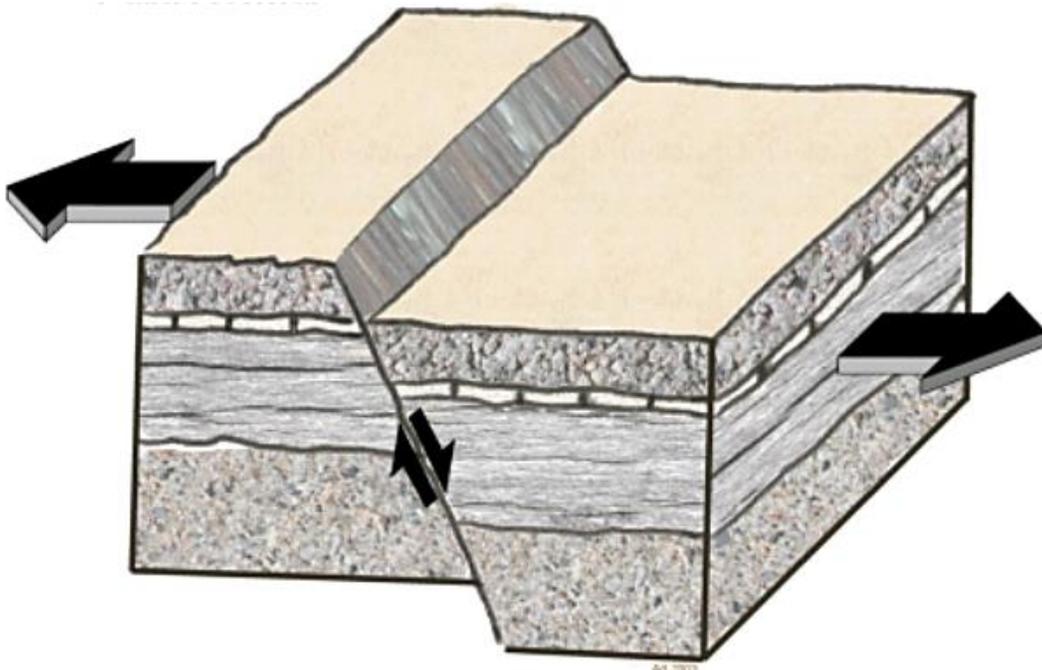
Fuente: <https://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/ciencias-de-la-tierra/geologia/terremotos-tsunamis-y-fallas-geologicas/>

Figura 8. Orientación y desplazamientos de los tipos básicos de fallas



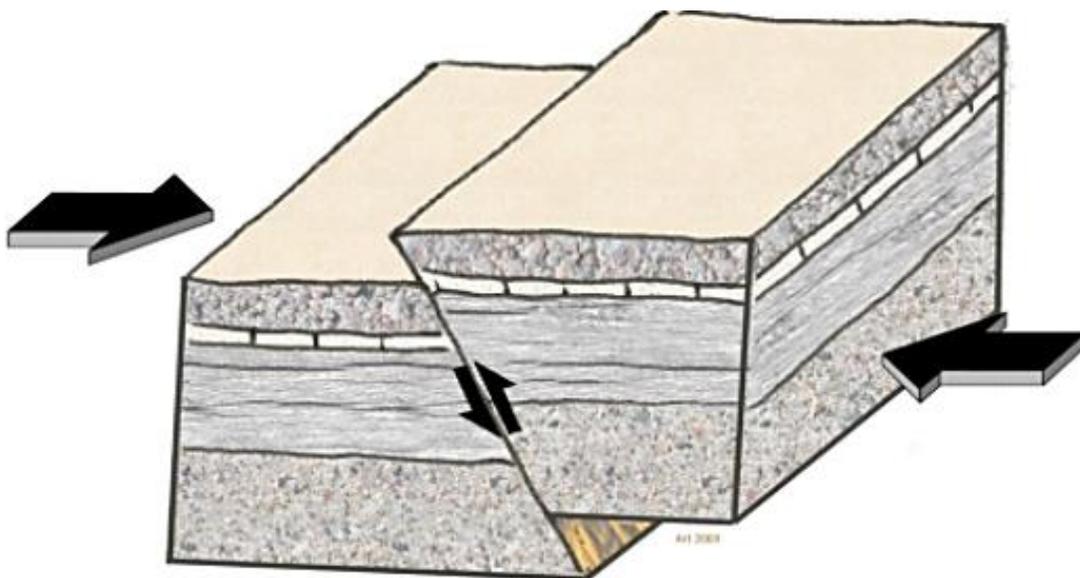
Fuente: Bolt, Bruce. Earthquakes a premier. p.154.

Figura 9. Falla geológica normal, genera esfuerzos de tensión



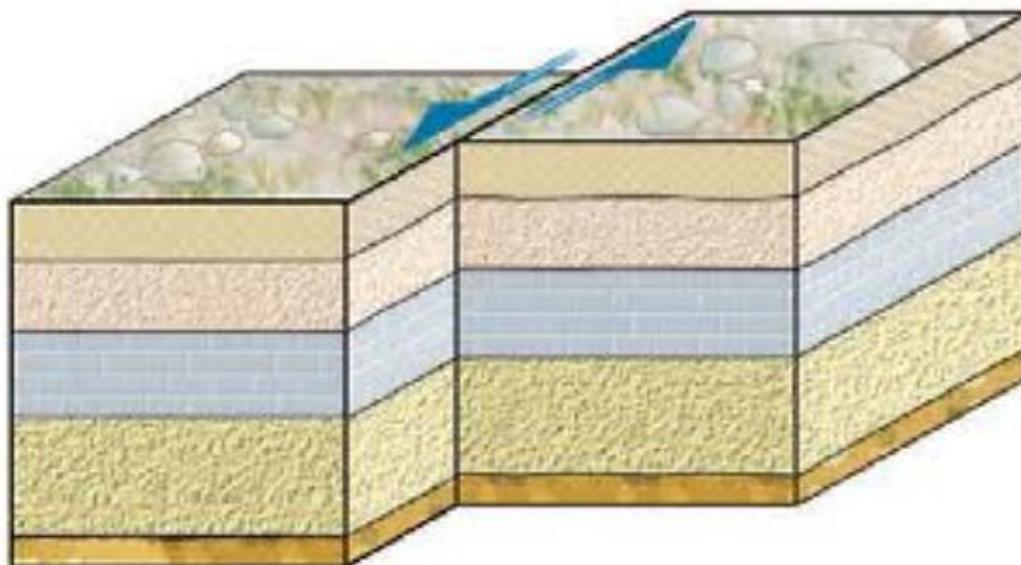
Fuente: Bolt, Bruce. Earthquakes a premier. p. 160.

Figura 10. Falla geológica inversa, genera esfuerzos de compresión



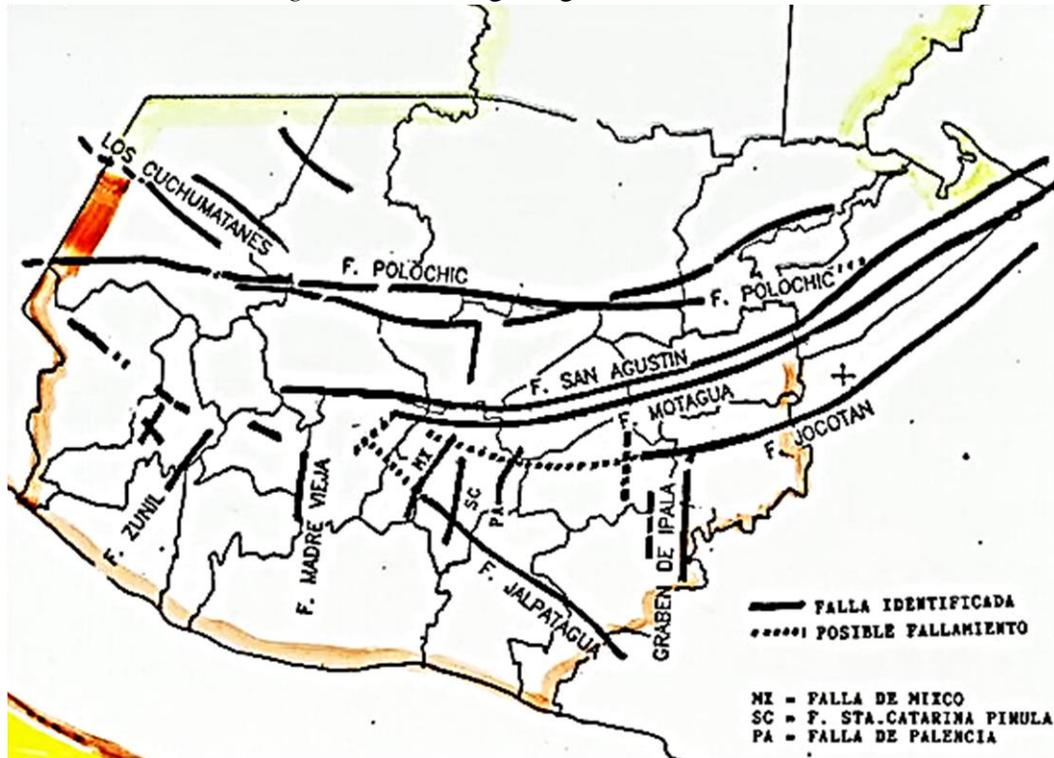
Fuente: Bolt, Bruce. Earthquakes a premier. p. 160.

Figura 11. Falla geológica de desgarradura, genera esfuerzos de corte



Fuente: Bolt, Bruce A. Earthquakes a premier. p. 161.

Figura 12. Fallas geológicas de Guatemala



Fuente: Monzón Despang, Héctor. Sismos y sismorresistencia. Slide.

En la figura 12 existen fallas que deben considerarse aunque algunas sean secundarias o incluso sean posibles.

- **Falla del Motagua:** está localizada en la Sierra de las Minas, la cual lleva el nombre del río Motagua, es una de las dos fallas geológicas más importantes de Guatemala. Esta falla provocó el terremoto registrado el 4 de febrero de 1976, el cual causó mayores daños en San Pedro Sacatepéquez y San Juan.
- **Falla de Mixco:** esta falla inactiva, se encuentra ubicada en Mixco, accidenta el valle de Guatemala, al oeste de la cabecera central.
- **Falla de Chixoy Polochic:** localizada en la sierra de los Cuchumatanes, conocida como falla de Cuilco-Chixoy Polochic- es una de las fallas geológicas más importantes de Guatemala. Pasa por el nacimiento de los ríos que llevan su nombre.
- **Falla Jocotán-Chamelecón:** esta falla no reporta evidencia de sismicidad, no obstante Schwartz en 1988 muestra evidencia de sismicidad reciente que ocurrió a lo largo de las fallas con orientación norte, inicia desde el departamento de Chiquimula en Guatemala y atraviesa Honduras.

- **Falla del Frutal:** esta falla esta inactiva, se encuentra situada en el municipio de Villa Nueva al sur-oeste de la cabera capitalina.
- **Falla Santa Catarina Pínula:** falla inactiva, que afecta el valle de la ciudad de Guatemala, ubicada en el municipio de Santa Catarina Pínula a pocos kilómetros de la cabecera central.
- **Falla de Jalpatagua:** falla activa que se extiende desde el sur de Amatitlán hasta Moyuta Jutiapa. Esta falla afecta la parte sur del país.

1.13 Premonitorios y réplicas

Se presentan uno o varios sismos pequeños, en algunos casos antes que ocurra el evento principal. Esta clase de eventos se conocen con el nombre de premonitorios. De la misma manera, con posterioridad a un sismo importante, se presentan temblores de menor magnitud, a los que se les da el nombre de réplicas. Solamente los sismos superficiales y de profundidad moderada producen replicas, las cuales son de gran importancia, ya que ayudan para determinar el plano de falla, por esta razón se instalan redes sismológicas móviles con posterioridad a un sismo importante.

1.14 Importancia del estudio de los sismos

El uso del estudio de los sismos ayuda a prevenir y disminuir los daños que estos producirán en determinada región, aunque no es posible saber cuándo y dónde es que ocurrirá el próximo sismo; de acuerdo a la evidencia geológica, los registros históricos y la información sismológica se puede tener la seguridad y certeza de que ocurrirá de nuevo un sismo. Por eso para poder disminuir de manera eficaz y económica los daños que estos producen es necesaria la prevención.

Las medidas de prevención contemplan una gran cantidad de acciones entre las cuales se pueden mencionar: educación escolar, códigos o normas de construcción, planes de emergencia, uso adecuado del suelo y sus recursos, etc. Se puede considerar que la prevención es una tarea multidisciplinaria que involucra a toda la sociedad, tomando en cuenta el papel de las ciencias de la tierra, como la sismología la que tiene por función estudiar el fenómeno natural e identificar cada uno de los factores que pueden llegar a producir daños en determinado lugar. Esto último se conoce como evaluación de la amenaza o peligro, que en el caso de los sismos se denomina como evaluación de la amenaza sísmica.

1.15 Hipocentro, epicentro y ondas sísmicas

1.15.1 *Hipocentro*

Conocido también como fuente foco, el hipocentro es como un punto o grupo de puntos en el interior de la corteza terrestre donde se cree que se originan las ondas sísmicas, es una idealización, ya que en realidad, el desplazamiento relativo de la falla se produce a lo largo de una línea extensa; de allí que se considera como el instante de tiempo en que se generan las ondas y la propagación de estas, hasta alcanzar la superficie, produciendo movimientos oscilatorios irregulares en el suelo. Un ejemplo, la falla de Motagua, causante de terremotos a lo largo de 200 kilómetros.

1.15.2 *Epicentro*

Punto que se encuentra localizado por encima del hipocentro, a flor de tierra o sobre la superficie terrestre, pasando por el centro de la misma. Este es el punto donde se siente con mayor intensidad el sismo. Si se supone una población cercana al epicentro del sismo, a la distancia horizontal de la población o sitio del epicentro, se le llama distancia epicentral y si se considera la distancia del sitio al foco, se nombra como distancia focal; también es de interés la profundidad focal, definida como la distancia del foco al epicentro.

Según la profundidad focal (valores no fijos) los sismos se clasifican de esta manera:

- Superficiales: estos menores a 20 kilómetros, con mayor daño
- Someros: con profundidad que oscila entre 20 y 70 kilómetros
- Intermedios: profundidad entre 70 y 300 kilómetros
- Profundos: los cuales son mayores a 300 kilómetros

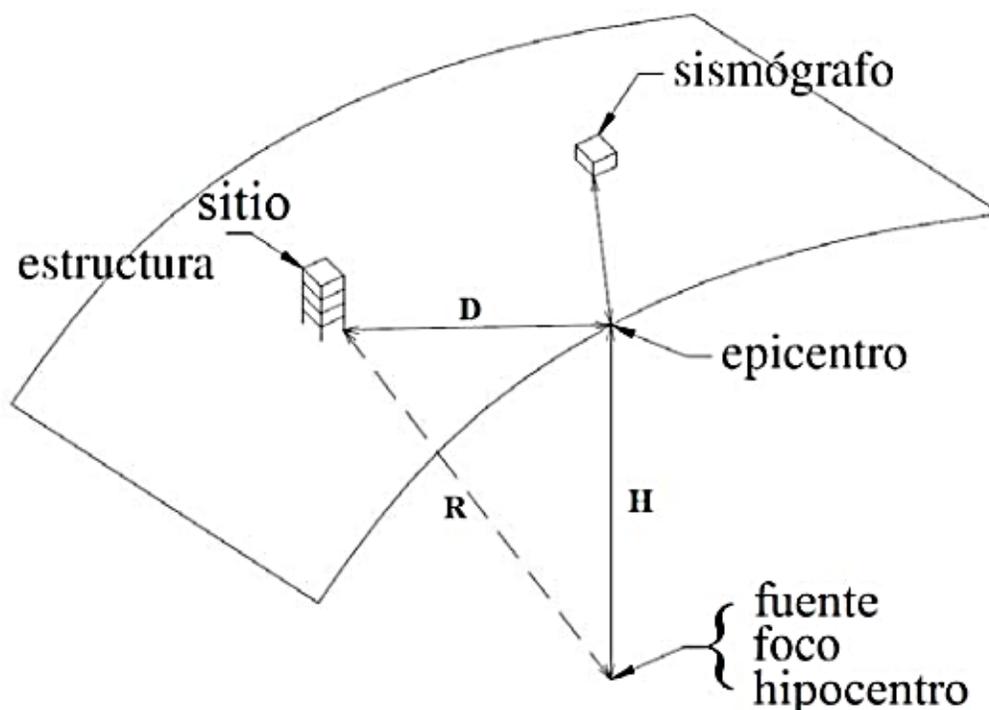
Es necesario utilizar registros de temblor ubicados en diversas estaciones, esto para calcular las coordenadas de latitud, longitud y profundidad. En cada registro se miden los tiempos de arribo de las ondas; estas reconocidas por el cambio brusco en la amplitud y frecuencia del registro respecto del ruido ambiente.

1.15.3 *Ondas sísmicas*

La liberación de energía de deformación que ocurre de forma repentina en el hipocentro o foco del sismo, cuando este sucede, se propaga en forma de vibraciones elásticas de deformación u ondas en todas las direcciones, puesto que es una masa elástica. Estas ondas

elásticas, llamadas ondas sísmicas, transmiten energía de un punto a otro de la tierra a través de diferentes capas, las cuales llevan la energía a la superficie, lo que provoca destrucción.

Figura 13. Idealización geométrica en la relación de fuente y sitio



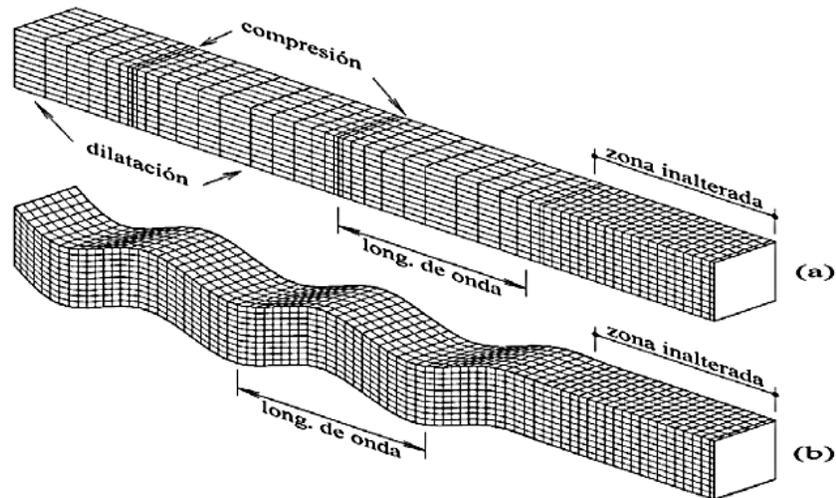
Fuente: Corzo, Mario. Base sismológica de Guatemala. p. 11.

1.15.4 Ondas internas o de cuerpo

Dentro de la tierra, las ondas elásticas se propagan a través de un medio casi ilimitado, isótropo y homogéneo. En la superficie, estas ondas se propagan como ondas de superficie. Estas pueden ser:

- a) Primarias u ondas P (Push Waves): estas son las que hacen vibrar una partícula en el sentido de la propagación de la onda, originando compresión y dilatación en el medio por el cual se desplazan. Cuando estas alcanzan la superficie de la Tierra, parte de ellas se transforma en ondas sonoras.
- b) Ondas secundarias u ondas S (Shear Waves): son las que hacen vibrar las partículas en forma horizontal, perpendicular a la dirección de propagación, produciendo esfuerzos de corte en el medio en el que se desplazan. Por las características de estas ondas, ellas se disipan en un medio líquido, ya que como es sabido, estos no soportan esfuerzos de corte

Figura 14. Deformaciones producidas por las ondas de un cuerpo: (a) onda P, (b) onda S



Fuente: Bolt, Bruce. Earthquakes. p. 8.

Las ondas P llegan más rápido que las ondas S. Cerca de la superficie, la velocidad de las ondas se encuentra en el rango de 5 a 7 y 3 a 4 kilómetros por segundo, respectivamente. La propagación de estas velocidades dependen principalmente de la densidad y elasticidad del medio en que se desplazan (densidad ρ , módulo de incompresibilidad k , módulo de cortante G).

Se tiene que para determinar la velocidad de propagación de las ondas se tienen las siguientes fórmulas:

Primarias P

$$V_P = \sqrt{\frac{k + \frac{4G}{3}}{\rho}}$$

Secundarias S

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Por ejemplo:

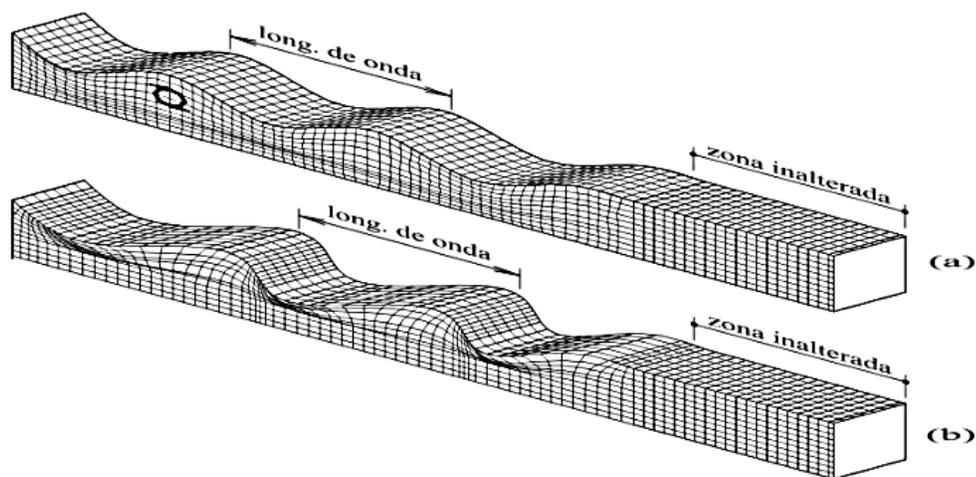
Medio de desplazamiento	V_p	V_s
Granito	5,5 km/s	1,5 km/s
Agua	1,5 km/s	0 km/s

1.15.5 Ondas superficiales

Las ondas superficiales se propagan en la superficie de la Tierra, son mejores para detectar sismos superficiales. Se transmiten en la superficie de la tierra, hasta profundidades de 30 km, estas se clasifican por su forma en:

- a) Ondas Rayleigh: cuando un sólido posee una superficie libre, como es la de la Tierra; pueden generarse ondas que viajan a lo largo de la superficie, teniendo su máxima amplitud en la superficie libre, decreciendo de acuerdo con la profundidad. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica y ocurre en el plano de propagación de la onda (horizontal y vertical simultáneamente, como las olas del mar).
- b) Ondas Love: se generan solamente cuando un suelo está estratificado, situación que se cumple en el planeta, ya que se encuentra formado por capas de diferentes características físicas y químicas. Estas se propagan con un movimiento de las partículas perpendicular a la dirección de propagación. Pueden considerarse también como ondas S atrapadas en la superficie, pues las ondas Rayleigh su amplitud decrece de manera rápida con la profundidad y en general su existencia se puede explicar por la presencia del vacío en un medio de menor rigidez, tiende a compensar la energía generando este tipo de vibraciones.

Figura 15. Deformaciones producidas por las ondas superficiales (a) Onda Rayleigh, (b) Onda Love



Fuente: Bolt, Bruce. Earthquakes. p. 9.

1.16 Riesgo, amenaza y vulnerabilidad

La falta de información tanto de manera empírica o analítica sobre los desastres y los impactos que se pueden originar de forma inmediata o mediata, también la inexistencia de procesos de conformación de riesgos y sus factores determinantes, han hecho que el tema de

vulnerabilidad sísmica sea un tema de suma importancia en Guatemala, especialmente en las zonas a estudiar.

- **Riesgo:** Se define como la destrucción o pérdida esperada obtenida de la probabilidad que ocurran eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales peligros o amenazas. El riesgo presentado por los resultados obtenidos de evaluaciones realizadas en determinado sector. El riesgo puede reducirse si se relacionan la amenaza y vulnerabilidad de los elementos expuestos, es importante saber que el riesgo no es posible de ninguna manera que el riesgo sea cero, para que eso sucediera la amenaza y la vulnerabilidad deberían ser cero.
- **Amenaza:** una variable en la que no se puede intervenir, se refiere a la posibilidad de ocurrencia de un evento el cual puede llegar a causar algún tipo de daño a la sociedad. Para su estudio se ha establecido como amenaza la aceleración máxima del suelo de 1.08 m/seg², por lo menos una vez en 50 años, esto equivalente a una probabilidad de ocurrencia de 0.05, todo en función de un sismo severo de clase de obra “E”, Esencial, valores que son recomendados en la norma AGIES NSE 2:10 (AGIES, 2010). De manera técnica la amenaza se expresa como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con un nivel de severidad, en un sitio determinado y durante un periodo de tiempo.

Una definición sintetizada por La UNDRO y la UNESCO a partir de los siguientes conceptos: amenaza, peligro o peligrosidad (Hazard – H). Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un sitio dado.

- **Vulnerabilidad:** definida como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo, resultante de la probabilidad que ocurra un evento desastroso. La vulnerabilidad se expresa en una escala desde cero o sin daño a 1 o pérdida total, una variable en la que se puede intervenir con medidas de mitigación y prevención.

El concepto de amenaza se refiere a un peligro latente o factor de riesgo extremo de un sistema expuesto, matemáticamente expresado como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una intensidad definida, en un sitio y periodo de tiempo determinado. Por otro lado la vulnerabilidad puede entenderse como un factor de riesgo

interno, correspondiente a su predisposición intrínseca de ser susceptible a sufrir un daño, expresado como la factibilidad de que el sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza.

De acuerdo a Alex Barbat, Luis Pujades (2002) en tiempos anteriores se utilizó el término riesgo para referirse a lo que hoy se denomina amenaza, actualmente se utiliza a veces la palabra vulnerabilidad con el significado de riesgo. Teniendo en cuenta que los conceptos son diferentes y su definición es esencial para disponer de un enfoque que permita identificar las posibilidades de reducción de riesgo, en general no es posible actuar sobre la amenaza pero es posible reducir el riesgo disminuyendo la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

1.17 Medidas de los sismos

Existen dos sistemas utilizados usualmente para cuantificar el tamaño y la fuerza de un sismo, estos son magnitud e intensidad. Normalmente estos parámetros son muy conocidos y utilizados aunque ninguno de ellos es satisfactorio desde el punto de vista de la ingeniería sísmica. El tamaño de los sismos se expresan de varias maneras tal el caso de las medidas cuantitativas o instrumentales basados a una región o de manera mundial, también las medidas no instrumentales o cualitativas que son de gran importancia para los eventos pre instrumentales y por lo tanto son esenciales en la compilación en catálogos de terremotos históricos para propósitos de análisis de riesgos. En cuanto a los sismos registrados de manera instrumental, y a los datos instrumentales las escalas cualitativas son complementarias.

1.17.1 *Intensidad*

Determinada como medida no instrumental de los efectos de un sismo. Los efectos de la superficie, referida al grado de destrucción causado y las reacciones humanas, esto en un sitio determinado. Tratándose así de una evaluación subjetiva de los datos, esto debido al carácter cualitativo relacionado con la densidad poblacional, familiaridad con el terremoto y el tipo de construcciones.

Las escalas utilizadas de forma discreta para cuantificar actividad sísmica, estas representadas en cada nivel por números romanos. Cada grado de intensidad facilita una descripción cualitativa de los efectos del sismo. Las escalas de intensidad pueden incluir una descripción de la calidad de la construcción de estructuras.

Un ejemplo de la escala utilizada en Guatemala Mercalli Modificado, dice que los diferentes niveles de daños, dependiendo del sistema estructural, si este fue mal diseñado o mal construido (VII), los edificios ordinarios (VIII) o de las estructuras construidas, especialmente para soportar terremotos (IX). Las escalas de intensidad no toman en cuenta las condiciones de suelo local. Algunas de las escalas de intensidad comunes son las siguientes:

- Mercalli Modificada (MM): escala que se utiliza en América del Norte y otros países, entre los cuales se encuentra Guatemala (12 niveles).
- Escala Macro sísmica europea (EMS): desarrollado en base a la escala de MM, aprobado desde 1998 en Europa (12 niveles).
- Medvedev – Sponheuer – Karnik (MSK): escala desarrollada en Europa Central y Oriental, también utilizada en otros países (12 niveles).
- Agencia Meteorológica de Japón (JMA): escala utilizada en Japón. En los últimos años ha sido revisada por lo que se le ha correlacionado con la máxima aceleración del suelo (7 niveles).
- Mercalli – Cancani – Seiberg (MCS): esta escala es utilizada en el sur de Europa (12 niveles).

1.17.2 **Magnitud**

Medida cualitativa y objetiva que se relaciona con la cantidad de energía liberada durante el movimiento, es decir el tamaño del terremoto y las dimensiones de la falla. Basada en las amplitudes máximas de las ondas superficiales o las ondas de cuerpo. La energía calculada indirectamente de la amplitud observada en el sismograma.

En la década de 1930 se realizaron los primeros intentos para definir las escalas de magnitud por Wadati en Japón y en California por Richter. Varias escalas existentes, en su mayoría de frecuencia – dependiente ya que miden las amplitudes de las ondas sísmicas con diferentes propiedades. Existen también escalas independientes de la frecuencia pero si directamente relacionadas con los parámetros de la fuente, que no dependen específicamente de las ondas. Las escalas de magnitud más usuales se describen a continuación:

- Magnitud local o Richter (ML): evalúa en micras la amplitud máxima de la onda sísmica, está registrada en un sismógrafo estándar Wood – Anderson el cual será ubicado a 100 kilómetros de distancia del epicentro del terremoto. Asumiendo una magnitud $ML = 3$

se ha calibrado la escala de Richter, esto corresponde a un sismo de 100 kilómetros de distancia, de amplitud máxima de $A = 1$ milímetro. Un sismo con ML mayor a 5,5 producen daños significativos, mientras que un sismo de $ML = 2$, siendo el evento más pequeño.

- Magnitud de momento (M_w): no teniendo que ver con cualquier longitud de onda, M_w se puede utilizar para medir el espectro de movimientos de tierra. Representa el mecanismo de corte que se lleva a cabo en las fuentes del sismo.
- Magnitud de ondas superficiales (M_s): una de las medidas de las amplitudes L y R con un periodo de 20 segundos, donde la longitud de onda es de 60 kilómetros, común en sismos distantes, por ejemplo, en donde se encuentra el epicentro en más de 2000 kilómetros. Se utiliza para los grandes sismos, y no para caracterizar eventos profundos o sismos relativamente pequeños.
- Magnitud de onda del cuerpo (M_b): esta escala puede medir sucesos lejanos, como por ejemplo de distancias epicentrales, no menos de 600 kilómetros. Evalúa la amplitud de las ondas P, con periodo de aproximadamente 1 segundo, en longitud de ondas menores de 10 kilómetros. Adecuada para sismos profundos que tienen pocas olas de superficie.

La definición matemática de la magnitud implica que las escalas anteriormente descritas no tienen límite superior e inferior. Las propiedades principales de cada una de las escalas de magnitud se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Propiedades de las escalas de magnitud

Escala	Autor	Tamaño del Sismo	Profundidad del Sismo	Distancia Epicentral (km)	Parámetro Referencia	Aplicabilidad
ML	Richter	Pequeño	Superficial	<600	Amplitud de la onda	Regional California
mb	Gutenberg y Richter	Pequeño a mediano	Profundo	>1000	Amplitud de ondas P	Mundial
Ms	Richter y Gutenberg	Grande	Superficial	>2000	Amplitud de ondas L y R	Mundial
Mw	Kanamori	Todos	Todas	Todas	Momento sísmico	Mundial

Fuente: Adaptado de A.S. Elnashai y L.D. Sarno. Fundamentals of Earthquakes engineering. p.19.

1.18 Sismicidad en Guatemala

La República de Guatemala está situada en una triple unión de placas tectónicas, la de Cocos, la del Caribe y la de Norteamérica, atravesada por el cinturón volcánico continental y por dos grandes sistemas de fallas, la del Motagua y del Polochic. Entre este cinturón volcánico y la falla del Motagua está localizado el graben en donde se ubica la ciudad de Guatemala, en un valle de fondo plano fuertemente bisectado por cañones y barrancos; el graben está limitado al Oeste por el sistema de falla de Mixco, que corre predominantemente en dirección norte-sur, al Este por el sistema de falla de Santa Catarina Pinula, que corre en dirección noreste-sureste y al Sur por el sistema de falla de Jalpatagua o Chixoy con dirección este-oeste.

Uno de los límites de las plataformas que se marcan en las fallas Motagua - Polochic, discurren por el centro del país, desde el golfo de Honduras, hacia el sur oeste y luego, paralela al paralelo 15, pasando a 30 Km de la capital. La mitad sur del país que pertenece a la plataforma Norteamericana se mueve hacia al oeste; las orillas profundas, a una velocidad probable de 2cms/año con movimiento uniforme, mientras que los 10 o 20 Km superiores rozan en forma entrecortada considerándose sus movimientos los causantes de los sismos.

Al suroeste de Guatemala discurre el límite de la plataforma del caribe con la plataforma del Coco, en la que se sumerge, desencadenando terremotos en la costa del pacifico (Simposio del Terremoto de febrero de 1976, Tomo I).

Tabla 2. Macrozonificación sísmica Guatemala

Zona	Lo	Ao	Af
2	2	0.10 g	0.00 g
3	3	0.1 – 0.3 g	0.00 – 0.10 g
4.1	4	0.3	0.10 – 0.15 g
4.2	4	0.3	0.15 g

Fuente: Adaptado de AGIES, Normas estructurales de construcción Recomendadas para la República de Guatemala NR 1-96, 1996.

Todo lo anterior sumado al vulcanismo del país incide en la formación de suelos de alta capacidad estática de carga, pero con comportamientos poco favorables a los efectos de flujos produciendo grietas y desprendimiento.

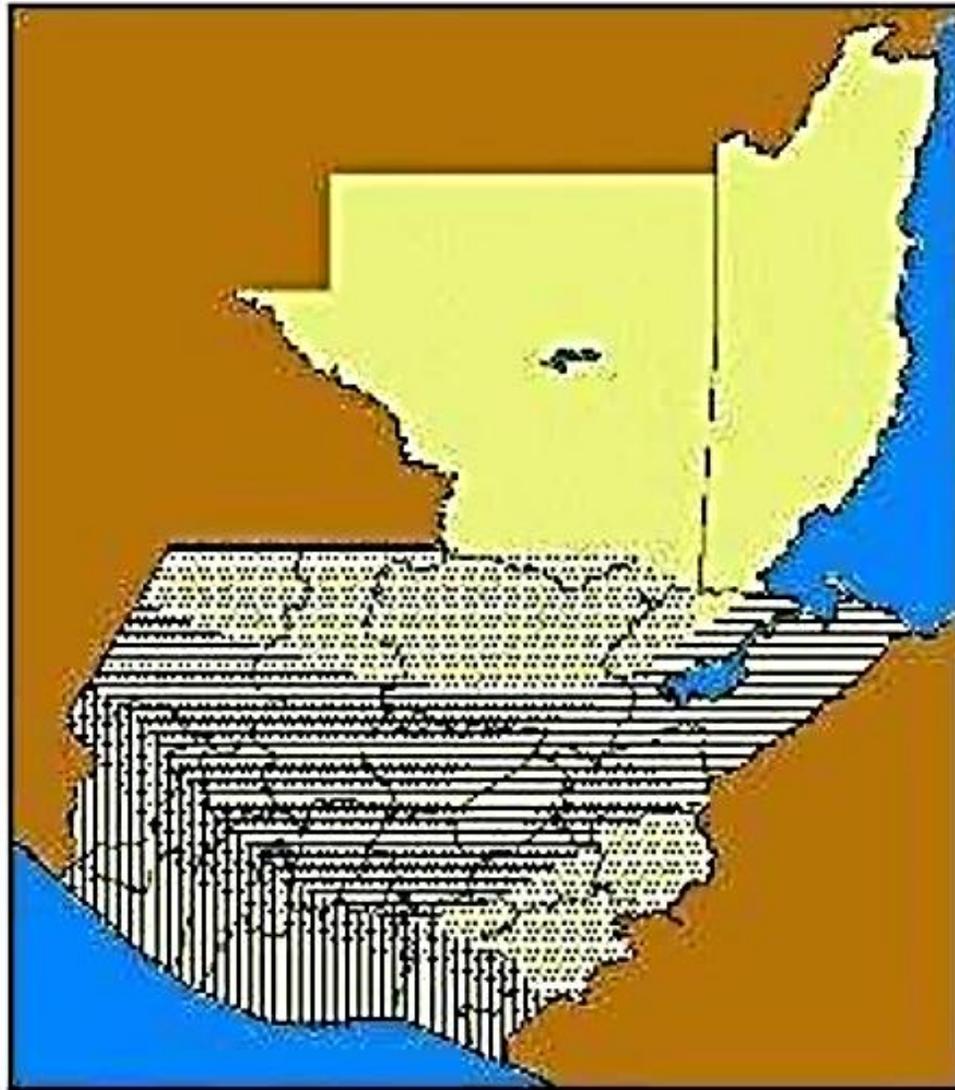
Figura 16. Mapa de macro zonificación sísmica



Fuente: Adaptado de AGIES, Normas estructurales de construcción Recomendadas para la República de Guatemala NR 1-96, 1996.

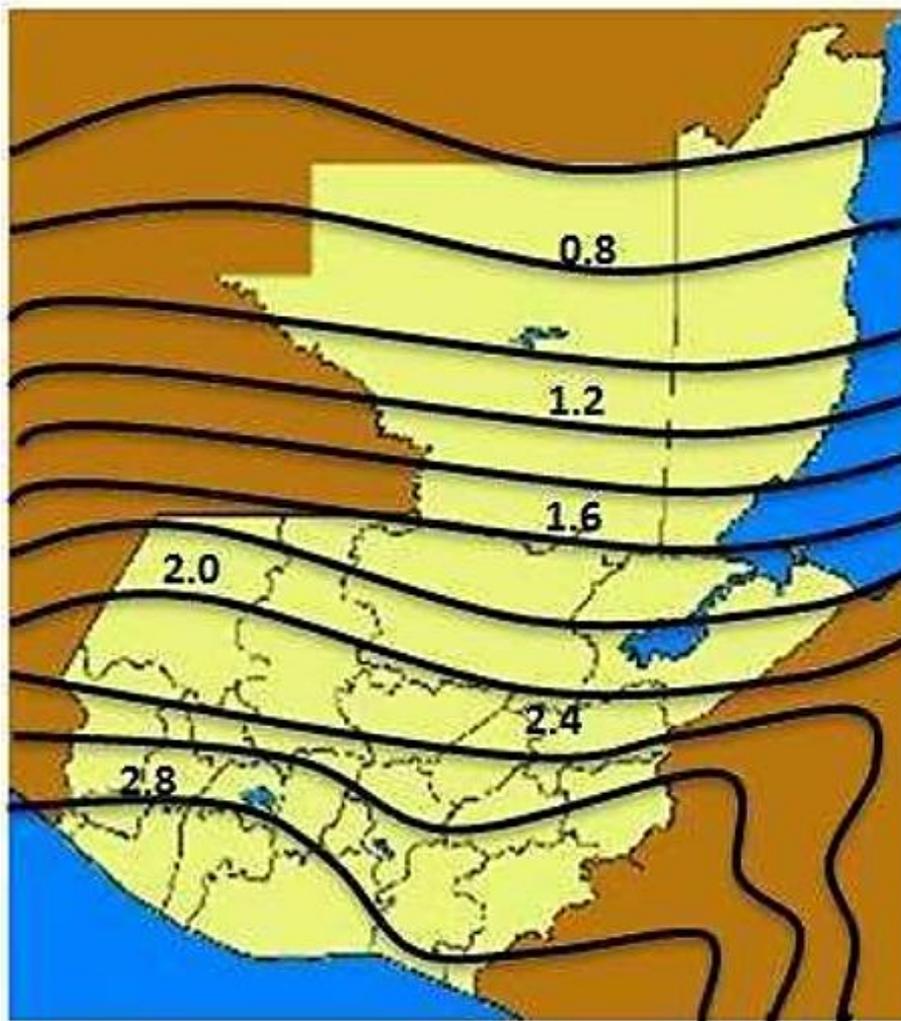
A continuación, se muestran gráficas sobre la macro zonificación sísmica del país figura 16. Zonas en donde predominan los diferentes tipos de sismos figura 17. Esquema de aceleración del suelo figura 18.

Figura 17. Zonas predominantes de sismos



-  **PREDOMINAN SISMOS DE TRASCURRENCIA**
-  **PREDOMINAN SISMOS DE SUBDUCCIÓN**
-  **ZONAS CON FALLAS DE SEGUNDO Y TERCER ORDEN**

Figura 18. Aceleraciones en m/seg/seg esperadas al menos, una vez en cincuenta años



Fuente: Adaptado de Ligorria, Seismic Hazard for Guatemala, Technical report No. 2-21 NORSAR. 1995.

1.19 Sismicidad y niveles de protección sísmica

La sismicidad se mide correspondientemente desde su índice de sismicidad (I_0), que es una medida relativa de la severidad esperada del sismo en un lugar específico. Indica el nivel de protección sísmica que se hace necesario para diseñar una edificación e indica la selección del espectro sísmico de diseño. El territorio de la república de Guatemala se divide en macrozonas de amenaza sísmica, caracterizadas por su índice de sismicidad que varía desde $I_0 = 2$ a $I_0 = 4$.

Adicionalmente la aplicación del índice de sismicidad $I_0 = 5$ a nivel de macrozona, para tomar en cuenta condiciones sísmicas, severas geográficamente localizadas (como fallas geológicas activas o laderas empinadas).

Tabla 3. Niveles de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño

Índice de Sismicidad	Clase de obra			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Unitaria
lo = 5	E	E	D	C
lo = 4	E	D	D	C
lo = 3	D	C	C	B
lo = 2	C	B	B	A
Probabilidad de exceder un sismo de diseño	5% en 50 años	5% en 50 años	10% en 50 años	No aplica

Fuente: AIES, NSE 2-10 “Demandas Estructurales, Condiciones de Sitio y Niveles de Protección”, Capítulo 4, p. 11. .

1.20 Zonificación sísmica para la República de Guatemala

Guatemala es uno de los países de América Latina, que en la actualidad presenta mayores condiciones de riesgo por actividad. Está clasificado como uno de los 5 principales países de alto riesgo en el mundo en términos de vulnerabilidad, y esto es uno de los pocos países en donde convergen tres placas tectónicas; la de Cocos, Caribe y norteamericana, condición que lo hacen propenso a deslizamientos, inundaciones, derrumbes, sismos y a la actividad volcánica, ver figura 19.

1.21 Terremotos históricos de Guatemala

- **El terremoto de 1765:**

El día 24 de octubre se registró un terremoto de magnitud entre 7.6 y 8.2 Mw y VII MM (no existen datos exactos por la fecha de la ocurrencia), con epicentro en San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango

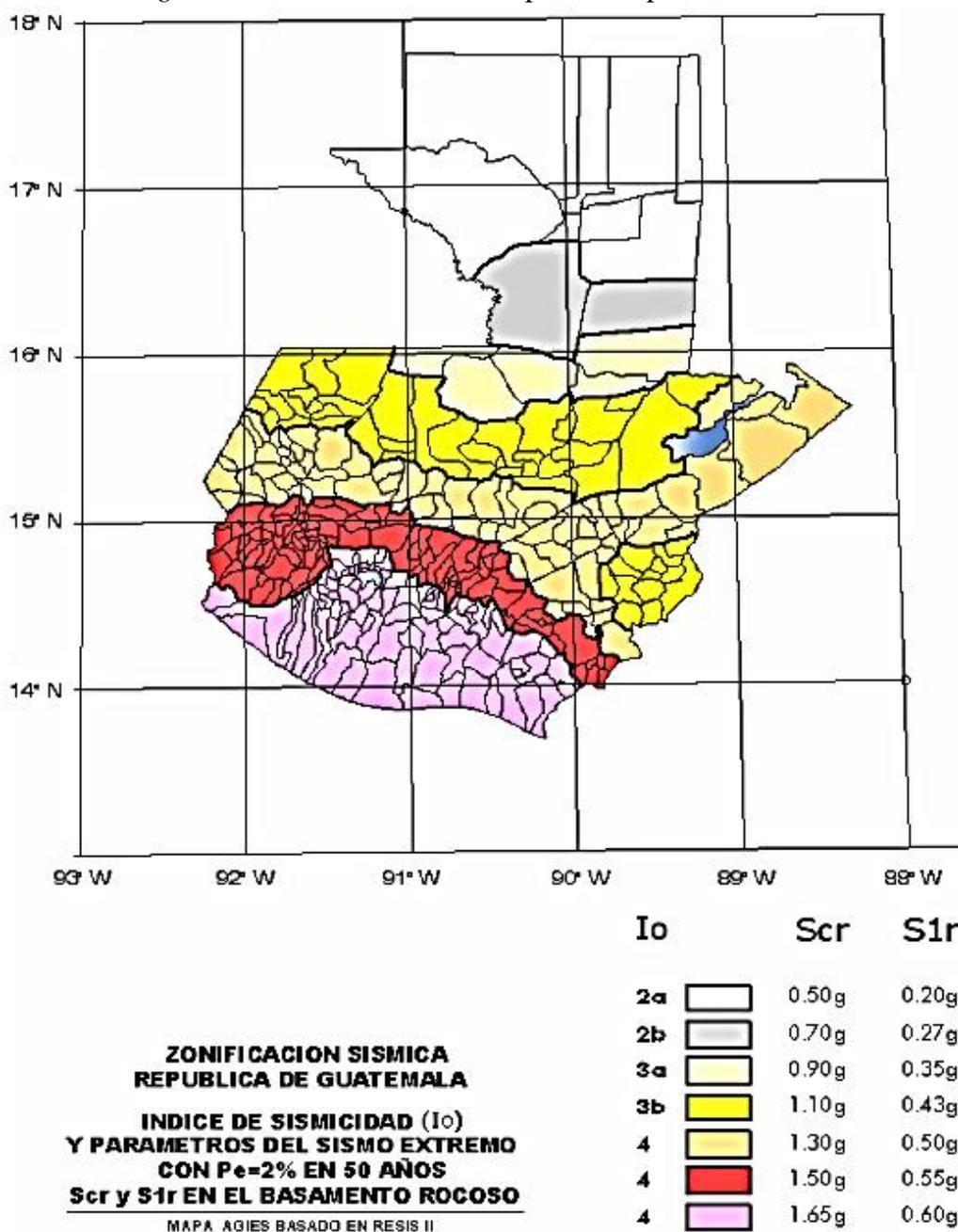
- **El terremoto de 1773:**

El día 29 de julio se registró un terremoto de magnitud VIII MM con epicentro en Antigua Guatemala.

- **El terremoto de 1816:**

El día 22 de julio de 1816 se registró un terremoto de magnitud aproximada de 7.5 Mw y VII MM, con epicentro en el departamento de Alta Verapaz.

Figura 19. Zonificación sísmica para la República de Guatemala



Fuente: AGIES NSE 2-10 Demandas Estructurales, Condiciones De Sitio Y Niveles De Protección, p. 14.

- **El sismo de 1902:**

El día 18 de abril a las 20:23:50 hrs. ocurrió un sismo fuerte que ocasionó daños principalmente en Quetzaltenango y Sololá. Hubo reportes de aproximadamente 200

muerdos, sin embargo es difícil pensar que un evento tan fuerte no cobrara más vidas. La magnitud del evento fue 7.5. Localización en 14.90 grados de latitud Norte, 91.50 grados de longitud Oeste, y 60 Km. de profundidad aproximadamente.

- **El terremoto de 1913:**

El día 8 de marzo a las 08:55 hrs. tuvo como principal acontecimiento la destrucción de Cuilapa, cabecera departamental de Santa Rosa, reportó muchas víctimas. Es importante mencionar que éste y otros eventos sucedidos en los fallamientos del Norte son de poca profundidad (5 a 6.5 Km.) y magnitud, lo que los hace ser muy locales y destruyen en un perímetro muy reducido del epicentro. No se tiene localización exacta del epicentro.

- **Los terremotos de 1917 y 1918:**

Dos de los eventos famosos del presente siglo. En realidad no fueron dos sismos, sino una serie, posiblemente un enjambre, en el cual las condiciones se prestaron para reconocer estos dos eventos como los más importantes. Después de elaborar una consulta por varios meses al respecto, se puede definir la actividad de la siguiente forma:

El 27 de noviembre de 1917 se hizo sentir un fuerte evento en las proximidades de la capital, para ser exactos, sus más fuertes efectos se sintieron en el municipio de Villa Nueva, equivocadamente la población lo consideró parte de la actividad del volcán de Pacaya, que se encuentra próximo a esa población. Al parecer, un período de actividad del volcán sucedió en esas fechas. Según información de los diarios de la época, la actividad de continuó percibiendo en los días subsiguientes; hasta que el día 26 de diciembre a las 05:21:00 hrs. una gran liberación de energía tuvo lugar y destruyó en gran parte el centro de la capital y las proximidades. A esta le sucedió otra, un posible post-evento (aftershock, continuación de la liberación de la energía), a las 06:18:00. Este acontecimiento prácticamente libera de posibilidades volcánicas a la actividad, puesto que los eventos volcánicos están limitados a una decena de kilómetros debido a su superficialidad.

A pesar de la destrucción del edificio ocupado por el principal diario que en ese entonces existía (diario de Centro América), para principios de 1918 se pudo recuperar un poco de información, la cual nos reporta el fenómeno con la misma intensidad en los alrededores a la capital (50 Km. por lo menos), lo que nos da como parámetro importante

la superficie del evento. Se reportaron más de 250 personas muertas. El lógico pensar que posterior a estos dos eventos, tuvieron que darse una serie de micro eventos para compensar el desplazamiento interno del terremoto ocurrido.

El 4 de enero de 1918, a las 04:30.10 y 04:32.25 hrs., dos nuevos eventos sacudieron la ciudad. El final de la fuerte actividad lo marcó el 24 de enero aproximadamente a las 07:30 hrs. Este último reportó bastantes daños, pero es lógico pensar que la ciudad había sufrido bastantes sacudidas; de tal manera que no se puede definir si el evento fue más o menos fuerte que los anteriores.

El 11 de enero de 1918 se hizo presente T. C. Morris, asistente en los trabajos de infraestructura en la zona del Canal de Panamá, quien obedeciendo órdenes superiores realizó un informe de lo observado; consideró de mucha importancia la opinión, puesto que la persona contaba con amplios conocimientos sobre construcción y define bien los daños a estructuras hechas de adobe y ladrillo, los cuales carecen de refuerzo y trabajan principalmente por gravedad.

De acuerdo a Morris, en su informe del 27 de febrero quien al parecer también tenía conocimientos sobre aspectos sismológicos, la actividad catalogada hasta ese entonces, de 9 grados de intensidad en la antigua escala de Rossi-Forel, fue definida por él de 5 grados en la misma escala, lo que implica 6 grados en la escala actual, aproximadamente (escala MM). No se tiene la localización exacta del hipocentro.

- **El terremoto de 1942:**

El día 6 de agosto a las 23:36.98 hrs. se registró el terremoto de mayor magnitud hasta la fecha $M_s = 8.3$. Tuvo localización en 13.9 grados latitud Norte y 90.8 grados longitud Oeste. La profundidad fue de 60 Km. y causó daños en los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez, Chimaltenango, San Marcos, Totonicapán, El Quiché, Sololá, Escuintla y Huehuetenango.

Departamento de San Marcos: En la cabecera departamental se dañaron varios edificios públicos, el resto de los municipios lo sintieron pero no reportaron daños.

- **El terremoto de 1959:**

Se registró el día 20 de febrero a las 18:16.33 hrs. Puede ser considerado como uno de los eventos destructores más al Norte del territorio nacional, tuvo localización en 15.94

grados latitud Norte y 90.59 grados longitud Oeste, la profundidad fue de 48 Km. El evento presentó los estragos más importantes en la población de Ixcán, departamento de El Quiché.

- **El terremoto de 1976:**

Al hablar de grandes terremotos en Guatemala, las mediciones matemáticas indican que el evento de 1942 ha sido el de mayor cantidad de liberación de energía en lo que va del siglo, sin embargo, no ha sido el más destructor. Posiblemente por la ubicación del evento y la menor población existente en la época influyeron en ello.

El evento que más estragos ha causado en el presente siglo es sin duda el terremoto de 1976. Fue registrado el día 4 de febrero a las 03:03:33 hrs., localizado en 15.32 grados latitud Norte y 89.10 grados longitud Oeste, de características superficiales, alrededor de 5 Km. de profundidad y magnitud $M_s = 7.5$ grados.

- **El terremoto de 1985:**

Registrado el 11 de octubre a las 03:39.17 hrs en el municipio de Uspantán, departamento de El Quiché. Se considera este evento importante por haber destruido una ciudad casi por completo, característico de los fallamientos del Norte, fue superficial (5 Km de profundidad), localizado en 15.3 grados latitud Norte y 90.9 grados longitud Oeste, magnitud $M_s = 5.0$ grados; posiblemente el evento de menor magnitud con efectos destructores en el presente siglo.

- **El terremoto de 1991:**

El 18 de septiembre a las 03:48:13 se produjo un evento sísmico superficial de 5.3 grados de magnitud, en la región Sur-Oeste de Chimaltenango, lo cual causó destrozos de por lo menos el 80% de la población de San Miguel Pochuta, registrándose una intensidad máxima de VII MM. En la zona de mayor desastre. Posterior al evento principal se desarrolló un enjambre sísmico que en las primeras 24 horas registró por lo menos 436 réplicas que oscilaron entre 0.6 y 4.0 grados de magnitud (M_c) detectados por la Red Sismográfica Nacional.

El saldo final fue de 25 personas muertas, 185 con heridas de consideración y 2,300 viviendas destruidas aproximadamente (Dato obtenido del informe de datos del Comité Nacional de Emergencia -CONE-).

Los parámetros básicos del evento principal obtenidos con la red son los siguientes: Su tiempo origen: 03:48:13, con epicentro: 14° 24.12'N, 91° 03.06'W, su profundidad focal: 32 Km., la magnitud: 5.3 Mc (INSIVUMEH) y máxima intensidad: VII M. M.

- **El terremoto de 1995:**

El 19 de diciembre a las 14:56:06 se registró un sismo de magnitud $M_l=5.3$ en la escala de Richter, localizado en 15.301°N y 90.154°W a una profundidad de 10 Km. Murió una persona y varias más resultaron heridas por derrumbes. Se reportaron algunas casas dañadas en San Miguel Tacurú y Tamahú, también hubo varios deslizamientos de tierra en la región epicentral. La máxima intensidad reportada fue IV (Cobán, Alta Verapaz) y fue sensible en la Ciudad Capital, con intensidad III.

- **El sismo de 1998:**

El 10 de enero a las 02:20:10 se produjo un sismo de magnitud 5.8 Mc en la Escala de Richter. Este evento inició una serie de réplicas que se extendió hasta el 20 de enero. El evento principal fue seguido de otro de menor magnitud, a las 02:37:31 hrs. la magnitud de este evento fue de 4.4 Mc en la Escala de Richter.

Todos los eventos sísmicos tuvieron sus epicentros en la zona de subducción, frente a las costas de Retalhuleu y Suchitepéquez. Esta actividad produjo aproximadamente 600 sismos entre el 10 y el 12 de enero, de los cuales 24 fueron reportados como sensibles. Hasta el 20 de enero se reportaron 35 sismos sensibles, con magnitudes entre los 3.3 Mc y 5.8 Mc grados en la Escala de Richter.

Este enjambre sísmico produjo daños en Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez, San Marcos, Sololá, Totonicapán, Escuintla y la Ciudad Capital. También fue sensible en Huehuetenango, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Santa Rosa; Tapachula, México; y en El Salvador.

Los parámetros básicos de los eventos principales son los siguientes: su tiempo origen: 02:20:10.7, con epicentro: 14° 00.13'N, 91° 45.60'W, su profundidad focal: 33 Km., la magnitud: 5.8 Mc (INSIVUMEH) y máxima intensidad: VII M. M. Otro parámetro con tiempo origen: 02:37:31.7, epicentro: 14° 14.94'N, 90° 57.12'W, su profundidad focal: 33 Km., la magnitud: 4.4 Mc (INSIVUMEH) y máxima intensidad: VI M. M.

Posteriormente, el 2 de marzo a las 20:24:46 hrs. se produjo un sismo de magnitud 5.6 Mc en la Escala de Richter. Después de una serie de réplicas, se registró un segundo

evento de magnitud 4.8 Mc en la Escala de Richter, a las 22:18:19 hrs. Nuevamente esta serie de sismos tuvo como área epicentral, la zona de subducción frente a las costas de Retalhuleu y Suchitepéquez.

Esta Actividad continuó hasta el 7 de marzo y produjo aproximadamente 400 sismos, de los cuales se reportaron 11 como sensibles, con magnitudes entre 3.5 Mc y 5.6 Mc en la Escala de Richter; y aunque no hubo reporte de pérdidas humanas, si hubo daños materiales en Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez, San Marcos y la Ciudad Capital. También fue sensible en Huehuetenango, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Escuintla y Tapachula, México.

Los parámetros básicos de los eventos principales son los siguientes: su tiempo origen: 20:24:46.0 (local), con epicentro: 13° 52.92'N, 91° 52.38'W, su profundidad focal: 33 Km., la magnitud: 5.6 Mc (INSIVUMEH) y máxima intensidad: V M. M., otro parámetro con tiempo origen: 22:17:19.3 (local), epicentro: 13° 59.76'N, 90° 48.54'W, su profundidad focal: 33 Km., la magnitud: 4.8 Mc (INSIVUMEH) y máxima intensidad: III M. M.

- **El sismo de 2009:**

El día 3 de mayo de 2009 a las 16:21:47 horas se registró un movimiento sísmico localizándose el epicentro a 14.58 grados longitud norte y 91.08 grados latitud Oeste, dentro del municipio de Patzun, departamento de Chimaltenango. Tuvo una intensidad de 5.6 Mw y fue precedido, el mismo día, por un sismo de magnitud 5.3 Mw

- **El sismo de 2011:**

El día 19 de septiembre de 2011 a las 13:34 horas se registró un movimiento sísmico localizándose el epicentro a 14.332 grados longitud Norte y 90.142 grados latitud Oeste, 53 Km al sureste de la Ciudad de Guatemala. Tuvo una magnitud de 5.8 Mw y VII MM. Este movimiento fue precedido de un sismo de magnitud 4.8 Mw, media hora del sismo principal, y fue seguido de dos sismos menores y gran número de microsismos.

- **El terremoto de 2012:**

El día 7 de noviembre de 2012 a las 16:35:47 horas se registró un terremoto con epicentro a 13.987 grados Longitud norte y 91.965 grados latitud Oeste, dentro del océano Pacífico a 35 Km al sur de Champerico. Tuvo una magnitud de 7.4 Mw y VII MM, se registraron 139 fallecidos, 175 lesionados y 26,010 damnificados; el departamento de San Marcos

donde se dañaron estructuras públicas y una gran cantidad de viviendas datos del INSIVUMEH y del USGS se produjeron ms de 180 réplicas con una magnitud de entre 3.5 y 6.5 Mw de las cuales 5 fueron fuertemente sensibles y pusieron en riesgo las misiones de rescate.

- **El terremoto de 2014:**

El 7 de julio de 2014 a las 5:24:01 horas se registró un terremoto con epicentro a 15 Km al nor-oeste del Municipio de Ocos, San Marcos, en una zona fronteriza con México. Tuvo una magnitud de 6.4 en la escala Richter III MM. Se registraron más de 250 réplicas y al menos 120 de ellas estuvieron entre los 2.8 y 4.7 magnitud Richter.

1.22 Sismos recientes que han afectado a la ciudad de San Marcos

En los últimos años la actividad sísmica en el territorio guatemalteco ha sido constante, específicamente del departamento de San Marcos, trascendiendo los sismos de las siguientes fechas:

- **Sismo ocurrido en 2012**

El terremoto de Guatemala del 7 de Noviembre de 2012 fue un movimiento telúrico con una magnitud de 7.4 Mw, ocurrido el miércoles 7 de noviembre de 2012 a las 10:35:47 hora local (16:35:47 UTC). El epicentro del sismo se situó en el océano Pacífico a 35 km al sur de Champerico, Guatemala. El sismo pudo percibirse en gran parte de Centroamérica, así como el centro y sudoeste de México.

El centro de aleta de Tsunamis del Pacifico emitió un aviso sobre la posibilidad de tsunami dentro de un área de 160 a320 km del epicentro (desde México hasta Colombia) Esta alerta fue cancelada posteriormente.

Este es el sismo más fuerte que se haya registrado después de 36 años cuando el terremoto del 4 de febrero de 1976 con una magnitud de 7.5 M_w el sismo sacudió el país dejando más de 23,000 muertos.

- **Sismo ocurrido en 2013**

Un temblor de 6.5 grados en la escala de Richter fue sensible la tarde del viernes 6 de septiembre de 2013 a las 18:13:30 en el territorio guatemalteco, el sismo fue sensible con mayor intensidad en la costa sur y en el centro de la república, con epicentro en

Pajapita, San Marcos, esto según los datos del USGS (United States Geological Survey).
 Hora del Evento: 2013-09-06 18:13:30 UTC-06:00 Localización 14.149°N 91.573°W
 depth=65.9km (41.0mi) Lugares con sensibilidad mayor al sismo: 6km de Pajapita, 8km
 de Ciudad Tecún Umán, 22km de Coatepeque, 168km Ciudad de Guatemala, 20km de
 Suchiate, México.

- **Sismo ocurrido en 2014**

Un fuerte sismo de 7.1 grados en la escala de Richter fue sensible la mañana del lunes 7 de julio de 2014 a las 5:23:58 en el territorio guatemalteco, el temblor fue reportado con mayor intensidad en los departamentos que colindan con la frontera con México siendo el epicentro en Puerto Madero, México esto según los datos del USGS (United States Geological Survey). Se reportaron daños en San Marcos debido a la cercanía del lugar del epicentro. Hora del Evento: 2014-07-07 05:23:58 UTC-06:00 Localización: 14.782°N 92.371°W depth=92.2km (57.3mi) Lugares con mayor sensibilidad al sismo: 8km (5mi) NE de Puerto Madero, México, 16km (10mi) SW de Tapachula, México 27km (17mi) WNW de Ciudad Tecún Umán, 30km (19mi) NNW de Suchiate, México 200km (124mi) W de Ciudad de Guatemala, datos obtenidos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. INSIVUMEH. A pesar de tener el conocimiento de que Guatemala está ubicada en una zona altamente sísmica no se cuenta con planes de prevención para saber de qué forma actuar ante eventos sísmicos.

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V

El método empleado para el estudio la razón espectral H/V, con el cual se estima el periodo fundamental y el factor de amplificación de un depósito de suelos a partir de mediciones de vibraciones asociadas a ruido ambiental o micro-temblores, aplicando la técnica de Nakamura.

Cabe mencionar que los depósitos de suelo están generalmente expuestos al ruido ambiental, el cual produce una sollicitación dinámica aleatoria, lo que permite que un depósito de suelos tienda a vibrar preponderantemente de acuerdo a su periodo fundamental. Se puede decir que un área de suelo tendrá una vibración, de acuerdo a las vibraciones naturales que posee el punto de estudio. La técnica de Nakamura se toma como base para el método de razón espectral H/V. La relación HVRS mide las componentes vertical y horizontal del ruido sísmico.

2.1 Método de Nakamura

Nakamura expuso en el año de 1989 que el cociente entre la componente horizontal y la componente vertical en el dominio frecuencial era un estimador del efecto de sitio, el cual corresponde a la transformación que sufren las ondas sísmicas desde la roca base, hasta la superficie y es diferente e independiente del efecto de interacción suelo estructura, ya que se presenta, esté o no una estructura en la superficie. En el efecto de sitio se considera las propiedades geológicas y dinámicas del material en el sitio, la topografía superficial, y la composición y dirección de la radiación incidente en la base rocosa.

Esta técnica se aplicó por primera vez a microtemblores de zonas urbanas de Japón. Este método ha sido ampliamente difundido en los últimos años y utilizado por la fiabilidad de sus resultados, acompañado de rapidez y economía en su ejecución.

Nakamura supone que la razón (H/V) o razón espectral corresponde a la función de transferencia de los niveles superficiales sometidos a movimientos horizontales. Basa su trabajo en la hipótesis de que un microtemblor está compuesto por un cuerpo principal de ondas y por ondas superficiales Ray Leigh, incluidas por fuentes artificiales (trenes, tráfico, etc.). Se considera que las componentes horizontal y vertical del registro son similares en la base rocosa.

Dichos registros son amplificados por las capas de suelo blando que yacen sobre el sustrato rocoso. Se considera además que las componentes horizontales (norte – sur y este – oeste) se amplifican debido a multirreflexiones de la onda P descritas anteriormente. La velocidad de propagación de la onda P es generalmente 10 Hz o menos pueden amplificarse, debido a la multirreflexión en las capas superficiales de varias decenas de metros de espesor. En la medida en que la relación aumenta, el efecto de las ondas Rayleigh puede volverse crítico. La propuesta de Nakamura pretende eliminar este efecto.

Por otra parte, el efecto de la onda Rayleigh aparece resaltado en el movimiento vertical, su efecto puede conocerse usando la componente vertical, haciendo la relación entre la superficie y el sustrato. Normalmente el efecto de la onda Rayleigh es cercano a uno, cuando la relación anterior es aproximadamente uno.

Se acepta que la componente horizontal de los temblores es amplificada por la multirreflexión de las ondas S (de corte), mientras que la componente vertical es amplificada por la multirreflexión de las ondas P (de compresión). Por otro lado, el efecto de las ondas Rayleigh aparece más marcadamente en la componente vertical y su efecto puede ser cuantificado, calculando la razón entre la componente vertical en superficie y la base del sustrato.

El método de Nakamura descrito permitiría obtener la función de transferencia completa del suelo en período y amplificación. Sin embargo, se ha comprobado empíricamente que la principal utilidad está en la determinación del período fundamental del suelo.

La estimación del espectro en el método de Nakamura requiere como entrada el cálculo de espectros por componentes del registro de micro vibración. El método procura eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Los micro temblores en la base rocosa se consideran similares, de forma vertical y horizontal.

La dimensión del efecto de Rayleigh puede reconocerse a partir de la relación que existe entre el movimiento vertical en superficie y el movimiento vertical en el afloramiento rocoso. Regularmente en efecto de la onda Rayleigh es cercano a cero cuando la relación es aproximadamente la unidad. En la medida en que la relación aumenta, el efecto de ondas Rayleigh puede tomarse crítico. La proposición de Nakamura pretende eliminar este efecto.

Se acepta que la componente horizontal de los temblores es amplificada por la multi-reflexión de las ondas S (de corte), mientras que la componente vertical es amplificada por la multi reflexión de las ondas P (de compresión). Por otro lado, el efecto de las ondas Rayleigh aparece más marcadamente en la componente vertical y su efecto puede ser cuantificado, calculando la razón entre la componente vertical en superficie y la base del substrato. En cuanto a la función de transferencia S_T de las capas de suelo, se puede definir con la siguiente fórmula:

$$S_T = \frac{S_H}{S_V}$$

En donde S_H concierne al espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal del movimiento en superficie y en la base del estrato de suelo. Puesto que el ruido ambiental se propaga como ondas Rayleigh, especialmente, se espera que el espectro S_H sea afectado por este tipo de ondas; así también el espectro de amplitudes de la componente vertical del movimiento en la superficie S_V . También es posible esperar que el ruido ambiental no afecte significativamente el espectro de la componente vertical del movimiento en la base S_V .

De la misma manera, se asume que la componente vertical del movimiento no sea amplificada por las capas de suelo. La función de transferencia E_S , definida en la siguiente ecuación.

$$E_S = \frac{S_H}{S_V}$$

Asumiendo además, que el efecto de las ondas Rayleigh es aproximadamente similar en la componente horizontal que en la vertical, resulta útil definir la función de transferencia S_{TT} , como:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S}$$

Con esta función de transferencia se considera que elimina el efecto de las ondas Rayleigh por lo cual se especifica lo siguiente:

$$R_S = \frac{S_H}{S_V} \text{ y } R_B = \frac{S_H}{S_V}$$

Teniendo en cuenta que la función de transferencia S_{TT} se puede plantear del modo siguiente:

$$S_{TT} = \frac{R_S}{R_B}$$

Basándose que el movimiento es igual en todas las direcciones, entonces el espectro de la componente horizontal del movimiento y el espectro de la componente vertical del movimiento son aproximadamente iguales, por lo que R_B logra valores en torno a la unidad.

$$S_{TT} = R_S$$

Esto expresa que la función de transferencia asociada a la propagación vertical de ondas de corte de un depósito de suelos en un punto específico, puede ser apreciada simplemente a partir del movimiento medido en superficie.

2.2 Ruido sísmico ambiental

La superficie terrestre vibra continuamente, con amplitudes muy pequeñas del orden de micrómetros, generados por el tránsito vehicular, operación de centros fabriles, el viento que hace oscilar los árboles, edificios, etc. Los resultados directos de las características geológicas locales, serán los efectos de los terremotos sobre construcciones existentes. Dependiendo de la intensidad y el periodo de duración, serán los daños que son causados por los terremotos. Los parámetros están muy influenciados por las propiedades del suelo en la zona, los cuales dependen de las características topográficas y geotécnicas existentes. El ruido sísmico ambiental se propaga principalmente como onda Ray Leigh.

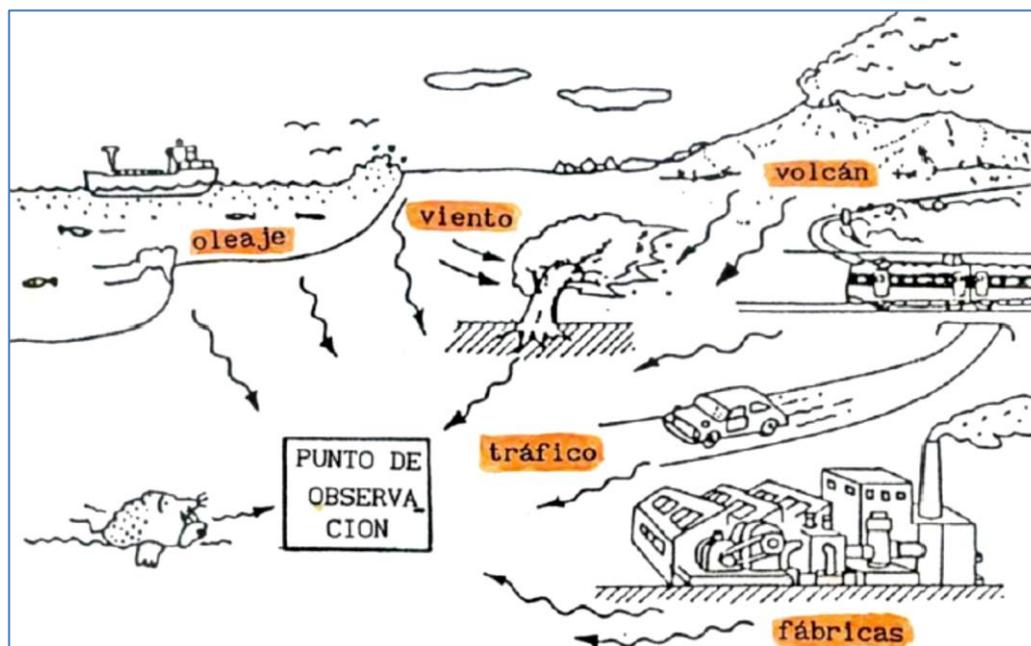
Las mediciones de ruido ambiental, se traducen en mapas, los cuales tienen el potencial de contribuir de manera significativa a la respuesta dinámica del suelo ante la excitación sísmica, en particular en zonas urbanas.

Los microtemores son vibraciones generadas por eventos artificiales, producto de la actividad humana tales como tráfico, maquinaria industrial y explosiones de dinamita, etc., cuya principal ventaja respecto a los microsismos es su estabilidad.

Los microtemores son compuestos principalmente por ondas Rayleigh. Son conocidos en lengua inglesa con el nombre de “microtremors” y en español no hay uniformidad en el nombre aplicado, encontrándose y usándose indiferentemente, con el mismo significado las siguientes palabras microtemores, micro-vibraciones, vibración ambiental y ruido cultural.

El ruido sísmico ambiental es parte de una señal sísmica, la cual contiene información acerca del movimiento característico del lugar en donde fue tomada la señal. El ruido es un proceso estocástico (impredecible) y con bastante probabilidad de ocurrir, es por eso que se puede realizar un estudio estadístico del mismo.

Figura 20. Fuentes de origen natural y artificial que originan ruido ambiental



Fuente: Hernández, O. (2009). Reevaluación del efecto de sitio y propuesta de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico para Managua, Nicaragua. 4,30

En la siguiente figura se muestra un evento grabado en un punto de las zonas trabajadas con el acelerógrafo Altus Kinematics K2:

Figura 21. Evento sísmico registrado



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que el acelerógrafo graba un pre evento, el evento y un post evento, en cada uno de estos tres son captados por el acelerógrafo. Para ver de mejor manera se hace un acercamiento, como se muestra en la figura 21.

Demostrando así en la figura 22, que el ruido ambiental que no es sensible para la persona, con la ayuda del acelerógrafo es posible, esto ayuda a su posterior estudio.

Figura 22. Señal de ruido ambiental

Fuente: Autor

2.3 Transformada de Fourier (Amplitudes Espectrales)

Llamada de esta manera por Joseph Fourier, es una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia, que tiene muchas aplicaciones en la física y la ingeniería. Por lo tanto en esta aplicación, se obtienen los valores de frecuencia a partir de los valores espaciales y con esto se obtienen curvas espectrales de aceleración en el tiempo (Espectros de Fourier). La transformada de Fourier es básicamente el espectro de frecuencias de una función.

2.4 Función de transferencia empírica

En este tipo de estudio la función de transferencia empírica es el resultado del cociente de los datos de la transformada de Fourier realizada a su componente horizontal, ya sea Norte-Sur o Este-Oeste, entre su componente vertical se como resultado amplitudes de razones espectrales, esto para estimar la función de amplificación de un estrato de suelo con respecto a otro que tiene características diferentes o similares de acuerdo al punto de estudio.

2.5 Microzonificación sísmica

El estudio de microzonificación sísmica tiene como fin la identificación y caracterización de unidades litológicas, generalmente suelos cuyas respuestas dinámica frente a terremotos son similares. Para cada una de estas zonas, además de especificarse la fuerza sísmica posible. El movimiento en la superficie del terreno en un sitio dado puede diferir totalmente del que se tiene en roca base, esto debido a las alteraciones de las ondas causadas por efectos geológicos, topográficos y de rigidez del suelo. Las alteraciones son llamadas en términos generales como efectos locales o efecto de sitio. La microzonificación de las áreas donde se encuentran asentamientos humanos, sirve para detectar aquellas zonas que presentan problemas especiales.

El estudio de microzonificación sísmica es un medio para la estimación de riesgo sísmico a partir del movimiento del suelo y algunos fenómenos relacionados, tomando en cuenta los

efectos de las condiciones locales de sitio. El subsuelo y las condiciones topográficas que pueden amplificar o reducir el umbral de aceleración del suelo.

2.6 Instrumentación

- **Acelerógrafo:**

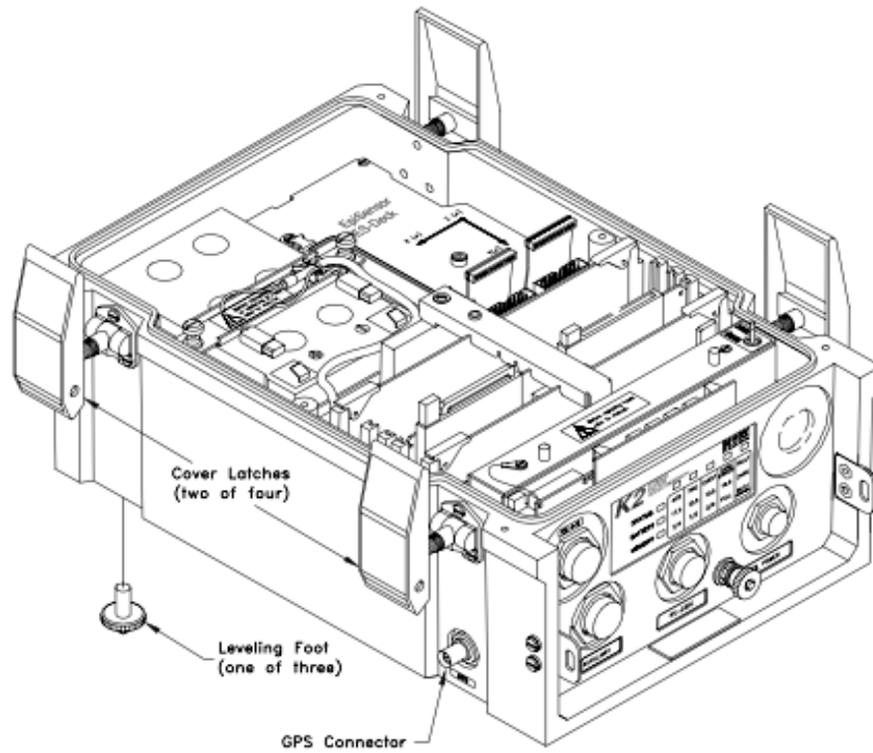
El Acelerógrafo es un dispositivo que mide la aceleración que actúa sobre los suelos y los edificios, funcionan con los mismos principios que un sismógrafo pero sus características dinámicas son tales, que son más sensibles a los cambios de la aceleración que a los de velocidad, su relación masa/rigidez es más pequeña que la de un sismógrafo ya que la rigidez es mucho mayor para poder tener una amplificación menor y captar un registro sísmico completo en el acelerograma, su sensibilidad disminuye haciéndolo apto para registrar eventos sísmicos de mayor magnitud. Poseen dispositivos de arranque que se activan cuando el movimiento alcanza cierta magnitud, entra en operación cuando se sobrepasa el umbral establecido.

Han evolucionado considerablemente desde los años 30, los más modernos captan la información en una memoria o cinta magnética, esto propicia una ventaja ya que se puede procesar dicha información rápidamente con la ayuda de un programa de computadora, normalmente registran los cambios de aceleración en función del tiempo en las direcciones de los tres ejes coordenados.

El acelerógrafo tiene una memoria de pre-evento, que es el almacenamiento disponible para guardar los valores anteriores al umbral de activación, este umbral es un valor de aceleración predeterminado, que una vez que se alcanza, permite que el equipo almacene información. También posee una memoria post-evento, para el almacenamiento después de cierto tiempo que se haya dejado de cumplir con el umbral de activación para poder tener el registro completo del sismo.

Este dispositivo está comprendido entre dos partes principales que son los sensores y el registrador, los primeros se componen de acelerómetros con arreglos triaxiales en forma ortogonal, el registrador tiene tres componentes, la primera de sus partes realiza la conversión analógica-digital, la segunda se encarga del control de datos y la última de su almacenamiento. Su operación consiste en convertir las señales análogas de los sensores a muestras digitales.

Figura 23. Acelerógrafo Altus Kinematics K2



Fuente: Altus digital recorder user manual. pág. 15.

Figura 24. Acelerógrafo Altus Kinematics K2 propiedad de la División de Ciencias de Ingeniería CUNOC



Fuente: Autor.

- **GPS:**

Las siglas GPS (Global position system) Sistema de posicionamiento global, es un sistema de radio navegación de los Estados Unidos de América, basado en el espacio, que proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación y cronometría gratuita e ininterrumpidamente a usuarios civiles en todo el mundo. A todo el que cuente con un receptor del GPS, el sistema le proporcionará localización y hora exacta en cualesquiera condiciones atmosféricas, de día o de noche, en cualquier lugar del mundo y sin límite al número de usuarios simultáneos.

El dispositivo comienza a recibir señales de satélite una vez sea encendido. Es posible que el dispositivo deba disponer una vista clara del cielo para adquirir señales de satélites. Cuando las barras de GPS de la página de retroiluminación sean de color verde continuo el dispositivo habrá adquirido la señal satélite. La hora y fecha se establecen automáticamente según la posición GPS.

Figura 25. GPS Garmin eTrex 10



Fuente: <http://www.gpstotal.com.bo/articulo.aspx?art=83>

2.7 Software

- **Quick talk:**

Después de haber recolectado datos con el acelerógrafo Altus Kinematics K2, el aparato cuenta con lenguaje de comunicación propio, conectado por medio del cable de RS-232C (anexo 2, Cifuentes, Pavel. 2014).

- **Google Earth:**

Es un programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en fotografía satelital. (es.wikipedia.org/Google_Earth)

- **Degtra A4(XP)**

Es un software de Shareware en la categoría de educación desarrollado por Instituto de Ingeniería, UNAM, México (degtra-a4-xp.updatestar/es) permite trabajar con las 3 componentes de extensión .001, .002 y .003.

- **ArcGis**

Es un software en donde se pueden compilar datos geográficos o la creación de mapas georreferenciados.

- **ArcMap** Software de ArcGis, representa la información geográfica de una colección de capas y otros elementos en una vista de mapa. (desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/get-started/introduction/a-quick-tour-of-arcmap.htm)

- **Geopsy:**

Software de código abierto para la investigación y aplicaciones Geofísicas, proporciona herramientas para procesar vibraciones del suelo.

- **Dinver:**

Software incluido en Geopsy, para el análisis de vibraciones de suelo.

CAPÍTULO 3

UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V (MÉTODO DE NAKAMURA) EN LAS ZONAS 2 Y 4.

3.1 Identificación de los puntos

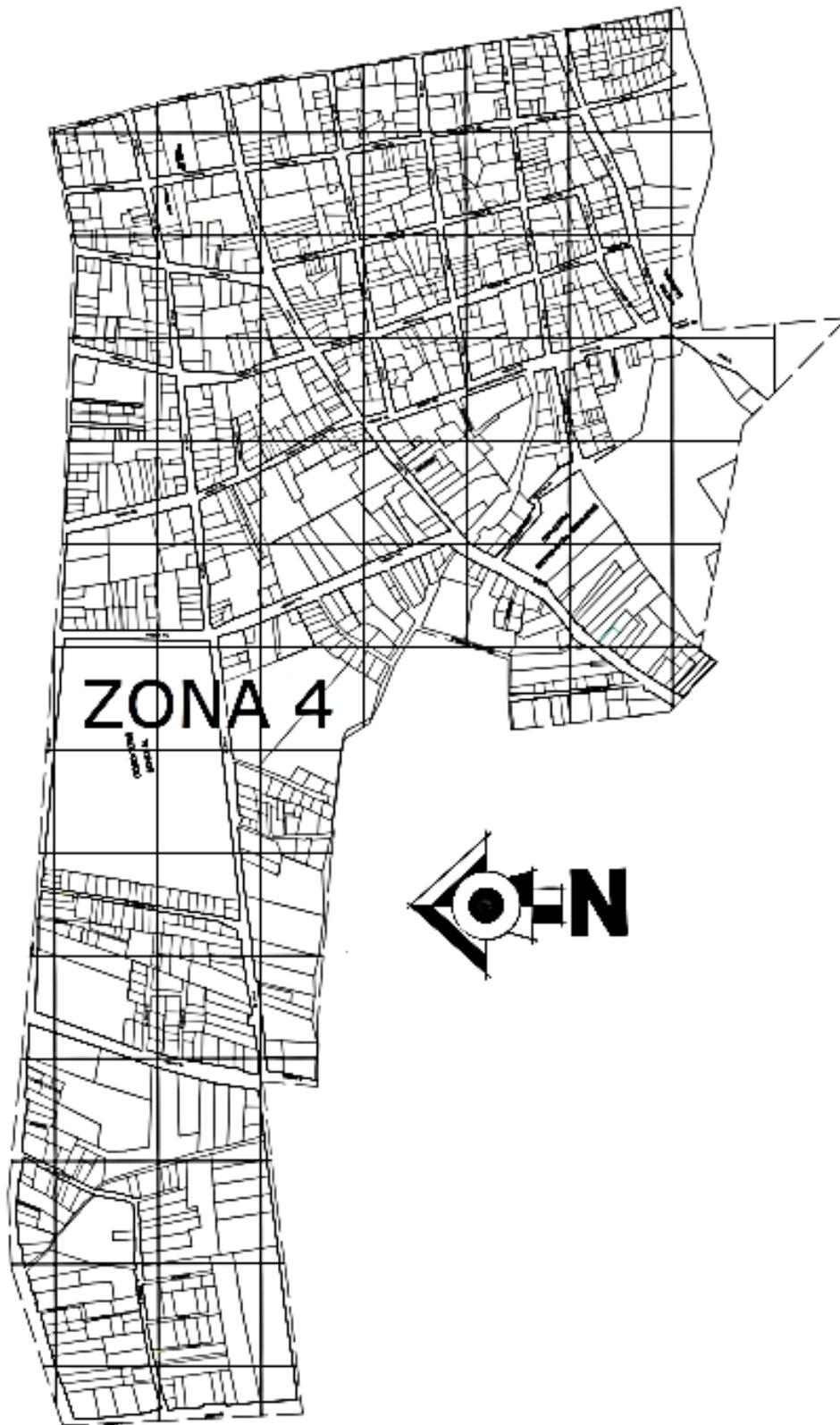
Para dar inicio a la estimación de cada uno de los puntos, se traza una cuadrícula (grilla) de cada una de las zonas a estudiar. En este caso las zona 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos, presenta una cuadrícula con separación de 100m. En cada una de las zonas de estudio, la mayoría de puntos de intersección no se encontraron en lugares donde se tuviera acceso, por lo que fue necesario realizar la medición en la calle o avenida más cercana. Algunos otros puntos con ayuda directa de la DMP, se tuvo acceso.

Figura 26. Grilla propuesta para la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

Figura 27. Grilla propuesta para la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

3.2 Toma de registros

3.2.1 *Ubicación de puntos*

En base a la cuadrícula realizada en los mapas de las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos, teniendo en cuenta que cada uno de los puntos ubicados, son de gran utilidad, por lo que quedaron debidamente georreferenciados. A través del software Google Earth se facilitó la ubicación por punto, haciendo una mejor distribución en las zonas de estudio.

Tabla 4. Georreferencia de puntos estudiados de la zona 2, San Marcos

COORDENADAS ZONA 2		
PUNTO	LATITUD	LONGITUD
P1	14.96426667	-91.78972222
P2	14.96326389	-91.78979444
P3	14.96148333	-91.78983889
P4	14.96100556	-91.79078889
P5	14.97840278	-91.79075833
P6	14.96231944	-91.79139722
P7	14.96387778	-91.79067222
P8	14.96333056	-91.79162500
P9	14.96194722	-91.79178611
P10	14.96104167	-91.79158056
P11	14.96013333	-91.79173889
P12	14.95940556	-91.79183611
P13	14.95959444	-91.79271111
P14	14.96018333	-91.79318611
P15	14.96109444	-91.79302778
P16	14.96199444	-91.79291111
P17	14.96287500	-91.79257222
P18	14.96376111	-91.79268889
P19	14.96382778	-91.79346667
P20	14.96293333	-91.79363889
P21	14.96203611	-91.79353611
P22	14.96112500	-91.79384167
P23	14.96050000	-91.79359722
P24	14.95962778	-91.79330556
P25	14.95792778	-91.79493056
P26	14.97512778	-91.79510000
P27	14.97603056	-91.79488611
P28	14.97693056	-91.79481944
P29	14.96115833	-91.79467500

P30	14.96205833	-91.79455278
P31	14.96296389	-91.79450833
P32	14.96387500	-91.79475000
P33	14.96469444	-91.79532222
P34	14.96390556	-91.79563611
P35	14.97966944	-91.79560000
P36	14.97876111	-91.79555000
P37	14.96119167	-91.79559444
P38	14.96028889	-91.79560556
P39	14.95930556	-91.79551389
P40	14.95848611	-91.79571667
P41	14.95790278	-91.79577778

Fuente: Autor

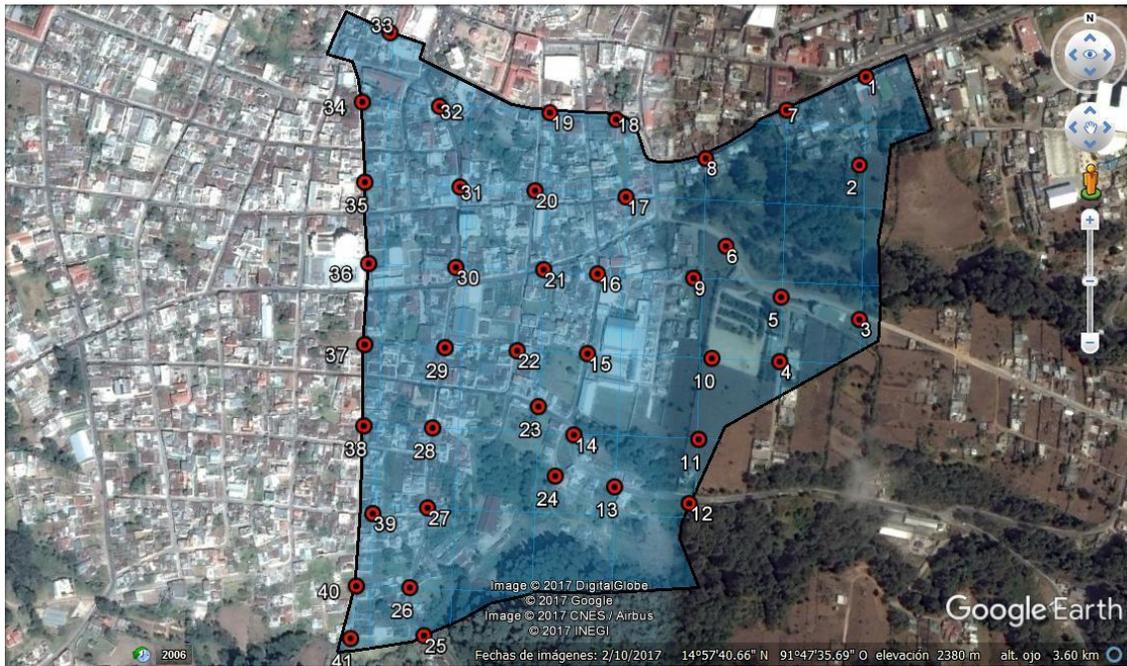
Tabla 5. Georreferencia de puntos estudiados de la zona 4, San Marcos

COORDENADAS ZONA 4		
PUNTO	LATITUD	LONGITUD
P1	14.963028	-91.796261
P2	14.962125	-91.796319
P3	14.961225	-91.796364
P4	14.960319	-91.796400
P5	14.959417	-91.796442
P6	14.958511	-91.796456
P7	14.958569	-91.797403
P8	14.959461	-91.797367
P9	14.960350	-91.797219
P10	14.961258	-91.797247
P11	14.962161	-91.797256
P12	14.963056	-91.796906
P13	14.963094	-91.797878
P14	14.962197	-91.798181
P15	14.961294	-91.798083
P16	14.960383	-91.797978
P17	14.959489	-91.798297
P18	14.958667	-91.798331
P19	14.957417	-91.799694
P20	14.957711	-91.799111
P21	14.960028	-91.798667
P22	14.960422	-91.799022
P23	14.961106	-91.799161
P24	14.962231	-91.799033

P25	14.963139	-91.799156
P26	14.964050	-91.799039
P27	14.964311	-91.799961
P28	14.963186	-91.800339
P29	14.962281	-91.800264
P30	14.961367	-91.800083
P31	14.960686	-91.799961
P32	14.959667	-91.798750
P33	14.959278	-91.798556
P34	14.959092	-91.801842
P35	14.959744	-91.801069
P36	14.960164	-91.800514
P37	14.961739	-91.800803
P38	14.963086	-91.800933
P39	14.963756	-91.800914
P40	14.964600	-91.800881
P41	14.964389	-91.801639
P42	14.963544	-91.801853
P43	14.962711	-91.801883
P44	14.963256	-91.802789
P45	14.964172	-91.802753
P46	14.965167	-91.802717
P47	14.965125	-91.803647
P48	14.964458	-91.803992
P49	14.963383	-91.803722
P50	14.963583	-91.804422
P51	14.963583	-91.804944
P52	14.965639	-91.804278
P53	14.965953	-91.805475
P54	14.965178	-91.805108
P55	14.964842	-91.805519
P56	14.963667	-91.805861
P57	14.963700	-91.806500
P58	14.964814	-91.806397
P59	14.965914	-91.806408
P60	14.965775	-91.807133
P61	14.965031	-91.807192
P62	14.963803	-91.807372

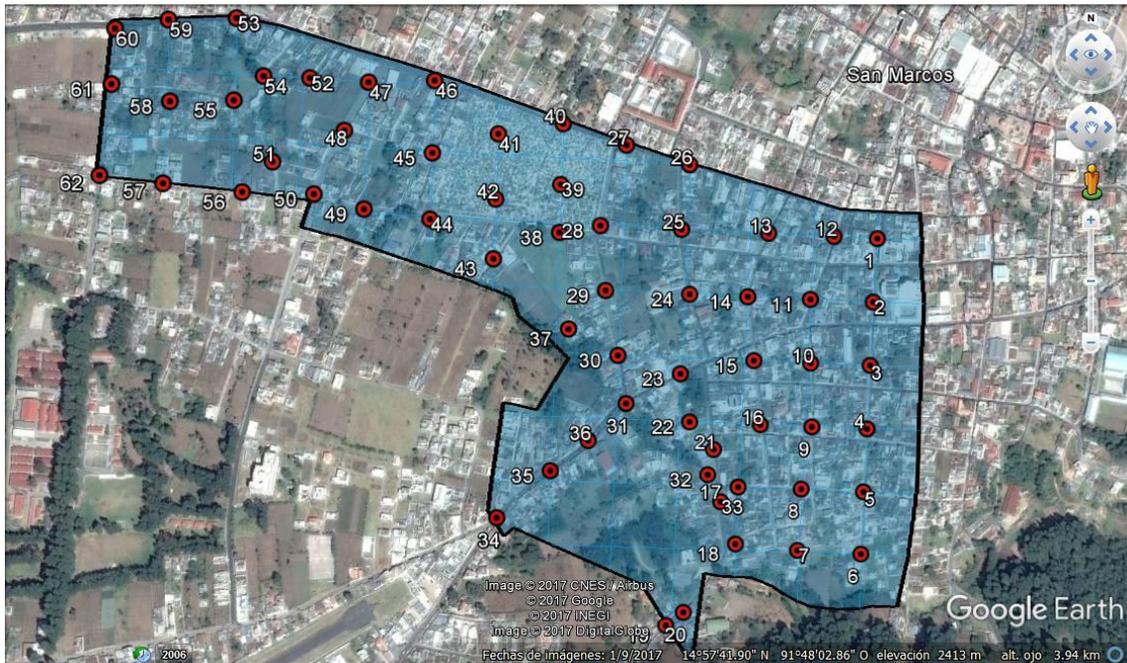
Fuente: Autor

Figura 28. Ubicación de puntos de medición de señales de ruido sísmico para la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

Figura 29. Ubicación de puntos de medición de señales de ruido sísmico para la zona 4 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

3.2.2 *Medición de ruido ambiental*

Las mediciones de cada uno de los puntos en las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos, se realizaron de noche, tomando tres mediciones por punto, esto dependiendo si no existían interferencias, como el tráfico, peatones y otros. Si existía algo que alterara la medición se aumentaba el número de mediciones por punto a 4 o 5. Al inicio de las mediciones, el acelerógrafo debía estar debidamente orientado con brújula, de tal forma que una de sus componentes quedara en dirección Norte-Sur y la otra en dirección Este-Oeste, esto así en todos los puntos que se midieron. Además de orientar el acelerógrafo se niveló para así obtener datos precisos.

Fotografía 1. Orientación de acelerógrafo Altus Kinematics K2



Fuente: Autor

Fotografía 2. Acelerógrafo, registrando medición de ruido ambiental



Fuente: Autor

Fotografía 3. Mediciones zona 2, cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

Fotografía 4. Mediciones zona 4, cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

3.3 Estudio de datos

3.3.1 *Análisis de componentes de archivo*

Al importar cada una de las mediciones recolectadas con el acelerógrafo Altus Kinematics K2 al computador, con la ayuda del software QuickTalk de Kinematics cable y del cable de RS-232c.

Cada uno de los datos recolectados en las mediciones está contenidos en un archivo de extensión “.EVT”. El software utilizado para el análisis de datos, para utilizarlo, se debe de dividir en sus tres componentes (horizontal, vertical y transversal) con la ayuda de la herramienta KW2SAC32.exe, la cual crea cuatro archivos, que son de extensión “.001”, “.002”, “.003” que son componentes de registro horizontal, vertical y transversal, también “.SHD” que contiene la información de configuración con que se realizó la medición. Al efectuar este proceso para cada una de las tres mediciones que se realizaron por punto, de las zonas a estudiar, en este caso las 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos.

3.3.2 *Uso del método de razón espectral H/V (Método de Nakamura)*

Se procedió a importar al computador cada una de las componentes por medición con la ayuda del software Degtra A4, teniendo abiertas para este proceso únicamente tres ventanas.

3.3.2.1. *Corrección de línea base*

Permite remover la componente DC de la señal y así tener una mejor precisión al procesar cada uno de los datos.

3.3.2.2. *Selección de ruido estable*

Se realiza la selección con mayor contenido de ruido estable o estacionario y el descarte de las partes que contienen ruido puntual producido por fuentes singulares o muy locales.

3.3.2.3. *Eliminación del ruido puntual*

Cortando la señal estable se elimina el ruido puntual. En este caso se utilizó un tamaño de ventana que tuviera una muestra de $1200 < N_p < 1700$, de manera que generara una serie de datos de 1023.

3.3.2.4. *Cálculo de espectro de Fourier*

Al tener las tres ventanas con la señal seleccionada, se calcula el espectro de Fourier para cada uno de los componentes de la señal.

3.3.2.5. Cálculo de cocientes (H/V)

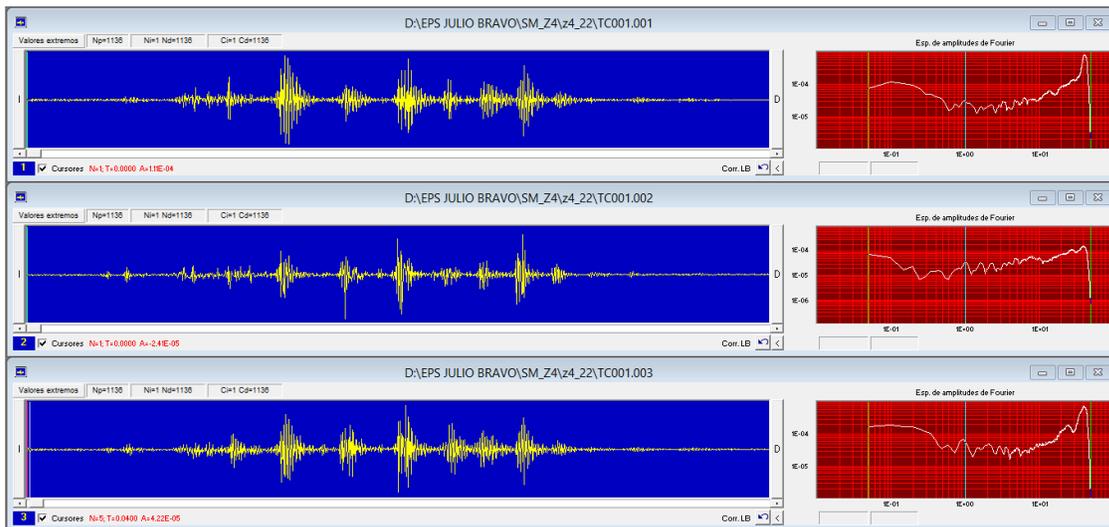
Utilizando los espectros de las componentes horizontales entre la componente vertical, los resultados se exportan a un archivo de texto para su análisis.

Figura 30. Ejemplo de señal estable cortada, punto 22 zona 4 San Marcos



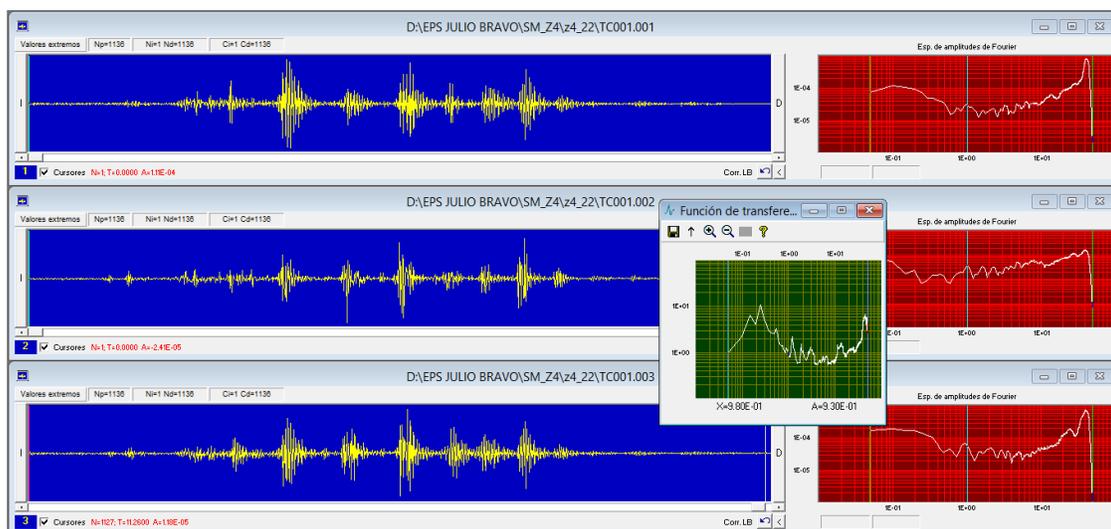
Fuente: Autor

Figura 31. Ventana resultante en programa Degtra A4 luego del cálculo de espectros de Fourier



Fuente: Autor

Figura 32. Ventana resultante luego del cálculo de una función de transferencia (Razón espectral)



Fuente: Autor

3.3.3 Gráficas de razones espectrales

Los archivos de extensión .txt se importan a Excel, creando así una tabla que contiene la frecuencia, las dos razones espectrales obtenidas tanto como el promedio de las dos razones espectrales, el proceso se repite para cada medición estudiada

Tabla 6. Segmento de tabla de ordenamiento de datos de razones espectrales

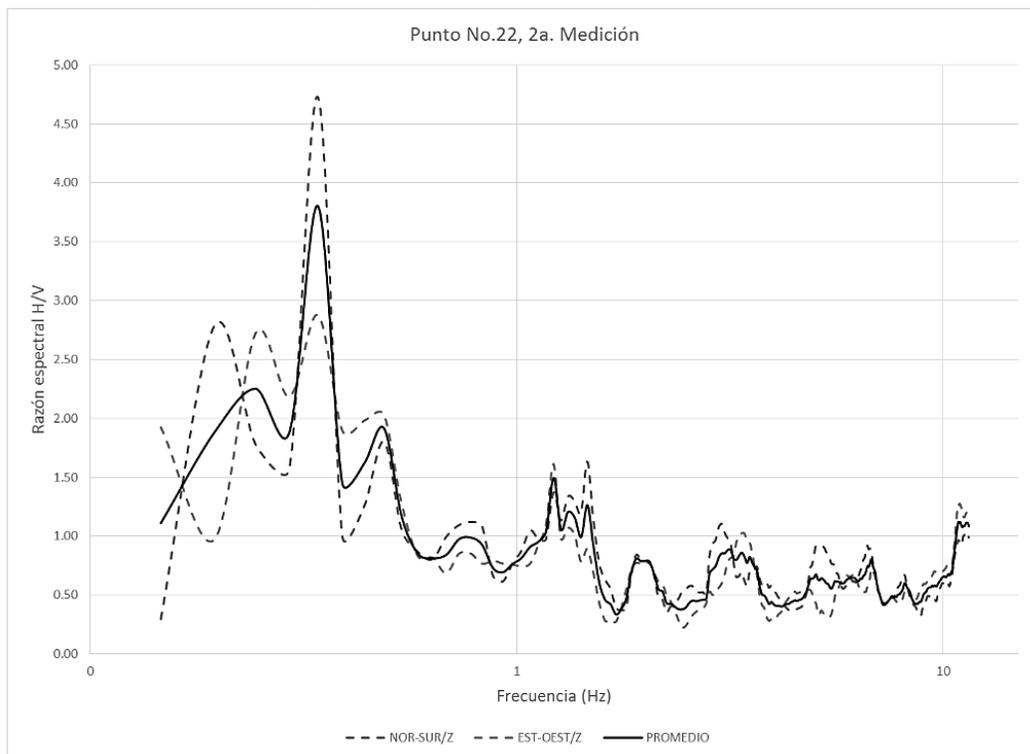
FRECUENCIA	NOR-SUR/Z	EST-OEST/Z	PROMEDIO
0	0.58	0.39	0.49
0	0.68	0.52	0.60
0	0.36	1.63	1.00
0	0.60	1.62	1.11
0	0.78	2.49	1.64
0	0.30	0.44	0.37
0	0.49	2.40	1.45
0	0.03	1.26	0.65
0	0.28	1.21	0.74
0	0.44	0.88	0.66
1	0.77	1.79	1.28
1	0.93	2.53	1.73
1	1.11	3.95	2.53

Fuente: Autor

Con los datos de la tabla se obtiene una gráfica de dispersión lineal semilogarítmica. Para los intereses de este estudio, se grafican directamente los datos con frecuencias entre 0 y 20Hz. Esto para apreciar de mejor manera el comportamiento de la gráfica en las frecuencias que se encuentren entre 1 y 10Hz.

La gráfica 1, presenta la segunda medición del punto P22 de la zona 4 de la cabecera; en esta se observa que la amplitud máxima genera una frecuencia de los 1.22Hz., indicando que este punto tiene comportamientos propios de frecuencias bajas y por simple inspección se puede suponer que tiene cambios de estratos o suelos bien consolidados a buena profundidad; esto se comprueba en los análisis posteriores. Con la gráfica 1 se obtiene la amplitud máxima de la frecuencia en que se produce. Este proceso se lleva a cabo con cada medición seleccionada. Por cada punto de estudio se realizaron tres mediciones; estos datos se exportan a otra tabla, que contiene el punto de estudio, las tres frecuencias las que producen la máxima amplitud de razón espectral y el promedio de ellas. Las gráficas obtenidas de cada uno de los puntos se presentan a continuación:

Gráfica 1. Ejemplo de grafica de Razón Espectral (2da. medición punto 22, zona 2)



Fuente: Autor

3.3.4 *Creación de tabla de frecuencias*

Tabla 7. Frecuencias generadas y frecuencia promedio de cada punto de estudio zona 2 cabecera departamental de San Marcos

PUNTO	f₁	f₂	f₃	PROMEDIO (f_s)
P1	0.88	0.63	0.54	0.68
P2	0.59	3.03	3.52	2.38
P3	3.81	3.56	3.27	3.55
P4	0.54	3.27	3.76	2.52
P5	0.54	2.44	3.86	2.28
P6	3.47	5.37	5.03	4.62
P7	4.39	0.63	1.81	2.28
P8	0.88	4.20	2.20	2.43
P9	2.59	0.59	1.46	1.55
P10	4.64	3.13	4.49	4.09
P11	4.10	3.13	4.49	3.91
P12	0.59	0.59	0.54	0.57
P13	0.68	3.37	4.98	3.01
P14	0.59	3.32	0.59	1.50
P15	4.15	0.63	0.54	1.77
P16	0.59	0.59	4.15	1.77
P17	0.63	0.68	1.27	0.86
P18	2.64	2.54	1.42	2.20
P19	0.59	1.03	0.88	0.83
P20	0.68	1.66	0.54	0.96
P21	1.17	0.54	0.88	0.86
P22	0.73	0.63	3.32	1.56
P23	0.78	3.71	3.17	2.56
P24	1.27	6.74	4.30	4.10
P25	0.68	0.83	0.59	0.70
P26	0.54	0.59	0.73	0.62
P27	0.59	1.61	1.17	1.12
P28	0.54	0.54	1.27	0.78
P29	0.54	0.54	0.78	0.62
P30	0.88	0.63	0.68	0.73
P31	0.54	2.78	0.68	1.33
P32	0.63	0.54	0.73	0.63
P33	2.44	1.32	2.83	2.20
P34	0.73	4.05	3.71	2.83
P35	0.83	1.22	0.54	0.86
P36	2.39	0.63	2.73	1.92
P37	2.59	2.44	2.64	2.56

P38	2.83	0.73	0.54	1.37
P39	0.83	1.81	3.22	1.95
P40	4.00	6.15	8.69	6.28
P41	3.22	2.78	0.54	2.18

Fuente: Autor

Tabla 8. Frecuencias generadas y frecuencia promedio de cada punto de estudio zona 4 cabecera departamental de San Marcos

PUNTO	f₁	f₂	f₃	PROMEDIO (f_s)
P1	0.88	2.05	0.73	1.22
P2	1.12	1.22	0.63	0.99
P3	0.88	0.54	2.78	1.40
P4	0.88	1.61	1.37	1.29
P5	1.76	3.61	2.73	2.70
P6	2.10	0.88	0.63	1.20
P7	2.59	0.63	0.88	1.37
P8	0.83	0.83	1.27	0.98
P9	0.88	0.54	0.63	0.68
P10	1.22	3.03	1.07	1.77
P11	1.17	0.54	0.68	0.80
P12	3.56	2.49	2.73	2.93
P13	2.83	3.27	0.78	2.29
P14	2.44	0.78	3.37	2.20
P15	0.68	4.44	2.78	2.64
P16	3.91	0.68	2.83	2.47
P17	1.07	0.54	0.63	0.75
P18	0.83	1.66	1.76	1.42
P19	0.88	2.88	2.93	2.23
P20	0.73	0.59	0.88	0.73
P21	1.12	0.54	0.73	0.80
P22	0.59	1.22	0.54	0.78
P23	0.54	1.12	0.78	0.81
P24	0.54	2.78	1.17	1.50
P25	0.88	2.44	2.98	2.10
P26	2.35	0.68	0.83	1.29
P27	0.54	0.68	1.66	0.96
P28	4.10	0.59	1.17	1.95
P29	3.22	3.56	0.73	2.51
P30	0.88	2.73	2.49	2.03
P31	3.66	0.88	1.12	1.89

P32	10.50	8.45	10.11	9.68
P33	1.71	3.42	0.88	2.00
P34	0.68	0.54	1.17	0.80
P35	2.49	2.64	0.65	1.92
P36	0.73	1.32	1.22	1.09
P37	3.32	0.73	0.54	1.53
P38	1.17	1.56	1.90	1.55
P39	4.35	1.03	0.54	1.97
P40	2.59	2.54	0.59	1.90
P41	3.03	1.32	1.22	1.86
P42	0.83	0.54	0.54	0.63
P43	0.54	1.27	4.30	2.03
P44	1.17	0.63	0.83	0.88
P45	0.54	0.54	0.54	0.54
P46	1.22	1.39	0.88	1.16
P47	2.00	0.88	0.98	1.29
P48	0.83	1.22	1.17	1.07
P49	0.59	1.61	0.68	0.96
P50	2.73	0.78	0.73	1.42
P51	1.71	0.73	1.22	1.22
P52	4.44	0.78	2.15	2.46
P53	0.68	0.63	1.37	0.90
P54	1.22	1.56	4.49	2.43
P55	3.37	1.22	3.37	2.65
P56	2.34	1.17	1.71	1.74
P57	1.86	0.78	0.68	1.11
P58	0.63	0.54	1.56	0.91
P59	2.34	2.64	0.54	1.84
P60	8.25	8.59	8.59	8.48
P61	3.32	1.56	3.47	2.78
P62	1.22	1.17	2.34	1.58

Fuente: Autor

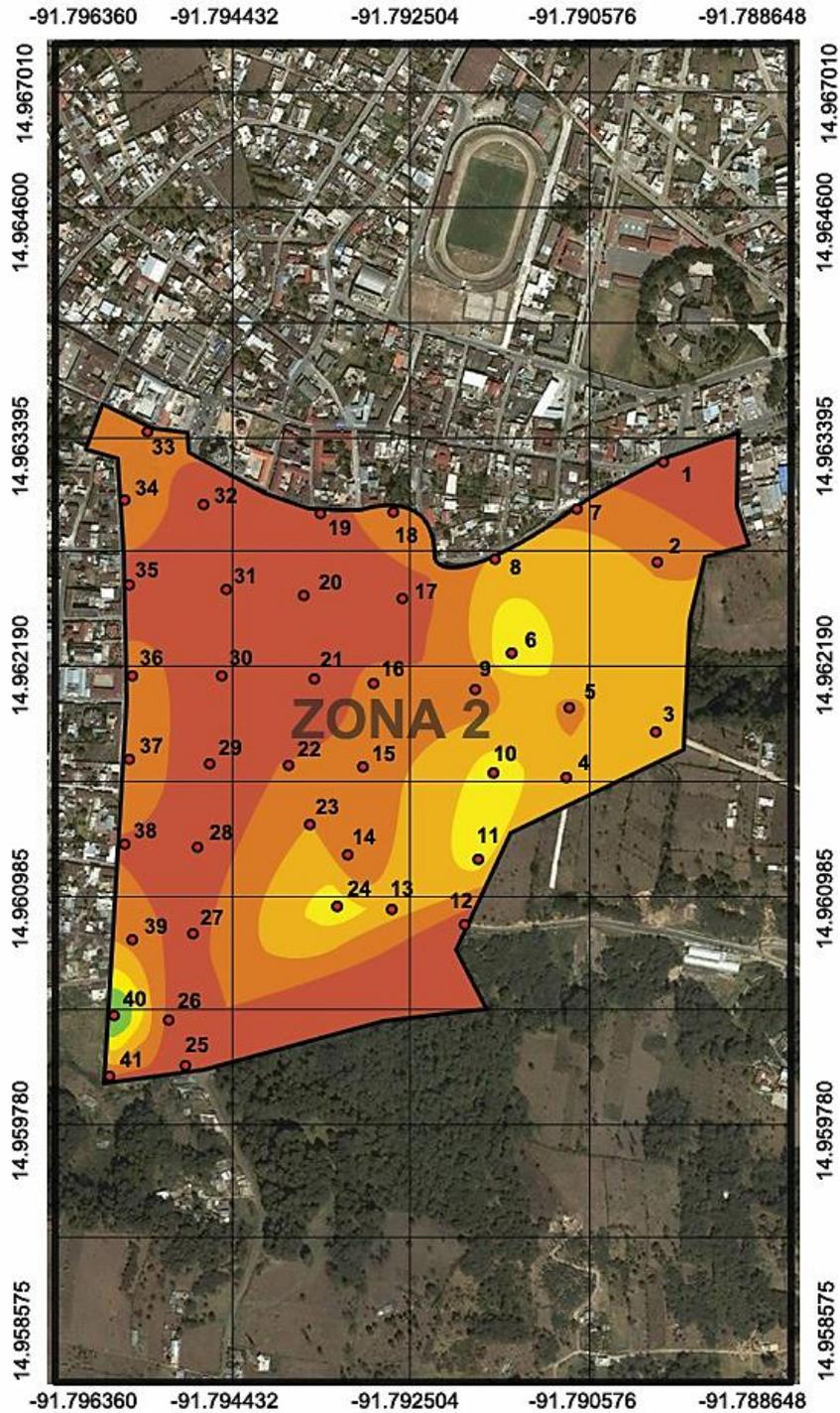
3.4 Mapa de microzonificación sísmica para las zonas 2 y 4 de San Marcos

3.4.1 *Interpolación de frecuencias*

Al utilizar el software ArcMap, se interpolaron las frecuencias de los puntos que fueron debidamente señalados de acuerdo con las coordenadas geográficas y georreferenciados, esto para tener un mejor posicionamiento en la superficie terrestre, en base a la frecuencia promedio por cada punto. El resultado de esta interpolación es el mapa de la ciudad con pequeñas zonas con similar valor de frecuencia.

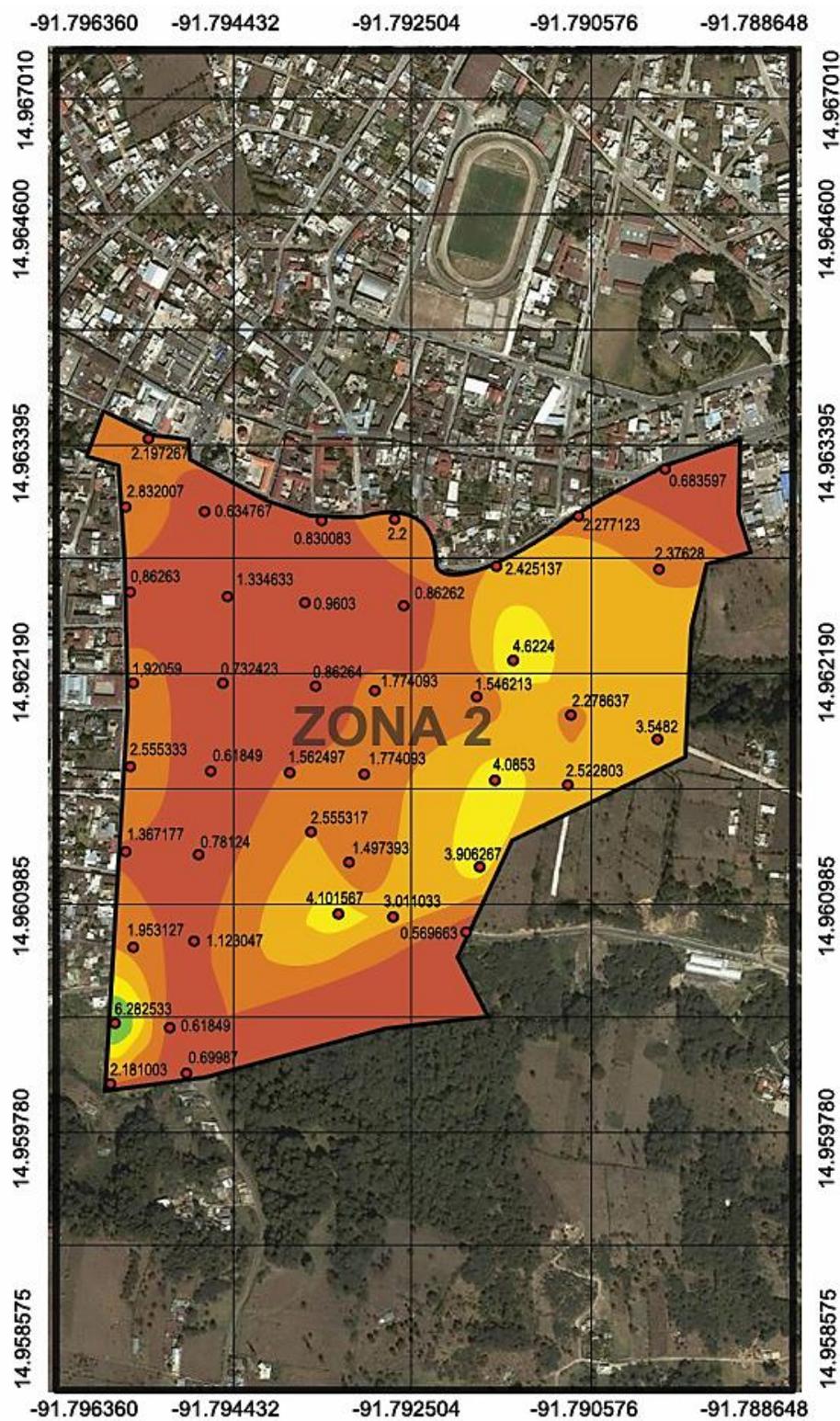
3.5 Realización del mapa de microzonificación para las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos

Figura 33. Mapa de microzonificación sísmica de la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos



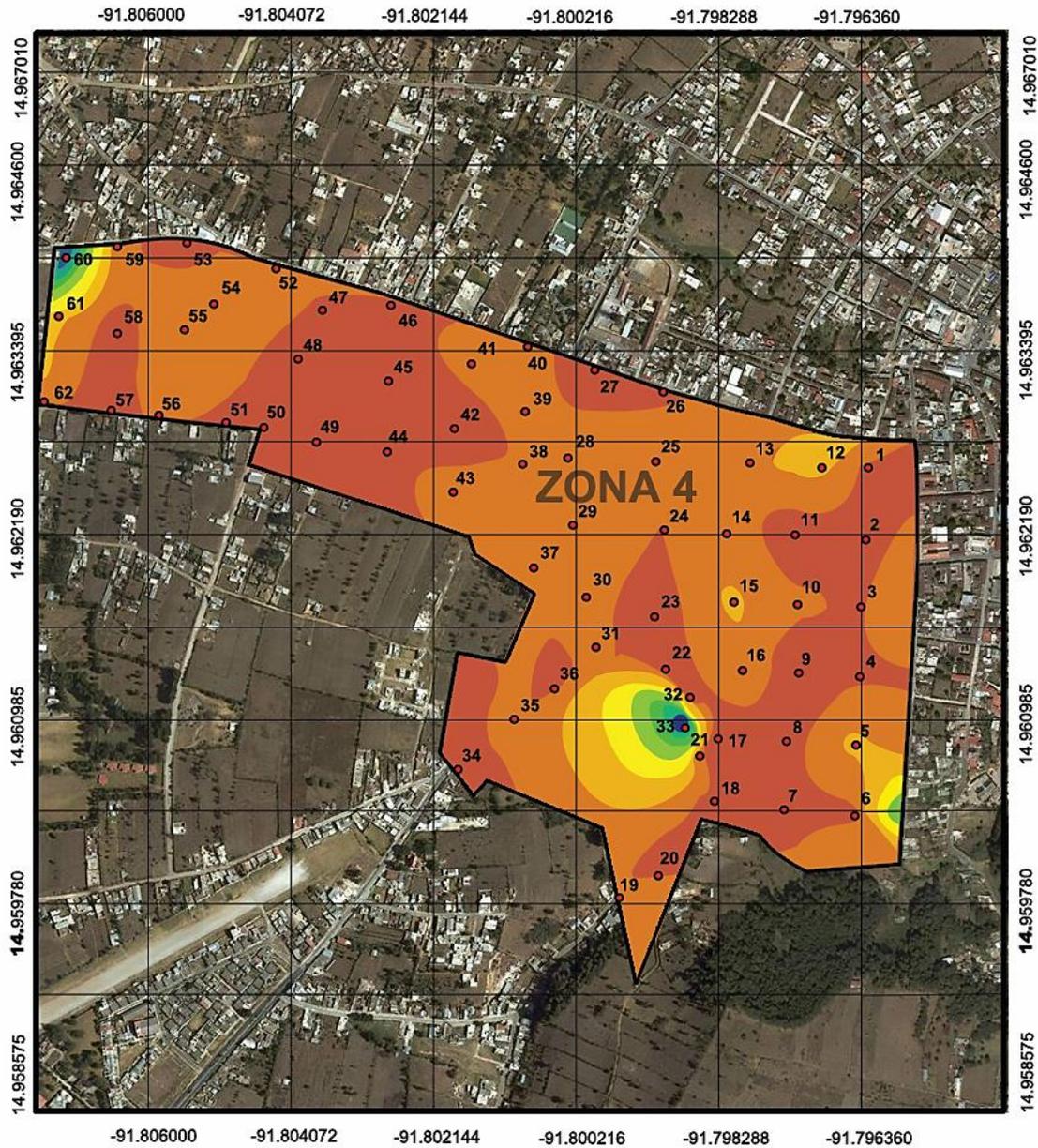
Fuente: Autor

Figura 34. Mapa de microzonificación sísmica, con valores de frecuencia de la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

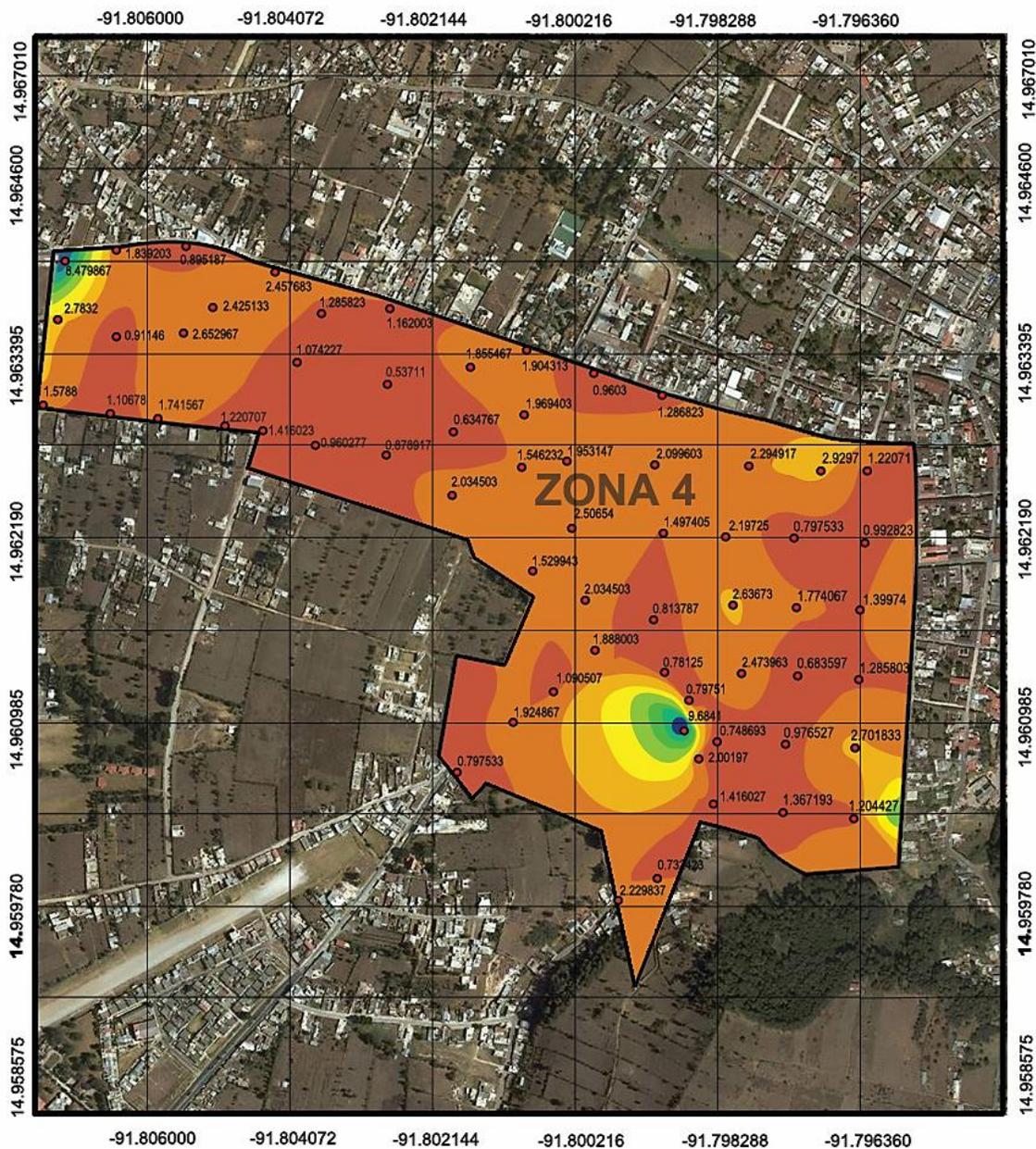
Figura 35. Mapa de microzonificación sísmica de la zona 4 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

En la figura 33 se puede observar el mapa de la zona 2, y en la figura 35 el mapa de la zona 4 de la cabecera departamental de San Marcos; cada una de las zonas con su respectiva microzonificación, en la que se puede observar tres microzonas, que tienen el mismo comportamiento por generar su amplitud en valores similares de frecuencia.

Figura 36. Mapa de microzonificación sísmica, con valores de frecuencia de la zona 4 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor

Se valora una microzona de frecuencias bajas, que oscila entre valores de 0.50 Hz. a 2.50 Hz. Una segunda microzona que oscila entre 2.50 Hz. a 4.50 Hz., y una tercer microzona con valores entre 4.50 Hz. A 10.00 Hz. Como se puede apreciar en la figuras 34 y 36, en la cual también se muestran los valores de frecuencia promedio por cada punto estudiado.

3.6 Información útil a Ingeniería Civil

3.6.1 *Familia de curvas HVSR*

Estas curvas son las gráficas que muestran en uno de sus ejes los resultados obtenidos a través del método de razón espectral (H/V). Las familias de curvas HVSR son las curvas de todos los puntos que se encuentran ubicados en cada microzona. Cada una de las familias de curvas se agrupa en base al mapa de microzonificación obtenido, luego se calculan los datos de la curva promedio de cada microzona, para su posterior análisis de velocidades.

3.6.2 *Familia de frecuencias bajas*

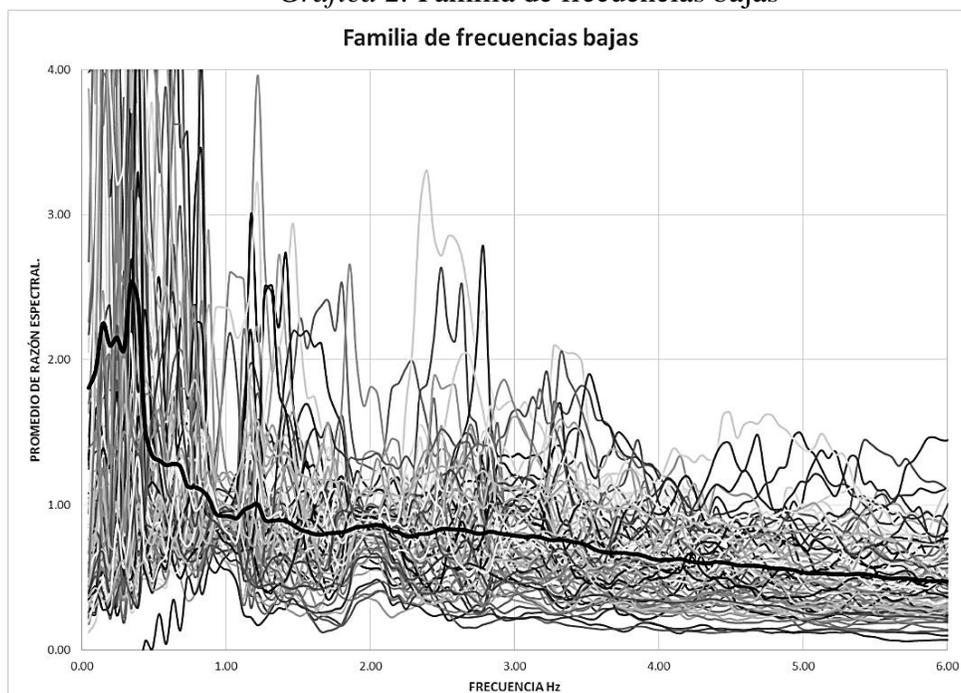
Esta familia de frecuencias se identifica con la ayuda del mapa de microzonas sísmicas. El grupo se encuentra entre los 0.50 Hz. a 2.50 Hz. Los puntos que aparecen son: **Zona 2:** Puntos 1, 2, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 41. **Zona 4:** Puntos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 62. En la Gráfica 2 se puede observar que la amplitud de la gráfica promedio de la familia de frecuencias bajas, se genera en la frecuencia 0.34Hz.

3.6.3 *Familia de frecuencias medias*

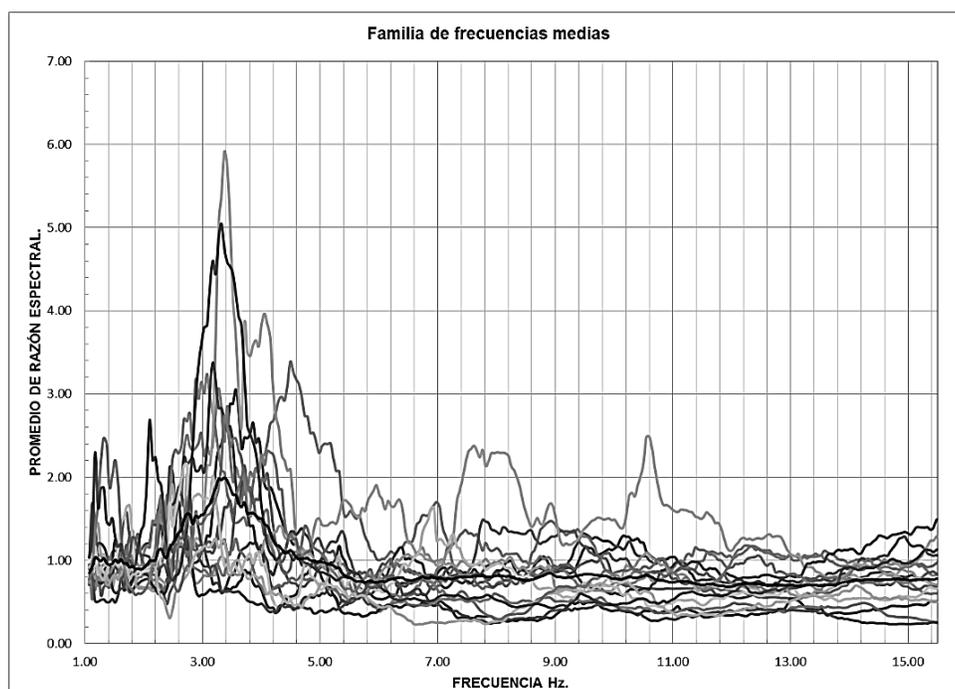
La familia de frecuencias medias se identifica en el mapa de microzonas sísmicas, el grupo de puntos se encuentra entre 2.50 Hz. a 4.50 Hz. Los puntos que aparecen son: **Zona 2:** Puntos 3, 4, 5, 10, 11, 13, 23, 24, 34, 37. **Zona 4:** Puntos 5, 12, 15, 29, 55, 61. En la gráfica 3 se puede observar que la amplitud de la gráfica promedio, de la familia de frecuencias medias, se genera en la frecuencia 3.37Hz.

3.6.4 *Familia de frecuencias altas*

Esta familia de frecuencias se identifica con la ayuda del mapa de microzonas sísmicas, el grupo se encuentra entre los 4.50 Hz. A 10.00 Hz. Los puntos que aparecen son: **Zona 2:** Puntos 6, 40. **Zona 4:** Puntos 32, 60. En la gráfica se observa que la amplitud de la gráfica promedio, se genera en la frecuencia 11.91 Hz.

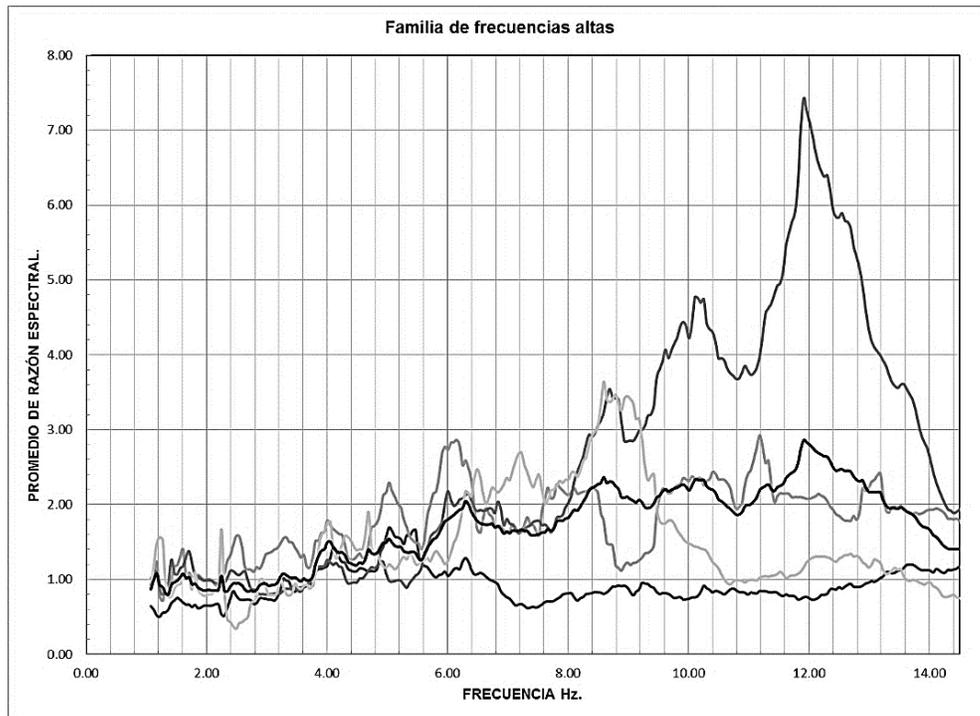
Gráfica 2. Familia de frecuencias bajas

Fuente: Autor

Gráfica 3. Familia de frecuencias medias

Fuente: Autor

Gráfica 4. Familia de frecuencias altas



Fuente: Autor

3.7 Modelos de velocidades invertidos

Con la ayuda del Software Dinver/GEOPSY se efectuaron propuestas de modelos de velocidad de onda de corte, esto con base a los datos de estratos obtenidos en el sector de cada zona y la curva promedio obtenida por cada familia, con el objetivo de obtener una curva de dispersión teórica que se aproxime a la curva empírica.

Teniendo en cuenta la clasificación de suelos de Simmons, Tarano y Pinto, quien en 1959 realizó un estudio de clasificación de reconocimiento de suelos de la República de Guatemala; se encontró que la cabecera departamental de San Marcos, en donde están ubicadas las zonas 2 y 4 se encuentran sobre la serie de suelos Quetzaltenango Qe.

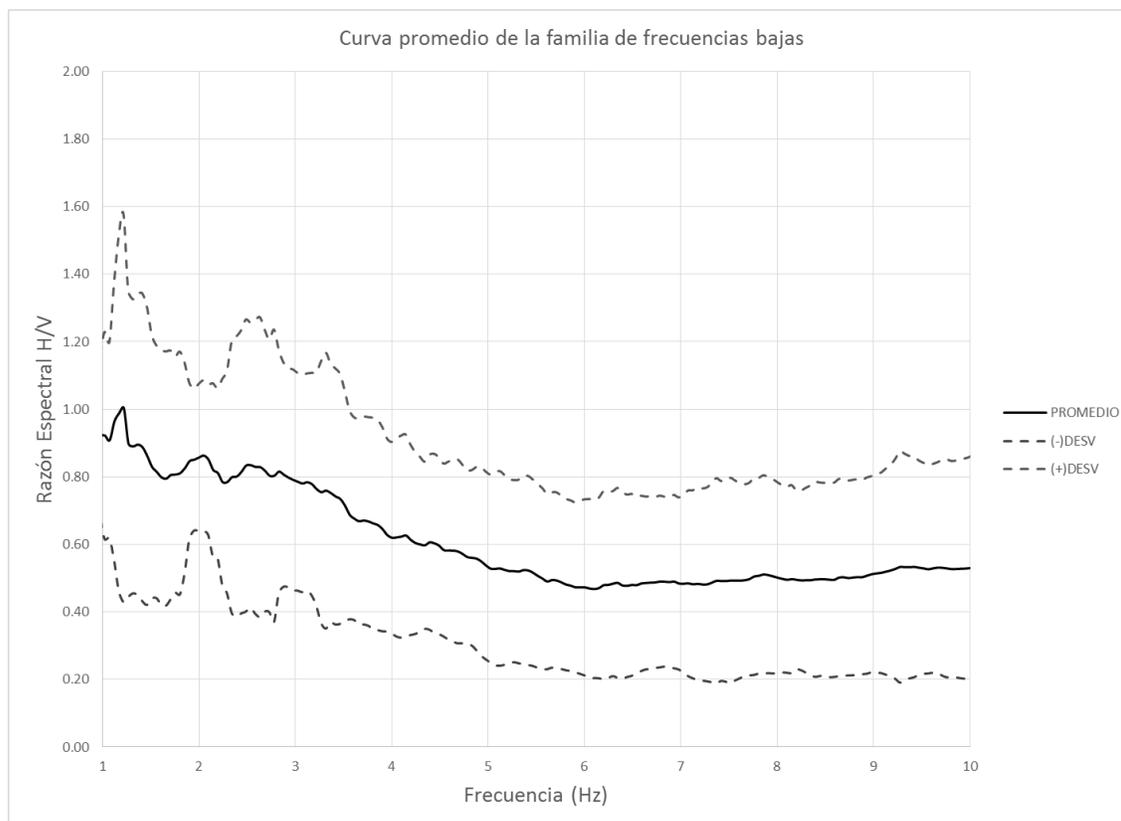
Para los modelos de velocidades que se utilizaron como base los datos estratigráficos fueron tomados de Juárez D. (2014) reconocimiento hidrogeológico de la zona urbana del municipio de Quetzaltenango, Quetzaltenango. Para el estudio se establecieron tres estratos finitos y el basamento a cada modelo de frecuencias.

3.7.1 Modelos de frecuencias bajas

En base a los datos de la curva promedio de la familia de esta microzona con frecuencias bajas, se calculó la desviación estándar de esta familia de curvas espectrales. Se elaboró una tabla con la serie de datos de frecuencia, promedio, promedio más desviación estándar y promedio menos desviación estándar, utilizando para cada familia supuestos dentro de los parámetros de densidades. En la siguiente gráfica se puede observar su comportamiento.

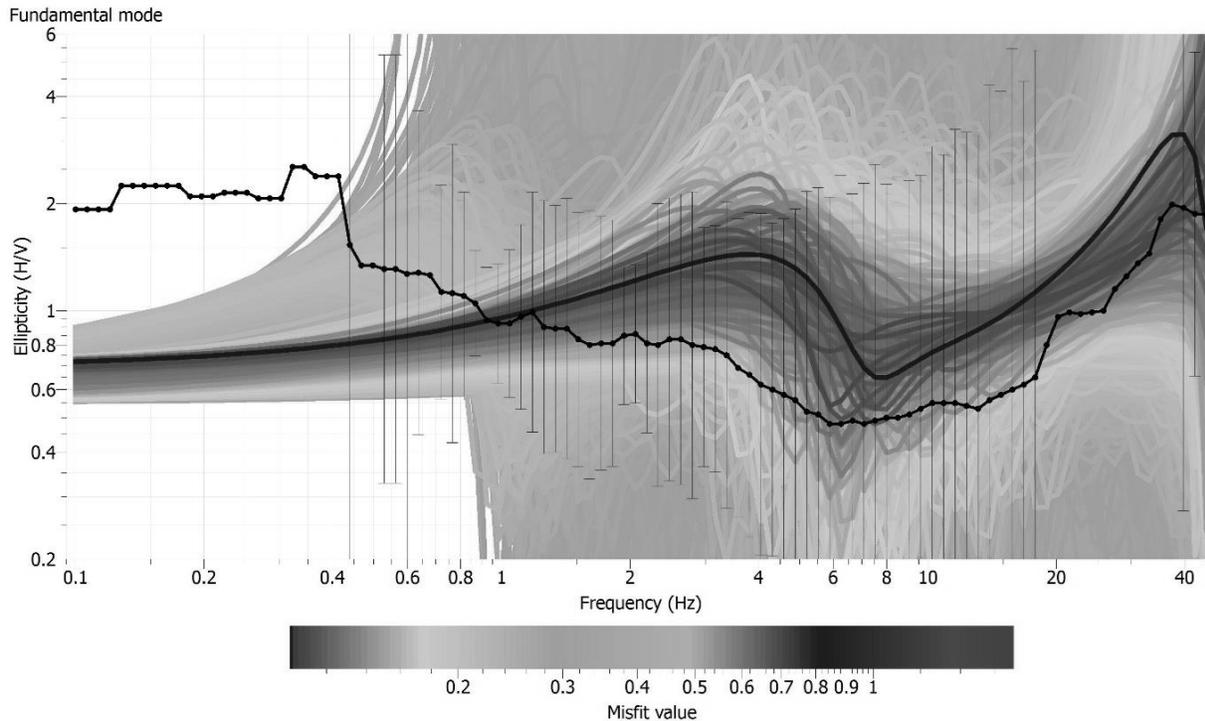
A continuación se importó la tabla obtenida al software Dinver. Para la obtención de la gráfica 6 se configuraron densidades desde los $\rho=1100 \text{ Kg/m}^3$ hasta los $\rho=1900 \text{ Kg/m}^3$; los tres estratos finitos, configurados de 0 a 10 m, 0 a 30 m y 0 a 50 m respectivamente, para poder hacer una referencia más precisa del lugar y que la curva teórica se acerque a la curva empírica.

Gráfica 5. Curva promedio de familia de curvas con frecuencias bajas



Fuente: Autor

Gráfica 6. Curva de comparación de FTT y FTE de la familia de curvas con frecuencias bajas



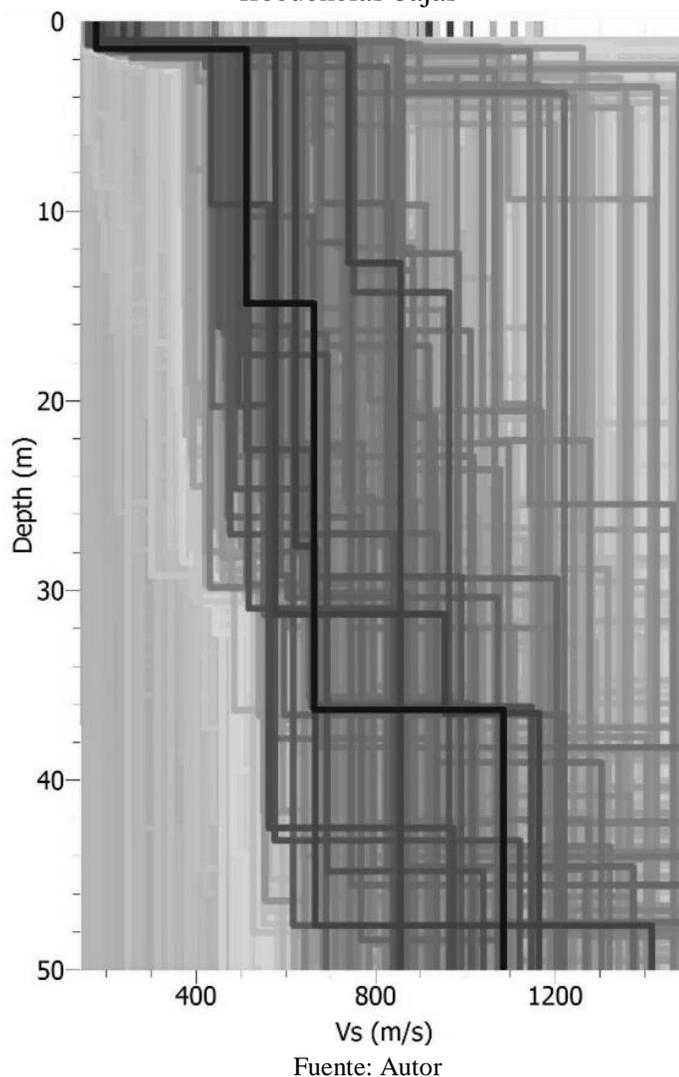
Fuente: Autor

Se puede apreciar en la gráfica 6 como la curva empírica que se muestra en color negro y la curva teórica que en este caso tiene una tonalidad gris oscura, se asemeja y acerca a la curva empírica; esta ayuda a generar la gráfica 7, que muestra las velocidades invertidas.

En la gráfica 7 se puede apreciar que existen cambios de velocidad a distintas profundidades. Primero se da a 1.50 m de profundidad, el cambio que ocurre de 171 m/s a 514m/s, luego se realizó un cambio más de velocidad, esto aproximadamente a 14.60 m de profundidad, el cambio ocurre de 514 m/s hasta los 664 m/s.

El último cambio de velocidad generado aproximadamente a los 36.2 m de profundidad, que alcanza valores cercanos a 1085 m/s, esto representa tener materiales consolidados a partir de aproximadamente los 36.2 m de profundidad.

Gráfica 7. Modelos de velocidad de onda de corte propuestos para microzonas con frecuencias bajas

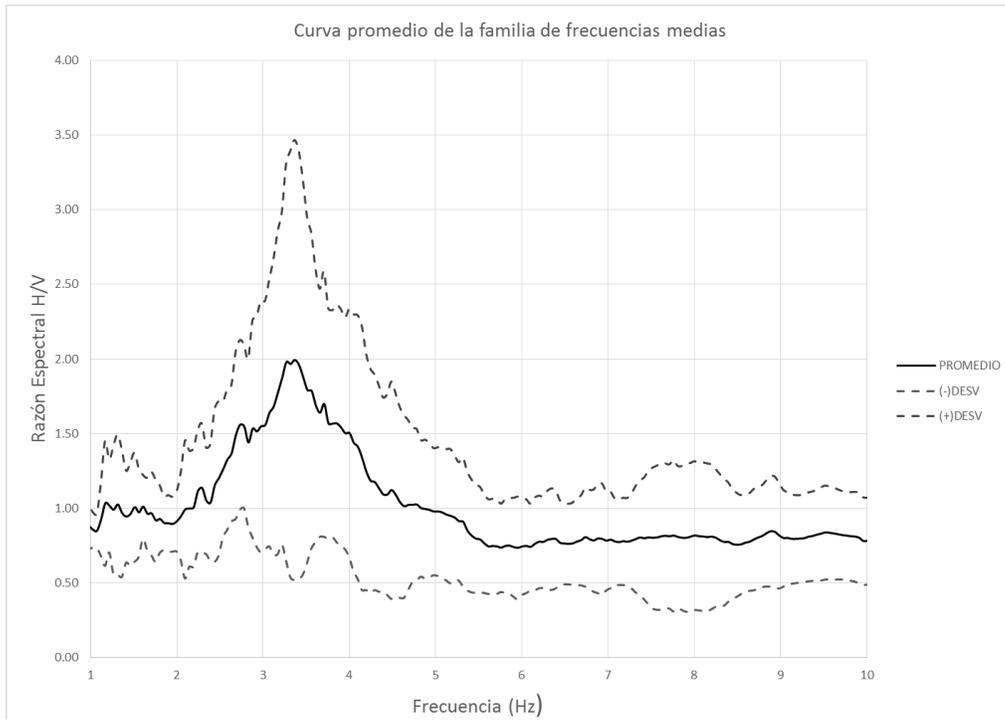


3.7.2 *Modelo de frecuencias medias*

Siguiendo el mismo procedimiento que con las frecuencias bajas, se genera la gráfica 8, en la que se puede apreciar el comportamiento de la curva promedio de las frecuencias medias.

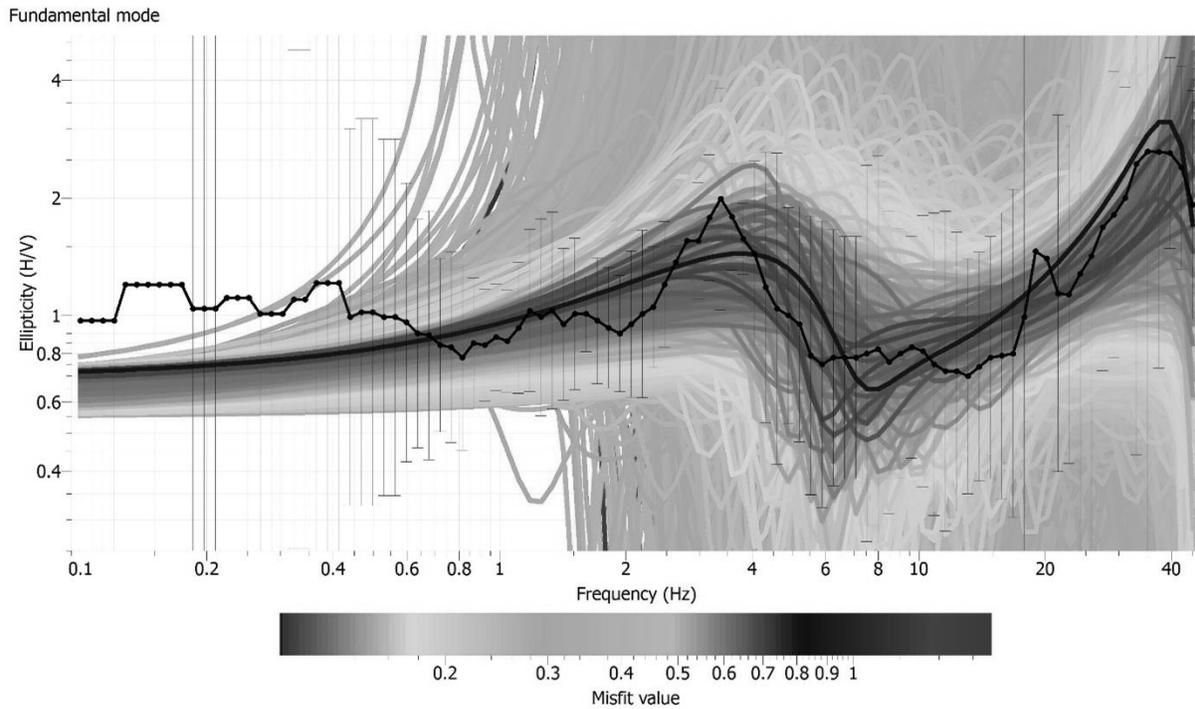
Con la ayuda del software Dinver se obtiene la gráfica 9, se configuraron densidades que van desde los $\rho=1100 \text{ Kg/m}^3$ hasta los $\rho=1900 \text{ Kg/m}^3$, los tres estratos finitos, configurados de 0 a 10 m, 0 a 30 m y 0 a 50 m respectivamente, para poder hacer una referencia más precisa del lugar y que la curva teórica se acerque a la curva empírica.

Gráfica 8. Curva promedio de familia de curvas con frecuencias medias



Fuente: Autor

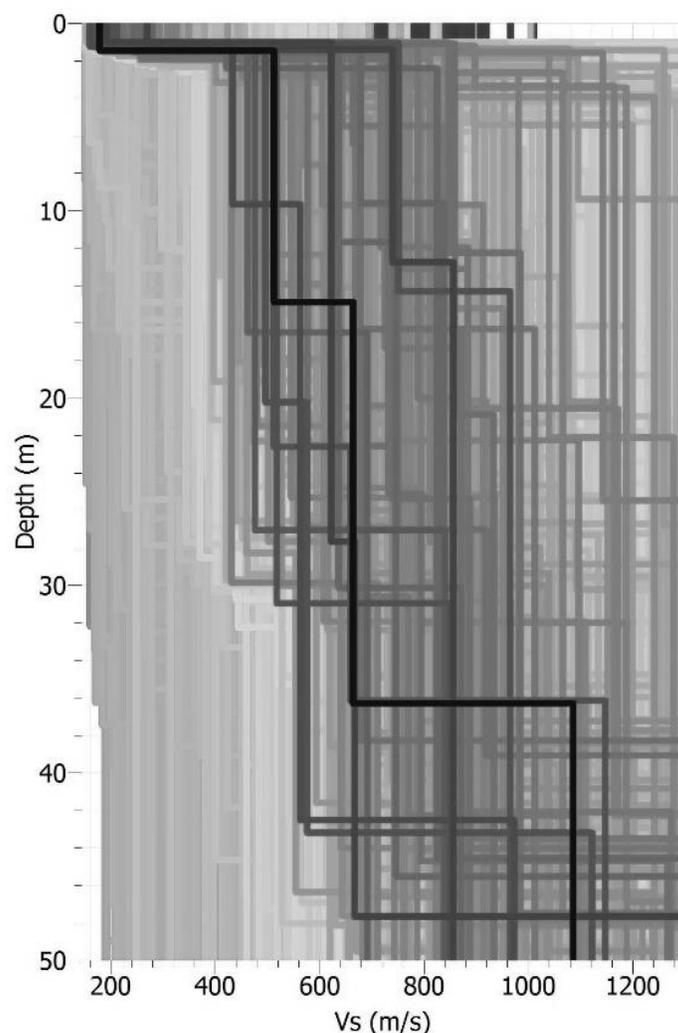
Gráfica 9. Curva de comparación de FTT y FTE de la familia de curvas con frecuencias medias



Fuente: Autor

Se puede observar en la gráfica 9, como la curva empírica tiene semejanza con la curva teórica, esto ayuda a generar la gráfica 10, que muestra las velocidades invertidas.

Gráfica 10. Modelos de velocidad de onda de corte propuestos para microzonas con frecuencias medias



Fuente: Autor

En la gráfica 10 se puede apreciar que hay cambios de velocidad a diferentes profundidades. Siendo la primera profundidad de 1.25 m con un cambio de velocidad que ocurre de 180 m/s a 520 m/s. El siguiente cambio de velocidad se da aproximadamente a una profundidad de 14.80 m este cambio ocurre desde los 520 m/s hasta los 670 m/s, el último cambio que se genera aproximadamente a 36 m que alcanza valores cercanos a los 1090 m/s, lo cual representa tener materiales consolidados a partir de los 36 m de profundidad.

3.7.3 *Modelo de frecuencias altas*

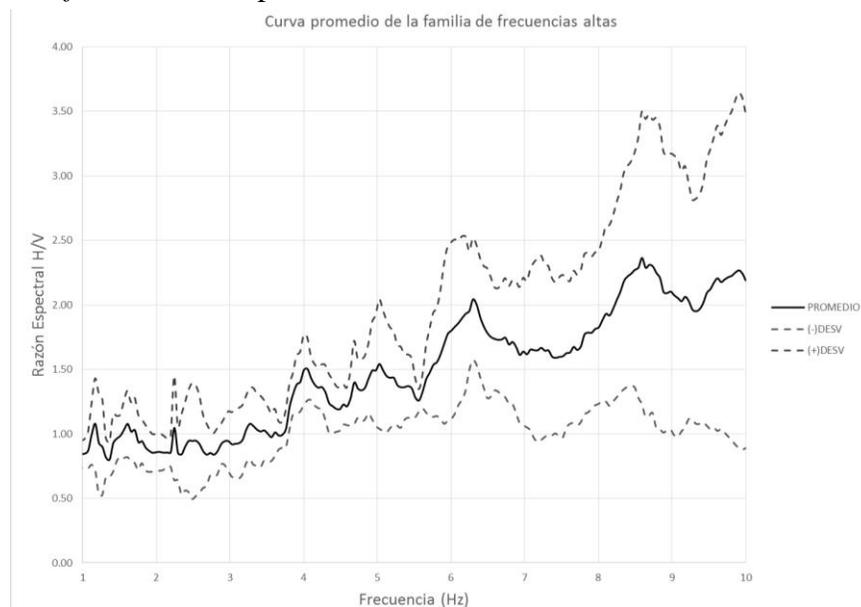
Como se puede apreciar en la gráfica 11, el comportamiento de la curva promedio de la familia de curvas con frecuencias altas y en la gráfica 12 el comportamiento de la curva teórica.

Con el apoyo de la tabla generada con el software Dinver ayuda a la obtención de la gráfica 12, en este caso se configuraron densidades desde los $\rho=1100 \text{ Kg/m}^3$ hasta los $\rho=1900 \text{ Kg/m}^3$, los tres estratos finitos, configurados de 0 a 10 m, 0 a 30 m y 0 a 50 m respectivamente, para poder hacer una referencia más precisa del lugar y que la curva teórica se acerque a la curva empírica

De la misma manera se puede observar que la curva teórica busca proximidad a la curva empírica, ayudando a generar la gráfica 13, que muestra las velocidades invertidas.

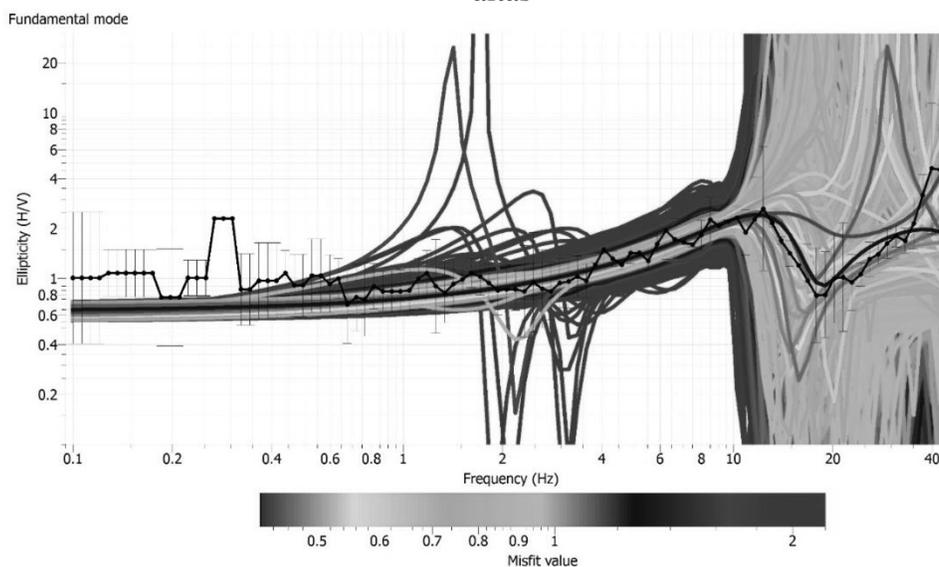
En la gráfica 14 se puede apreciar que hay cambios de velocidad a diferentes profundidades. La primera profundidad es aproximadamente de 4.80 m con un cambio de velocidad que ocurre de 493 m/s a 900 m/s; el otro cambio de velocidad se da aproximadamente a una profundidad de 20.55 m, este cambio de velocidad se da desde los 900 m/s hasta los 1466 m/s; el último cambio que se genera aproximadamente a 36.10 m alcanza valores cercanos a los 1946 m/s, lo cual representa tener materiales consolidados a partir de los 36.10 m de profundidad.

Gráfica 11. Curva promedio de familia de curvas con frecuencias



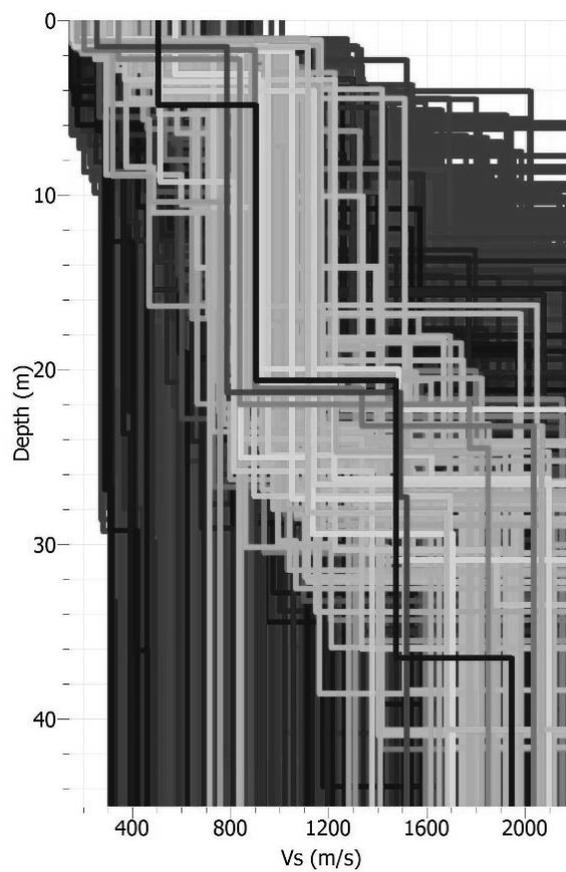
Fuente: Autor

Gráfica 12. Curva de comparación de FTT y FTE de la familia de curvas con frecuencias altas



Fuente: Autor

Gráfica 13. Modelos de velocidad de onda de corte propuestos para microzonas con frecuencias altas



Fuente: Autor

3.8 Clasificación de sitio en base a las Normas de Seguridad Estructural

De acuerdo a las Normas de Seguridad Estructural (NSE) de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, en su publicación NSE 2-10 demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección, se puede realizar una clasificación de sitio en base a velocidades de onda de corte a profundidad de 30m debajo de los cimientos, determinando las siguientes categorías: AB, C, D, E o F. En la tabla 8, se encontraron los parámetros que la AGIES ha determinado. La asociación considera no tener distinción en los suelos clase A y B para la República de Guatemala.

Tabla 9. Guía de clasificación de sitio según NSE 2-10

Clase de Sitio	Vps todo el perfil	Np todo el perfil	Nnc sector no-cohesivo	Suc sector cohesivo	
AB	Roca	750 m/s	No aplica	No aplica	
C	Suelo muy denso o roca suave	750 a 360 m/s	≥ 30	≥ 30	
D	Suelo firme y rígido	360 a 180 m/s	30 a 5	30 a 5	
E	Suelo suave	< 180 m/s	≤ 5	≤ 5	
		Cualquier perfil de suelo con un es trato de 3.0 m o más con índice de plasticidad $IP > 20$; humedad $w \geq 40\%$ y $Suc < 25$ kPa			
F	Suelo con problemas especiales	Véase NSE 2.1 Capítulo 5			

Fuente: AGIES, NSE 2-10 “Demandas Estructurales, Condiciones de Sitio y Niveles de Protección”, Capítulo 4, pág. 21.

Tabla 10. Clasificación de sitio en base a microzonificación y NSE

Microzona	Clasificación	Tipo de suelo	V_{S30} (m/s)
Frecuencias bajas	C	Suelos muy densos y roca suave	664
Frecuencias medias	C	Suelos muy densos y roca suave	670
Frecuencias altas	AB	Roca	1466

Fuente: Autor

Se propuso la clasificación de sitio en la tabla 9, en base a promedios de velocidades de onda de corte que se generan de 0 a 30m para cada una de las microzonas sísmicas obtenidas en este estudio.

- **Perfil de suelo de sitios clase AB**

Roca o depósitos densos profundos caracterizados por valores promedio de velocidad de onda de corte $V_{ps} > 750$ m/s (AGIES NSE 2-10)

Tomando como referencia de clasificación de unidades geotécnicas, la ciudad de Quetzaltenango, se puede decir que la descripción de tipo de suelo A es volcánico terciario, las cuales son rocas volcánicas no diferenciadas, incluyendo andesitas, basaltos y riolitas; de consolidación generalmente sana. La descripción de tipo de suelo B es volcánico cuaternario, rocas que presentan una consolidación mediana y sana, están compuestos de coladas y domos de lava.

- **Perfil de suelo de sitios clase C**

Cuando un sitio no califica como clase AB, ni como clase F se decidirá si es C, utilizando los criterios y mediciones resumidos en la tabla 9.

Teniendo la referencia de clasificación de unidades geotécnicas de la ciudad de Quetzaltenango, se dice que la descripción del tipo de suelo C es depósitos de pómez cuaternarios, depósitos de pómez masivos provenientes de avalanchas de ceniza, generalmente rellenado de depresiones pre-existentes.

3.9 Propuesta de espectro de respuesta

Con el software DEPSOIL se efectuó el análisis configurando los estratos, con sus concernientes velocidades y características de suelo, esto tomando como base los registros de eventos sísmicos. Sabiendo que de preferencia se deben utilizar eventos que se hayan registrado en la zona de estudio o cercanos a ellos, no se cuenta con registros de eventos sísmicos en San Marcos, por esta razón los datos registrados que se utilizaron son los que aparecen en la base de datos de DEEPSOIL, de estos se escogieron los que correspondan a suelos de clase A, según el servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS, teniendo en cuenta que en este tipo de suelos, no se realizan mayores modificaciones en la señal de aceleración del sismo.

Tabla 11. Datos característicos de eventos utilizados para obtener gráficas espectrales

Motion Name	Record Number	Date of Event	Magnitudo	Distance to Fault Rupture (km)	USGS Site Class	PGA (g)
MammothLake	P0232	25/05/1980	6.3	15.5*	A**	0.43
Nahanni	P0498	23/12/1985	6.8	16.0	A**	0.148
Northridge	P0885	17/01/1994	6.7	26.8	A	0.217
Northridge2	P1014	17/10/2017	6.7	43.4	A	0.098
WhittierNarrows	P0666	01/10/1987	6.0	21.2	A	0.186

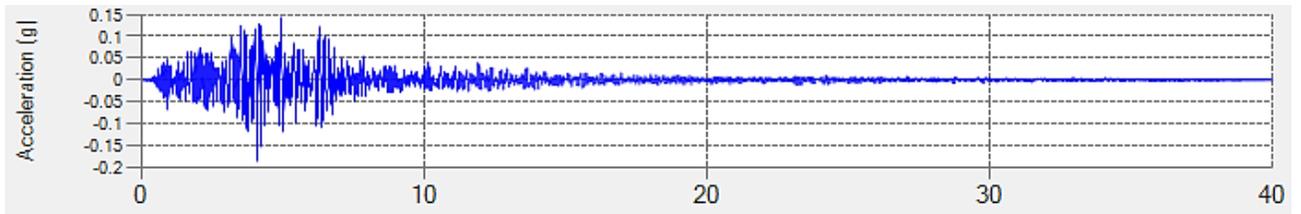
*Hypocentral distance

**Geomatrix Site Class

Fuente. Manual de DEEPSOIL

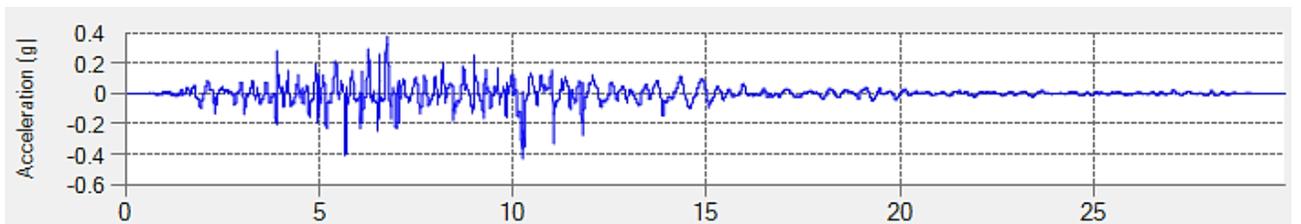
Los siguientes acelerogramas de eventos sísmicos son tomados como referencia en el programa para poder calcular los espectros de respuesta para cada microzona sísmica.

Gráfica 14. Acelerograma del evento WhittierNarrows



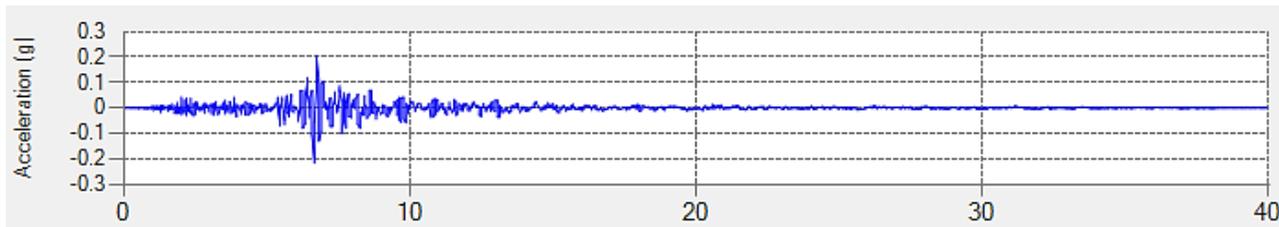
Fuente. DEEPSOIL

Gráfica 15. Acelerograma del evento Mammothlake



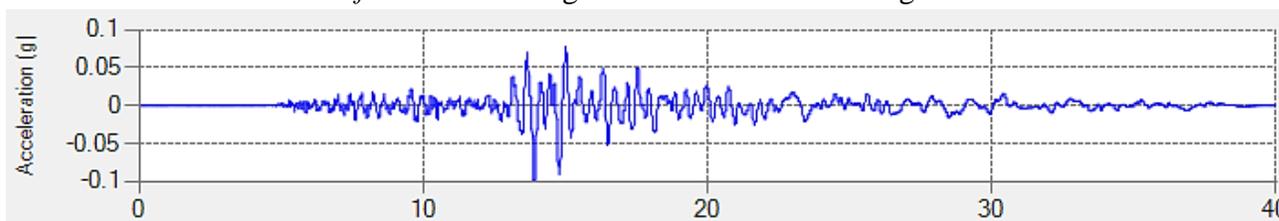
Fuente. DEEPSOIL

Gráfica 16. Acelerograma del evento Northridge



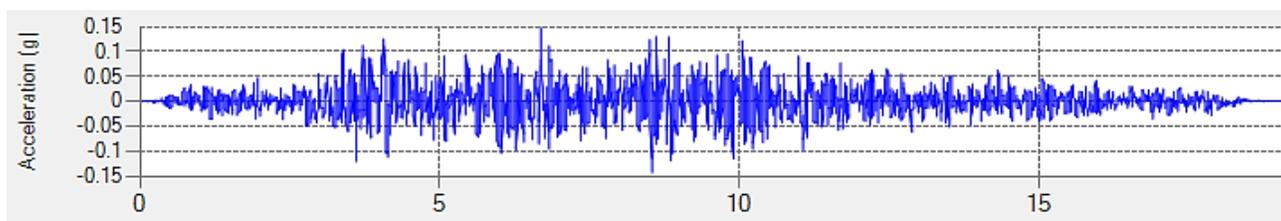
Fuente. DEEPSOIL

Gráfica 17. Acelerograma del evento Northridge 2



Fuente. DEEPSOIL

Gráfica 18. Acelerograma del evento Nahnni



Fuente. DEEPSOIL

3.10 Propuestas de espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones en superficie

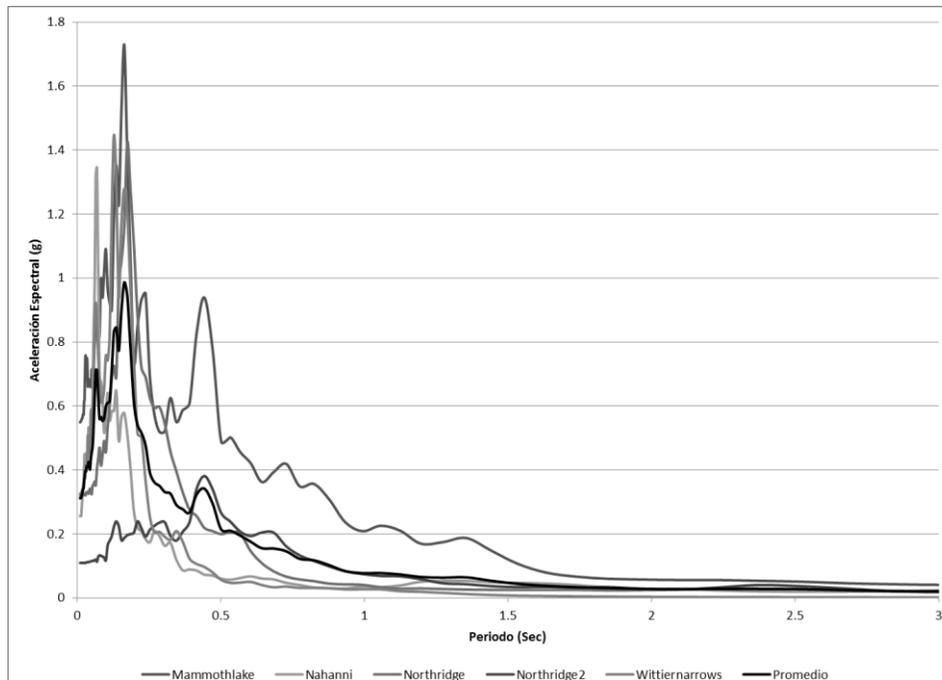
Cada uno de los datos obtenidos del análisis, generan las gráficas de espectros de superficie de pseudo-aceleración planteados para cada microzona, en los cuales se pueden ver los espectros de superficie de cada evento sísmico y el promedio de todos, para tener una propuesta aproximada de la aceleración máxima que puede generarse en cada microzona. Los cálculos se ejecutaron para un amortiguamiento del 5%, como lo que estipula la AGIES en la norma NSE 2.1-10 estudios geotécnicos y de microzonificación.

Se puede observar en la gráfica 20, que es el promedio de espectros de la microzona de frecuencias altas. Se estima que se puede generar una aceleración máxima de 0.98g a los 0.16s.

En el promedio de espectros de la microzona de frecuencias medias, de acuerdo a lo que se propone en la gráfica 22, observando que la aceleración máxima es de 0.86g, pero esta se genera aproximadamente a los 0.44s.

En la gráfica 24, se puede observar que la aceleración máxima se genera alrededor de los 0.44s y alcanza una aceleración máxima de 0.78g, esto para las frecuencias bajas. En la comparativa de espectros de las tres microzonas, presentada en la gráfica 25, se ven aceleraciones similares en las microzonas de frecuencias bajas y altas, aunque las frecuencias medias generan la aceleración máxima entre las tres microzonas.

Gráfica 19. Espectros de superficie para microzona de frecuencias altas

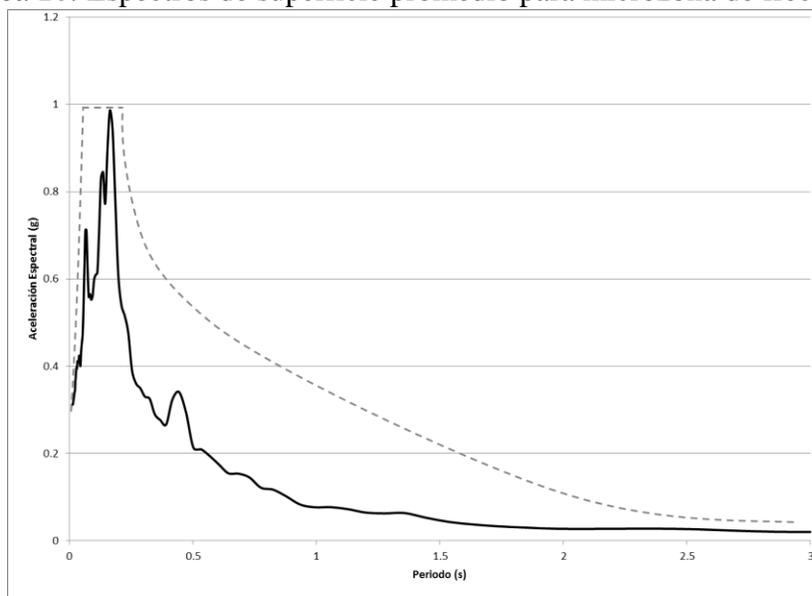


Fuente. Autor

Tomando en consideración que los espectros de respuesta de aceleración fueron generados a base de señales sísmicas de otros sitios, ya que no se cuenta con señales sísmicas en el lugar de estudio, estas se pueden modificar por las condiciones geológicas, la magnitud del sismo, el mecanismo de la falla y las condiciones locales del suelo, por lo que se propone analizarlos con sismos ocurridos en suelos tipo A, ya que este tipo de suelos no realiza mayores modificaciones a la señal sísmica. En las gráficas presentadas se puede ver la variación que existe entre cada tipo de señal sísmica, aunque se aprecia un comportamiento similar entre cada una de ellas. No es adecuado realizar diseños sísmicos de estructuras en base a este tipo de espectros de respuesta,

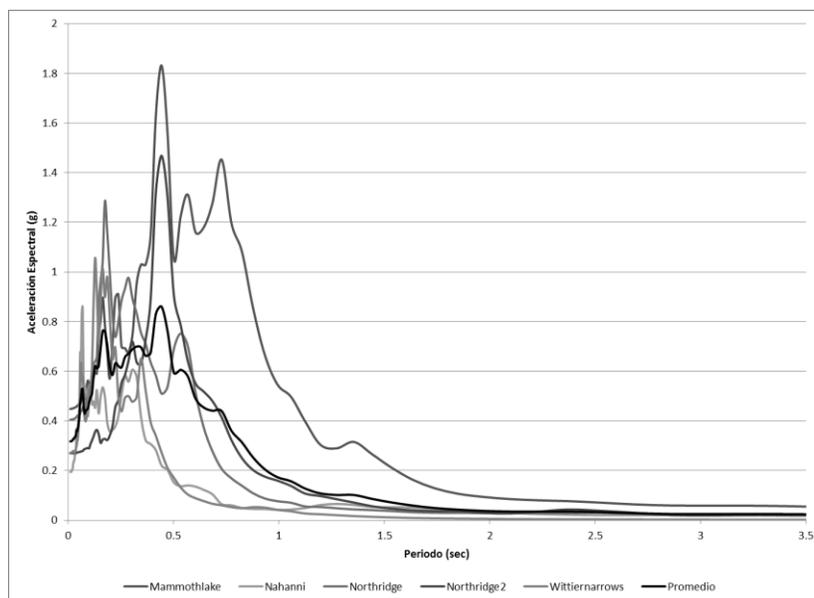
puesto que la señal dentada del espectro de respuesta es solamente por un tipo de excitación, esta varía de un sismo a otro, sin embargo se pueden suavizar y crear el espectro de respuesta dinámica, pero no puede definir exactamente la forma de ocurrencia del sismo, ya que se trata de un análisis estadístico y las señales sísmicas varían en un sinnúmero de formas.

Gráfica 20. Espectros de superficie promedio para microzona de frecuencias altas



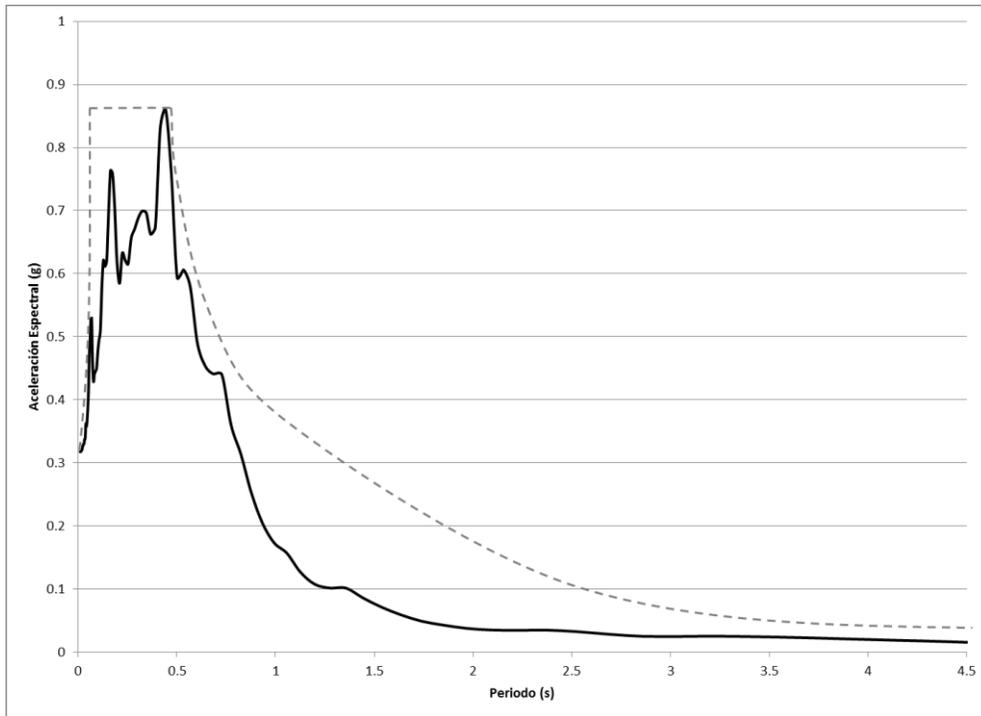
Fuente. Autor

Gráfica 21. Espectros de superficie para microzona de frecuencias medias



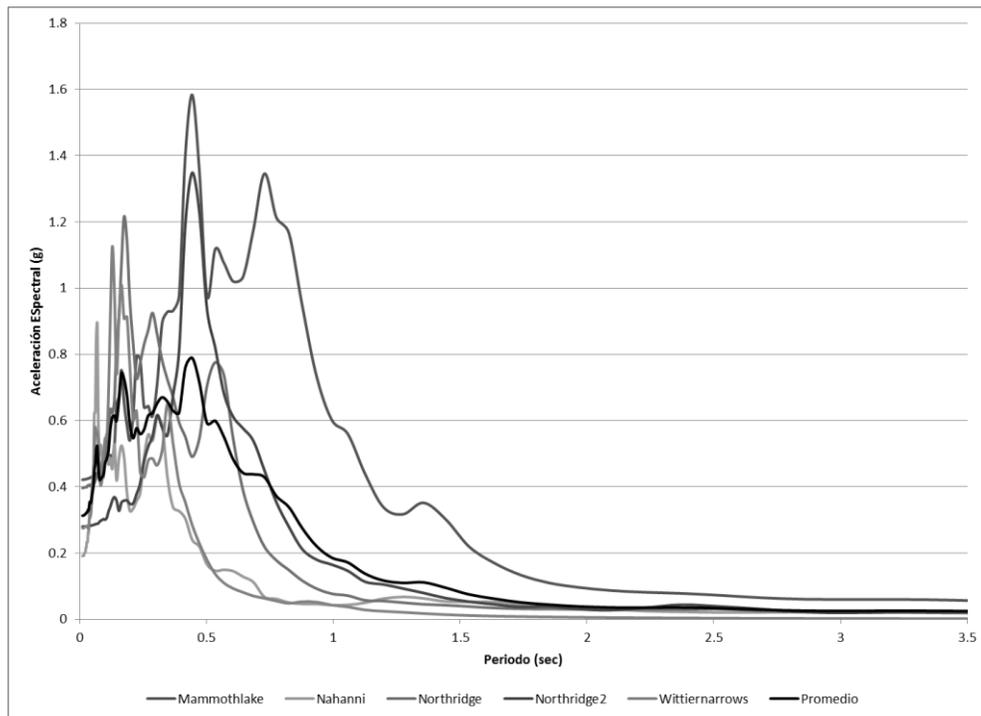
Fuente. Autor

Gráfica 22. Espectros de superficie promedio para microzona de frecuencias medias



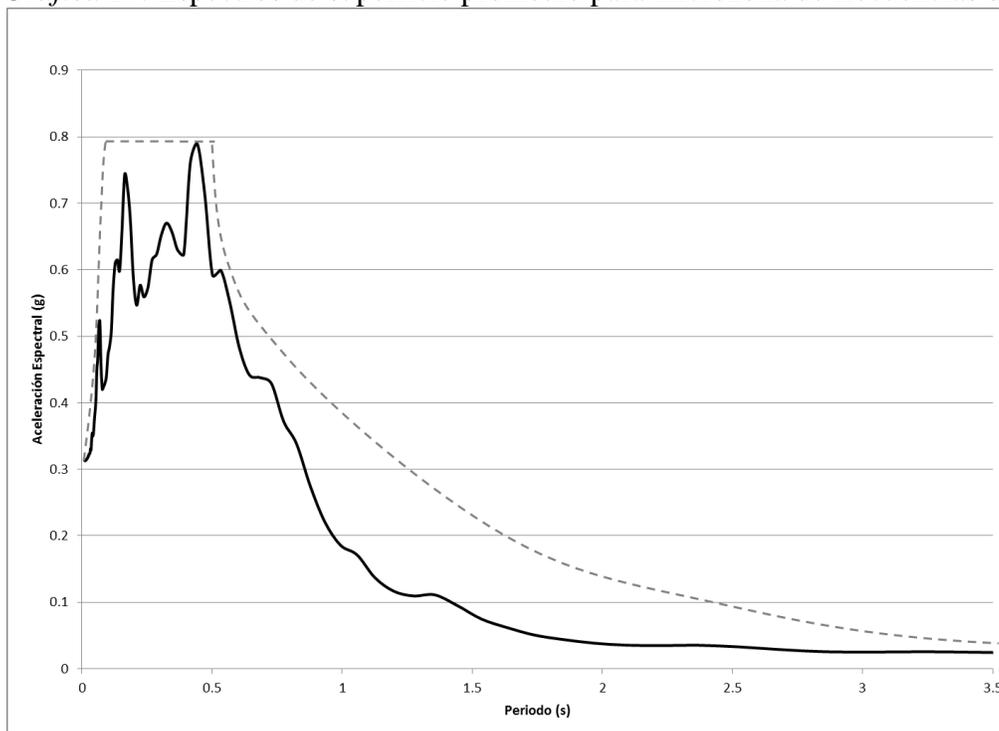
Fuente. Autor

Gráfica 23. Espectros de superficie para microzona de frecuencias bajas



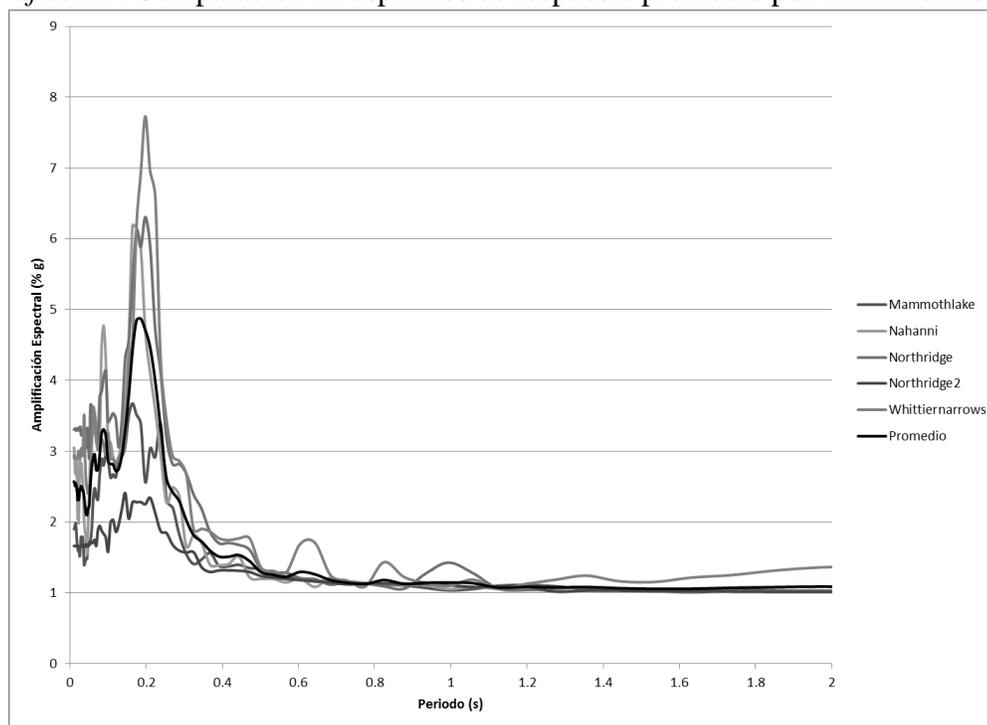
Fuente. Autor

Gráfica 24. Espectros de superficie promedio para microzona de frecuencias bajas



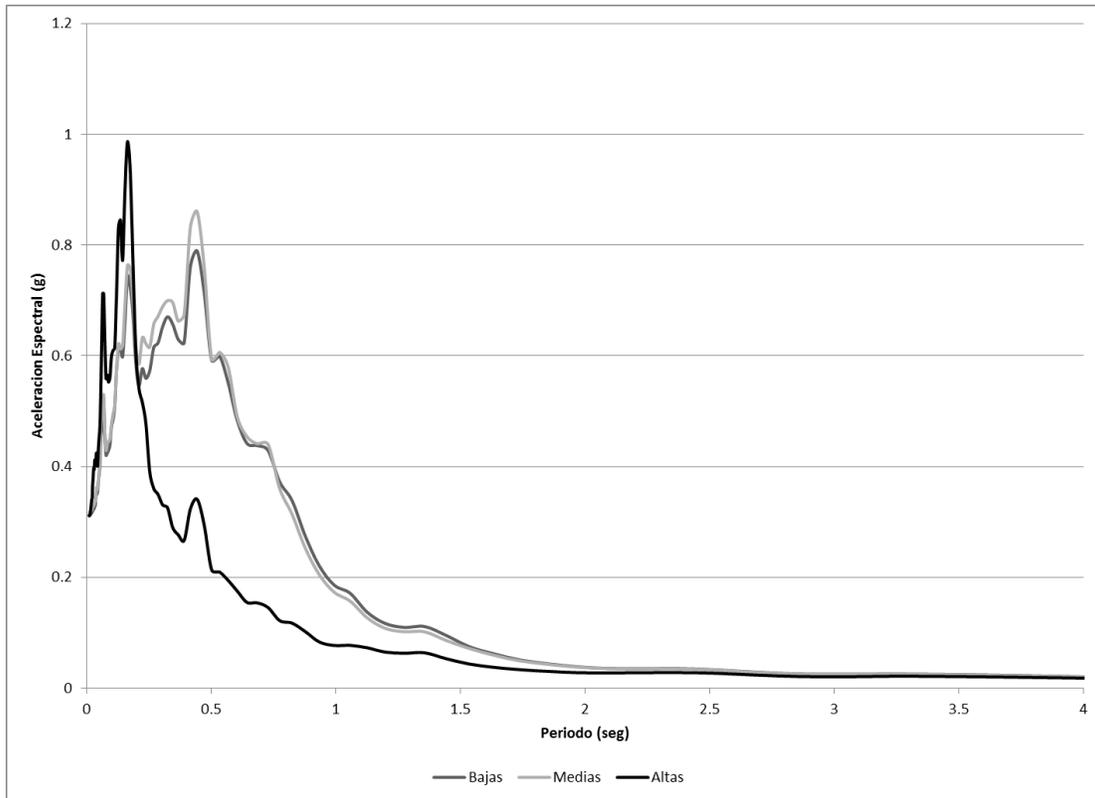
Fuente. Autor

Gráfica 25. Comparación de espectros de respuesta promedio por microzona sísmica



Fuente. Autor

Gráfica 26. Amplificación espectral para eventos analizados en frecuencias altas



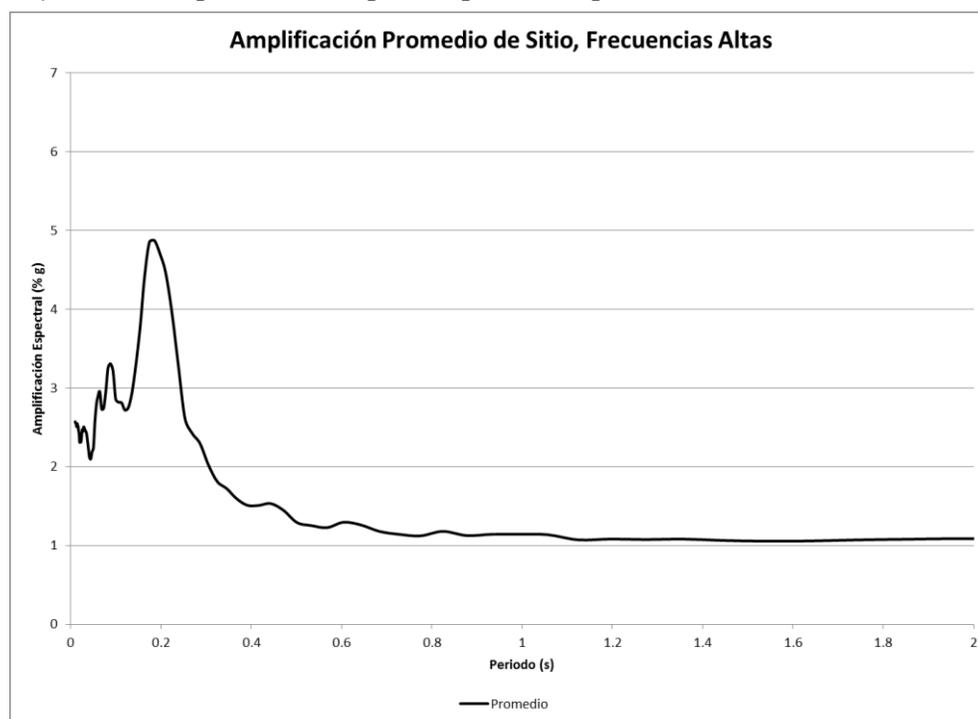
Fuente. Autor

3.11 Propuestas de espectro de amplificación de sitio

La amplificación espectral de sitio, resulta del cociente espectral entre el espectro de respuesta del suelo en superficie y el espectro de respuesta en la roca, esto da el factor de amplificación aproximados que puede tener el suelo. Siempre se considera que estos datos son obtenidos en base a eventos que ocurrieron en otro sitio, por lo que sería prudente poder analizarlo con señales de eventos ocurridos en el sitio de estudio para generar resultados más aproximados.

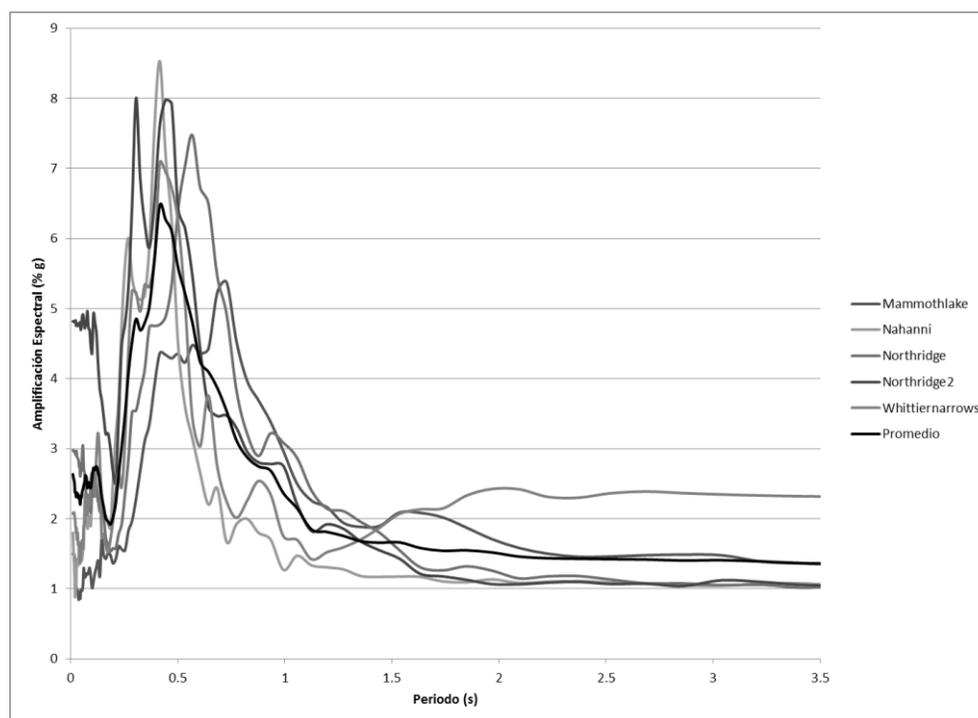
En cuanto al análisis hecho en DEEPSOIL se considera una roca elástica y de igual manera se realizan los espectros de respuesta con un 5% de amortiguamiento, luego se calcula el cociente espectral y da como resultado las gráficas de amplificación. A continuación se presentan las gráficas de amplificación de sitio, para cada una de las microzonas propuestas.

Gráfica 27. Amplificación espectral promedio para microzona de frecuencias altas



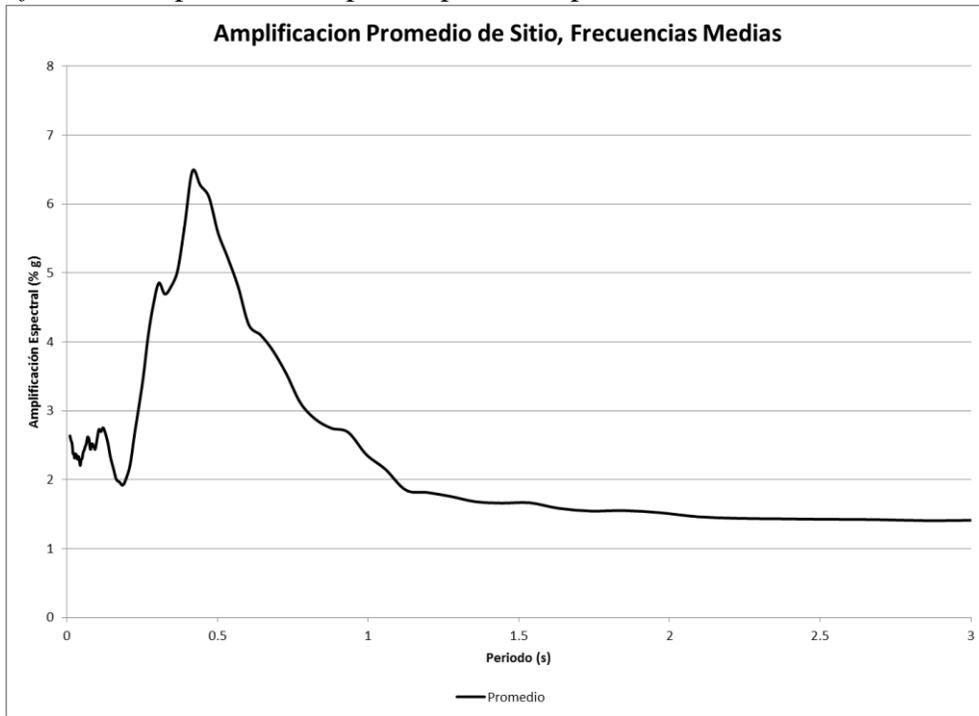
Fuente. Autor

Gráfica 28. Amplificación espectral para eventos analizados en frecuencias medias



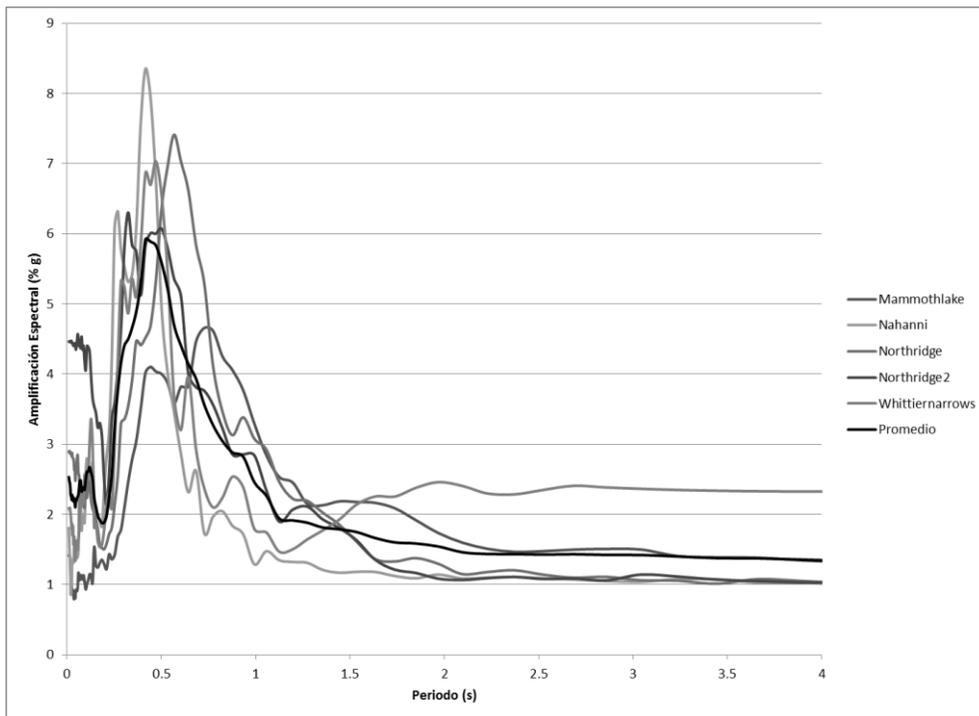
Fuente. Autor

Gráfica 29. Amplificación espectral promedio para microzona de frecuencias medias



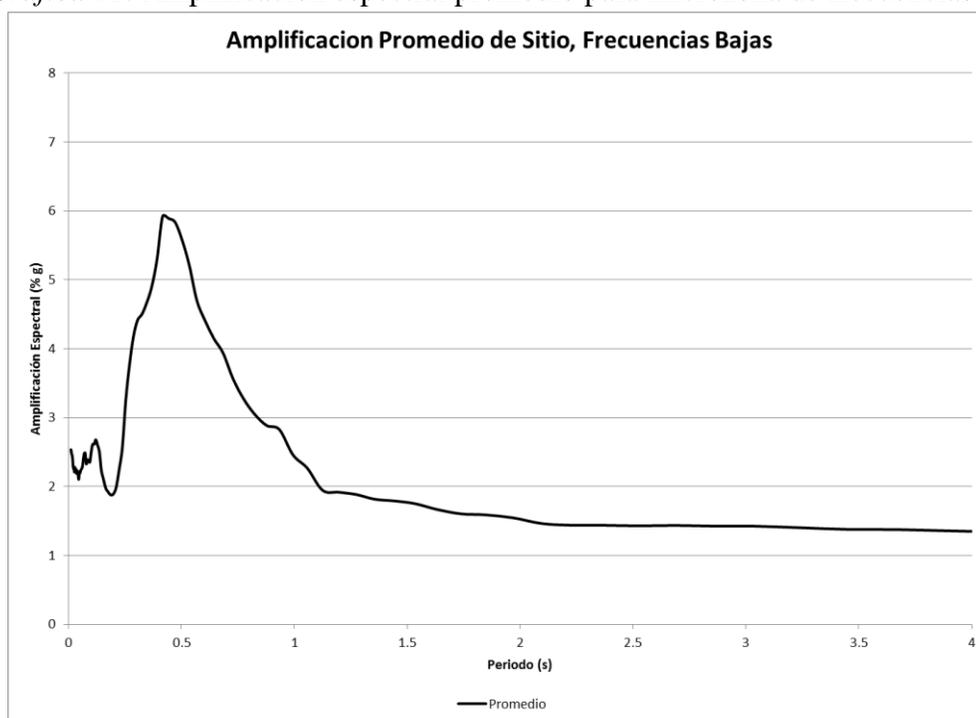
Fuente. Autor

Gráfica 30. Amplificación espectral para eventos analizados en frecuencias bajas



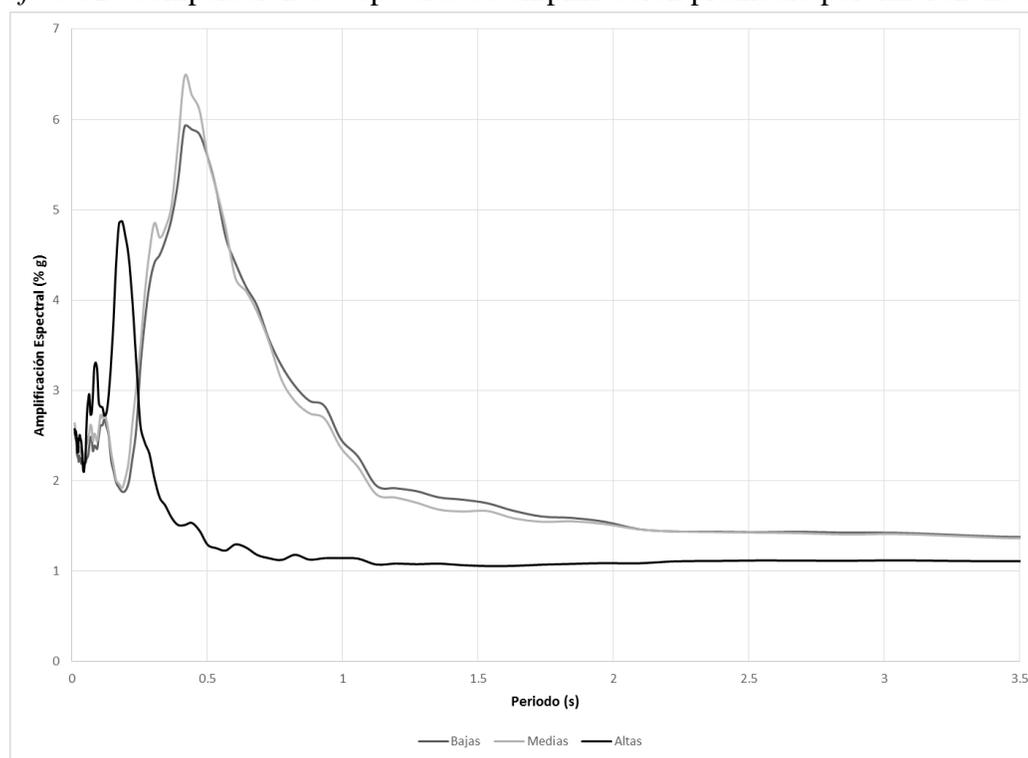
Fuente. Autor

Gráfica 31. Amplificación espectral promedio para microzona de frecuencias bajas



Fuente. Autor

Gráfica 32. Comparación de espectros de amplificación promedio por microzona sísmica



Fuente: Autor

- Se observar en las gráficas 26, 28 y 30 cada una de las amplificaciones que generaría el suelo ante cada una de las señales de los eventos utilizados en el análisis y en las gráficas 27, 29 y 31, los promedios de amplificación para cada microzona.
- En este ejemplo de gráficas se puede prestar atención de mejor manera, a cómo se modifica el espectro para cada uno de los eventos que se analiza, por ello es la importancia de realizar este tipo de análisis con señales de sismos ocurridos en el lugar.
- En la gráfica 27, se genera la amplificación más baja magnitud alrededor de los 0.18s y una amplificación de 4.87 g. En comparación con las gráficas generadas de las otras microzonas sísmicas.
- Se puede observar en la gráfica 29, con una amplificación alta en 0.41s con una amplificación de 6.47 g, teniendo desde 0.18s un incremento y a término de 1.05s la pendiente.
- Como se observa en la gráfica 31, que se genera la amplificación de mayor magnitud en 0.44s con amplificación de 5.92 g.
- En la gráfica 32 se puede observar similar amplificación en las microzonas bajas y medias, lo que concuerda con la clasificación de sitio que se realizó.

También se observa que la microzona de frecuencias altas genera menor amplificación en comparación con las otras microzonas, esto puede ser debido a la profundidad del basamento y el tipo de suelo del lugar.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

4.1 Mecánica de suelos

4.1.1 *Definición*

Uno de los fundadores y guías de esta área de la ingeniería, es el Dr. Ing. Karl Terzaghi, quien definió que la Mecánica de Suelos es la aplicación de las leyes de la mecánica y la Hidráulica a los problemas de ingeniería, que trata con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas producidas por la desintegración mecánica o descomposición química de las rocas. De forma general, mecánica de suelos es la acción y efectos de las fuerzas sobre una masa o cuerpo de suelo, lo cual puede llegar a cambiar sus características físicas y mecánicas o deformarlo.

4.1.2 *Importancia*

En la actualidad debe ser requisito primordial el estudio de suelos, para un control de las condiciones del subsuelo, esto ayudará a que se diseñe de acuerdo a las necesidades del sitio. Es necesario hacer del conocimiento a la población, sobre la importancia del estudio de suelos, ya que esto será de gran ayuda en cuanto a la seguridad en el diseño de sus estructuras y también económicamente, puesto que se hará una inversión en la cual se puede confiar, lo cual garantice a su vez condiciones óptimas de las construcciones que se realicen.

4.1.3 *Tipos de suelos*

Los principales tipos de suelos provienen del proceso llamado meteorización, que es la alteración física y química de las rocas más superficiales de la corteza terrestre. Están establecidos cuatro tipos de suelos, los cuales son: gravas, arenas, limos y arcillas, aunque en la naturaleza se encuentran varias combinaciones de los mismos.

- **Gravas:**

Son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen una variación de partículas desde 7.62 cm hasta 2.00 mm. Suele encontrarse en lechos, en las márgenes y en los conos de deyección de ríos, también en depresiones de terremotos rellenas por el acarreo de ríos y en algunos lugares a los cuales las gravas han sido transportadas. La forma de las partículas de las gravas y su relativa frescura mineralógica depende de la

historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos conocidos comúnmente como cantos rodados a los poliédricos.

- **Arenas:**

Nombre que se le da a los minerales de granos finos procedentes de la desintegración de las rocas o de su trituración artificial, sus partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro. El origen y existencia de las arenas es análoga a la de las gravas. Es frecuente encontrar depósitos grandes de arena de forma paralela a los depósitos de grava. Una característica de la arena se halla que no se contraen al secarse, no son plásticas, menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

- **Limos:**

Son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último caso de características plásticas. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. El diámetro de las partículas esta varía entre 0.05mm y 0.005 mm.

- **Arcillas:**

El nombre de arcilla se da a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. La permeabilidad de la arcilla es extremadamente baja, es decir bastante impermeable. Al saturarse, baja su capacidad de soporte. Las arcillas se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente. Se puede decir que un contenido mínimo del 15% de arcilla en un suelo cualquiera, le dará a este las propiedades de la arcilla.

4.1.4 *Características de los suelos*

Los suelos presentan diversas características que los definen, esto de acuerdo a su origen, composición y forma de agruparse, se detallan las principales a continuación:

- **Estructura:**

Ordenamiento físico-natural de las partículas de un suelo en su estado inalterado, la cual indicara la disposición, forma general y tamaño.

- **Textura:**

Se refiere a su apariencia superficial, la cual es influenciada por el tamaño de los granos presentes en él.

- **Color:**

Pueden ser variados, todo dependiendo de los materiales que los componen. Con el conocimiento de este tipo de característica se puede determinar el uso óptimo de los mismos. También el mejor método de estabilización que se le puede usar.

- **Cohesión:**

Es la característica de algunas partículas del suelo de atraer o adherirse a partículas semejante, atracción molecular; es determinante para saber si los suelos pueden cementarse como es el caso de las arcillas, que son consideradas como suelos cohesivos.

- **Consistencia:**

En función del contenido de humedad, puede presentar cambios de volumen, movimiento de agua en el interior del suelo, elasticidad y capacidad de carga del suelo.

4.1.5 *Calicatas*

Es una de las técnicas empleadas de exploración, empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico, estudios edafológicos o pedológicos de un terreno. Son excavaciones realizadas normalmente con pala o retroexcavadora. En el caso de las calicatas, fueron realizadas por expertos en la perforación de pozos, ver figura 37.

- **Ubicación de pozos (calicatas)**

P1 5ta. Calle final (sin numeración) Zona 2 San Marcos 14°57'39.6"N 91°47'30"O, altura 2376 (msn)

P2 5ta. Calle final 5-241 Zona 2 San Marcos, 14°57'45.4"N 91°47'28"O, altura 2362 (msn)

4.1.6 *Obtención y manejo de muestras de suelo*

Para la realización de la ampliación del estudio de suelos realizado en la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos, se hizo un sondeo de lugares para realizar dicho estudio. Para que cada resultado obtenido dentro del laboratorio cuente con precisión y a la vez sea

confiable, se debe tener en cuenta que el manejo de la muestra del suelo sea adecuado. De la obtención de las muestras se tienen dos tipos, muestras alteradas e inalteradas, ver figura 39.

Figura 37. Ubicación de calicatas, zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos



Fuente: Autor.

4.1.7 *Estratigrafía y perfiles estratigráficos*

La estratigrafía es esencialmente el estudio de la historia de la tierra tal y como ha quedado registrada hasta hoy en las rocas estratificadas Duque Escobar (2003). Como rama de la Geología estudia las rocas, teniendo en cuenta la secuencia temporal y los materiales que la constituyen, estratigrafía de calicatas en figura 38.

4.2 Teoría de estudios de laboratorio.

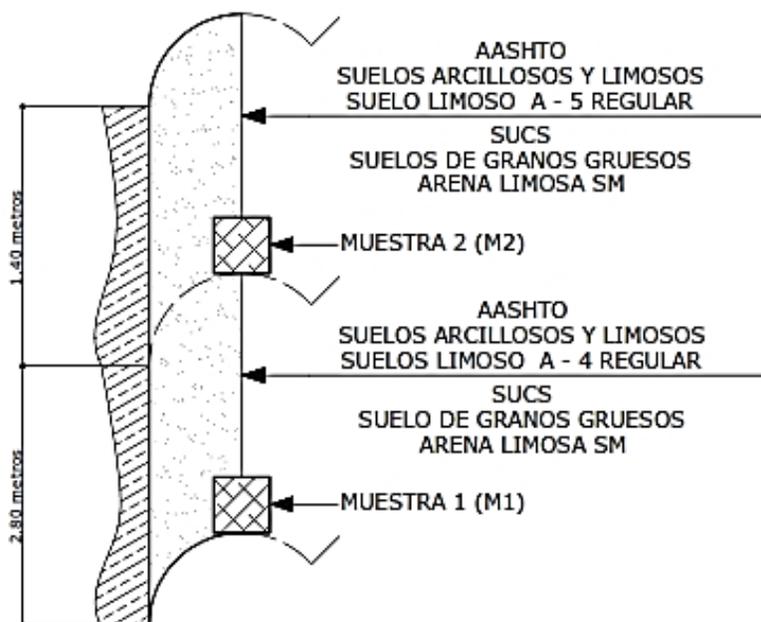
4.2.1 *Ensayo de corte directo*

La prueba de corte directo, se impone sobre un suelo de condiciones idealizadas, o sea, induce la ocurrencia de una falla a través de un plano de localización predeterminado. Sobre este plano actúan dos fuerzas (o esfuerzos) un esfuerzo normal debido a una carga vertical P_v aplicada externamente y un esfuerzo cortante debido a la aplicación de una carga horizontal P_h .

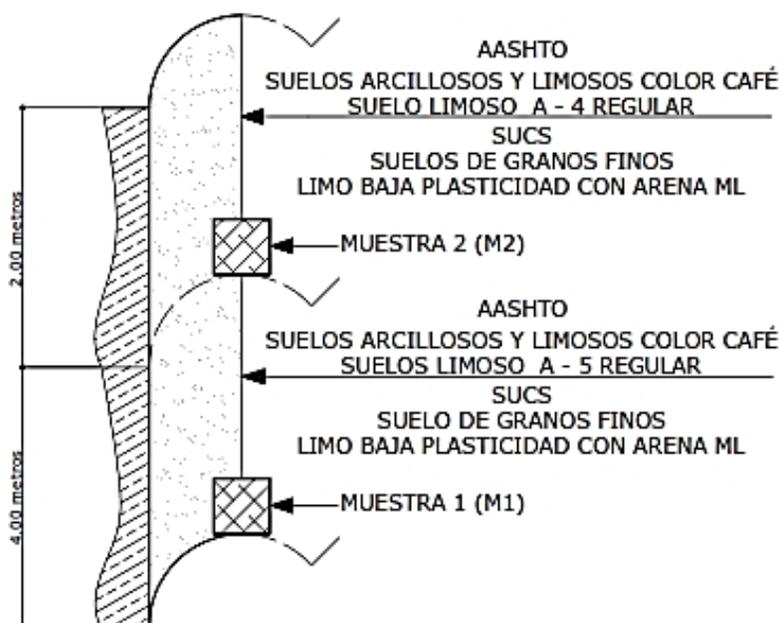
El ensayo de corte directo, se ejecutó a través del procedimiento explicado por la Norma AASHTO T236-03 Standard Method of Test for Direct Shear Test of Soils under Consolidated

- Perfiles estratigráficos:

Figura 38. Perfiles estratigráficos pozos
POZO 1 (P1)



POZO 2 (P2)



Fuente: Autor

Figura 39. Obtención y manejo de muestras zona 2 de San Marcos



Fuente: Autor.

Drained Conditions o ASTM D3080-03 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions.

El objetivo del ensayo de corte directo es el de determinar la cohesión del suelo y el ángulo de fricción interno, los cuales permitirán conocer el comportamiento de las muestras de suelo obtenidas en las calicatas exploradas en la zona de la cabecera departamental de San Marcos. Ver detalle en figura 40

4.2.2 *Ensayo de granulometría*

Este ensayo se llevó a cabo con la ayuda de AASHTO T87-70, ASTM D421 y D422-63. En la clasificación de los suelos para uso de ingeniería es universalmente acostumbrado utilizar

algún tipo de análisis granulométrico. Este análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de granos presentes en una masa de suelos dada. Obviamente para obtener un resultado significativo la muestra debe ser estadísticamente representativa de la masa de suelo.

Como no es físicamente posible determinar el tamaño real de cada partícula independiente del suelo, la práctica solamente agrupa los materiales por rangos de tamaño. Para lograr esto se obtiene una cantidad de material que pasa a través de un tamiz con una malla dada, pero que es retenido en un siguiente tamiz, cuya malla tiene diámetros ligeramente menores a la anterior y se relaciona esta cantidad retenida con el total de la muestra pesada a través de los tamices.

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva, para poder comparar suelos y visualizar fácilmente la distribución de los tamaños de granos presentes y como una masa de suelos típica puede tener partículas que varíen entre tamaños de 2.00 mm y 0.075 mm., las más pequeñas (tamiz No. 200).

4.2.3 *Ensayo de humedad natural del suelo*

Tiene el propósito de determinar el contenido de humedad en una muestra de suelo. La humedad natural de un suelo es la relación porcentual del peso de las partículas sólidas y el peso del agua que guarda; es de gran importancia esta propiedad física del suelo, ya que condiciona en gran parte el comportamiento del suelo.

Su objetivo es tomar muestras de suelo natural y llevarlas al laboratorio sin que tengan pérdidas de humedad y así conservar su estructura original. Normalmente la humedad natural se expresa en porcentaje, tomando como referencia ASTM D2216-71

4.2.4 *Ensayo de gravedad específica*

Este método de ensayo tiene el propósito de obtener datos por medio de los cuales se pueda determinar la gravedad específica de los suelos. La gravedad específica G_s de un suelo sin clasificación se toma como el valor promedio para los granos del mismo. También se define como el peso unitario del material en cuestión, esto dividido por el peso unitario del agua destilada a 4 °C.

La gravedad específica es un valor necesario para calcular la relación de vacíos de un suelo, de igual manera para predecir el peso unitario del suelo, y en algunas ocasiones se utiliza en la clasificación de los minerales del suelo. La referencia de este ensayo se encuentra en AASHTO T100-06 y ASTM D854-07.

4.2.5 *Ensayo de límites de Atterberg*

Atterberg, un científico sueco que se dedicó a la agricultura, propuso cinco límites, de los cuales el límite líquido y plástico han sido utilizados en todas las regiones del mundo, principalmente con objetivos de identificar y clasificar suelos.

- Límite plástico: es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico. Se define también como el contenido de humedad del suelo, en el cual donde un cilindro se rompe o se agrieta, cuando se enrolla a un diámetro aproximado de 3 milímetros equivalente a 1/8 de pulgada, esto al rodarse con la palma de la mano sobre una superficie lisa. AASHTO T090-00, ASTM D424-54
- Límite líquido: es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. También podría definirse como el contenido de agua que permite cerrar la ranura típica con 25 golpes en el aparato de Casagrande. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso. En algunas ocasiones puede utilizarse para estimar asentamientos en problemas de consolidación. ASHTO T089-02, ASTM D423-66

4.3 Caracterización de suelos

La caracterización de suelos permite dividirlos en grupos, los cuales son de comportamiento semejante que poseerán propiedades similares.

Existen diferentes métodos para la clasificación de suelos, el conocido Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el de la Asociación Americana de Agencias oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO), Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los cuales fueron tomados en los estudios realizados. Aunque existen también otros como de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (AASHO), la Clasificación de la Administración de Aeronáutica Civil (CAA), el Sistema del Departamento de Agricultura de

los Estados Unidos (USDA), el sistema de la ASTM por mencionar algunos de los sistemas de clasificación.

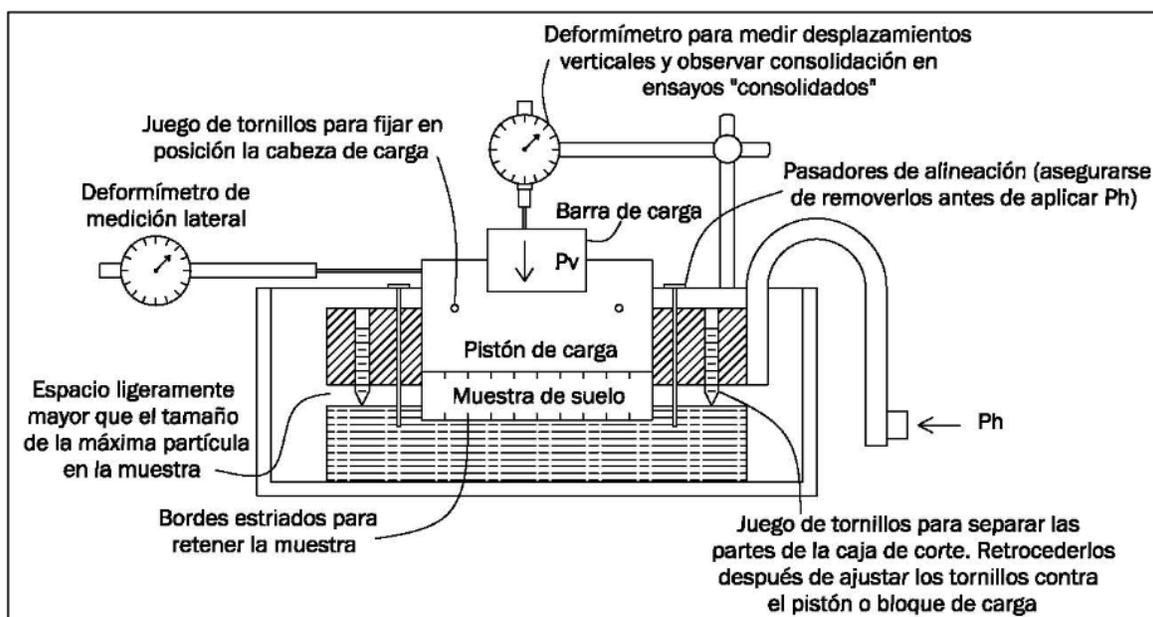
4.3.1 *Sistema de clasificación de suelos AASHTO*

Utilizada para clasificar los suelos de acuerdo a su adaptabilidad, para su uso en la construcción de pavimentos en carreteras y caminos. Utilizado principalmente en la clasificación de las capas de carreteras. Este sistema clasifica el suelo en categorías, dependiendo del porcentaje de granos que pasan el tamiz No. 200. Si retiene el 35% del material, este será suelo granular, si fuera el caso de que pasara más del 35%, será un suelo arcilloso y limoso.

4.3.2 *Sistema de clasificación de suelos SUCS*

Este sistema está basado en las propiedades de plasticidad y distribución del tamaño del grano y el contenido de materia orgánica. Se divide de acuerdo al porcentaje de material que pasa o retiene el tamiz No. 200. Si se retiene más del 50% del material, este será suelo de grano grueso, y si pasa más del 50% será suelo de grano fino.

Figura 40. Detalle del ensayo de corte directo y la caja de corte



Fuente: Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería civil. Pág. 177 (Joseph E. Bowles)

Figura 41. Ensayo de granulometría



Fuente: Autor

Figura 42. Ensayo humedad natural del suelo



Fuente: Autor

Figura 43. Ensayo gravedad específica



Fuente: Autor

Figura 44. Ensayo límites de Atterberg



Fuente: Autor

CONCLUSIONES

1. En cada punto georeferenciado, se realizaron tres mediciones de ruido ambiental el cual muestra el comportamiento del suelo sin tener que esperar a que un terremoto se produzca, esto con la ayuda del acelerógrafo Altus Kinematics K2 debidamente calibrado, al trabajar cada una de las diferentes mediciones se extrajeron tres componentes, una vertical y dos componentes horizontales una con dirección Norte – Sur y la otra Este – Oeste, con estos datos se realiza la operación con cada componente horizontal dividido componente vertical (método de razón espectral H/V) del cual se obtuvo el cociente, estimando así el efecto de sitio del suelo por punto.
2. Los datos analizados con el método de razón espectral dieron paso a crear una tabla de promedio de frecuencias, las cuales se clasificaron en tres tipos de familias de frecuencias. Después con los datos generaron propuestas de modelos de velocidad de onda de corte, esto a ciertas profundidades existiendo cambio de velocidades en cada una, de acuerdo a la familia de frecuencias a las que pertenece, con estos datos ya se puede realizar la clasificación de suelos de acuerdo a la norma de seguridad estructural 2-10 encontrados en la tabla 10.
3. Con el promedio de frecuencias generadas por cada uno de los puntos establecidos en las zonas de estudio, se agrupó por familias de frecuencias bajas, intermedias y altas, con las cuales se realizó una interpolación con cada uno de los datos. El resultado de la interpolación es el mapa de las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos, mostrando las microzonas con similar valor de frecuencia.
4. Basado a mapas realizados a través de Google Heart se traza una cuadrícula orientada al norte con una separación de cien metros de punto a punto; primero con la ayuda del programa se busca una ubicación la cual después en un mapa a escala como guía se establecen y señalan con la ayuda de GPS Garmin eTrex 10, existiendo algunos corrimientos de puntos, ya que no se pudo tener la autorización por ser lugares privados, buscándolos dejar lo más cercano posible de lo establecido anteriormente.
5. Se contó con la presencia de la dirección municipal de planificación y algunos trabajadores de las municipal de San Marcos, a los cuales se les dio a conocer el proyecto antes de iniciar a trabajarlo con información de algunos lugares en los cuales se había

realizado este tipo de trabajo, después de finalizarlo ya compartiendo así con los datos ya trabajados de microzonificación sísmica de acuerdo a lo realizado en las zonas 2 y 4 de la cabecera municipal de San Marcos con el método de razón espectral H/V (Método de Nakamura), el cual ayudó a establecer el comportamiento del suelo en los distintos puntos trabajados.

6. Se capacitó a los estudiantes y docentes de la carrera de ingeniería civil del centro universitario de San Marcos, antes de iniciar y al finalizar el proyecto, primero para darlo a conocer y después ya compartiendo los datos que dio como resultado el estudio de microzonificación sísmica realizado en las zonas 2 y 4 de la cabecera departamental de San Marcos basado al método de razón espectral H/V (Método de Nakamura).
7. Se realizaron perforaciones de dimensiones establecidas y descritas por cada uno ver figura 38 en determinados puntos de la zona 2 de la cabecera departamental de San Marcos ver figura 37, obteniendo de cada uno muestras alteradas e inalteradas a diferente profundidad, las cuales fueron trasladadas al laboratorio para su respectivo ensayo. Se le realizaron los ensayos de corte directo, granulometría, humedad natural del suelo, gravedad específica, límites de Atterberg, para luego obtener su clasificación según los sistemas AASHTO y SUCS.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a la municipalidad de San Marcos que basado a las normas NSE y AGIES se elabore un reglamento de construcción para las nuevas obras, tomando en cuenta los datos obtenidos en este estudio y demás trabajos realizados en las zonas de la cabecera departamental esto para ir erradicando las construcciones de tipo empíricas.
2. A la dirección municipal de planificación se le recomienda se agencie de un acelerógrafo y colocarlo fijo en un lugar especial, este servirá para el registro de la actividad sísmica dentro de la cabecera departamental de San Marcos.
3. Se recomienda a la dirección municipal de planificación contrate una empresa especializada en ensayos de penetración estándar, y se realice perforación una por la zona 2 y otra por la zona 4 en una ubicación la cual quede referenciada, con una profundidad de 30 metros y tomar muestras a cada 5 metros para establecer el cambio de suelos a distintas alturas. Estos datos ayudaran a tener una base de datos con los cuales se pueden hacer un comparativo con los datos que se obtuvieron en este estudio.
4. A la dirección municipal de planificación se recomienda empezar a pedir un estudio de suelo obligatorio para cada nueva construcción, esto ya como un avance del reglamento de construcción y ayuda a crear un banco de datos de los suelos de la región, el cual le garantice a la población marquense de la cabecera departamental de San Marcos una inversión segura al momento de la realización de una obra de construcción nueva.

BIBLIOGRAFÍA

AGIES NSE 2-10 (2010). *Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección*. Guatemala.

AGIES NSE 2.1-10 (2010). *Estudios geotécnicos y de microzonificación*. Guatemala.

Aguilar J. V. (2014). *Análisis y evaluación de vulnerabilidad por amenaza sísmica de las estructuras existentes en las zonas 4 y 5 del municipio de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Alfaro A. (1997). *Estimación del período predominante del suelo a partir de microtemblores. Aplicación a Barcelona*. Universidad tecnológica de Cataluña.

Bautista D. (2014). *Reconocimiento hidrológico de la zona urbana del municipio de Quetzaltenango, departamento de Quetzaltenango* (tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Braja M. Das. (2012) *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, México: Cengage Learning.

Braja M. Das. (2000) *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, México: Cengage Learning.

E. Bowles J. (1981) *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*, México: Mc Graw – Hill.

Flores, ET AL (2001). *Zonificación Sísmica Urbana en Guatemala: Fase I: Identificación de Unidades Geológicas y su Respuesta Sísmica Analítica. Informe Final. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas, CESEM Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Proyecto CONCYT 42-99*. Guatemala.

Fuentes G. A. (2013). *Examen de calidad de agregados para elaboración de concreto de los bancos de materiales en los municipios de San Marcos, Palo Gordo y San Pedro Sacatepéquez del departamento de San Marcos de acuerdo a las normas ASTM* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Fuentes R. D. (2013). *Análisis de la calidad de las unidades de mampostería (bloques de hormigón y ladrillos de arcilla cocida) fabricados en los municipios de San Marcos y San Pedro Sacatepéquez y comparación con normas COGUANOR NGO 41054* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Hernández, O. R. (2009). *Reevaluación del efecto de sitio y propuesta de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico para Managua, Nicaragua* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua; Managua, Nicaragua.

INE. (2013) Caracterización estadística. *Instituto nacional de estadística*. [Versión electrónica]. Guatemala: Instituto nacional de estadística., <https://www.ine.gob.gt>

INE. (s.f.) Estimaciones de la población total por municipio, periodo 2008 - 2020. Instituto nacional de estadística. [Versión pdf]. Guatemala: Instituto nacional de estadística., [http://www.oj.gob.gt/estadisticaj/reportes/poblacion-total-por-municipio\(1\).pdf](http://www.oj.gob.gt/estadisticaj/reportes/poblacion-total-por-municipio(1).pdf).

Itzep Y. C. (2013). *Descripción geológica del departamento de San Marcos, análisis topográfico y caracterización de los suelos de la zona 1, de la cabecera departamental de la meseta de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Jerónimo M. E. (2013). *Descripción geológica del departamento de san marcos, análisis topográfico y caracterización de los suelos de la zona 2, de la cabecera departamental de la meseta de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Koppler H. B. (2013). *Análisis y evaluación de la vulnerabilidad por amenaza sísmica de las estructuras existentes, en la zona 3 del municipio de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Municipalidad de San Marcos. (s.f.). San Marcos (San Marcos) *Wikipedia la enciclopedia libre*. [versión electrónica]. Estados Unidos: Wikipedia la enciclopedia libre., <https://es.wikipedia.org>

Paz E. K. (2012). *Procedimiento de cálculo para la elaboración de espectros sísmicos para el diseño sismorresistente de estructuras* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Paz L. A. (2013). *Análisis y evaluación de la vulnerabilidad por amenaza sísmica de las estructuras existentes, en la zona 1 del municipio de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Pérez J. A. (2007). *Un método de diferencias finitas para el análisis de la propagación de ondas. Aplicación al modelado de la respuesta sísmica de estructuras geológicas en entornos de computación en paralelo* (tesis doctoral). Universidad de Almería, España.

Quintana D. A. (2013). *Análisis y evaluación de la vulnerabilidad por amenaza sísmica de las estructuras existentes, en la zona 2 del municipio de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Ritta R. J. (2012). *Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral horizontal/vertical*. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Ruíz D. E. (2014). *Análisis de distribución urbana actual, topografía y caracterización de los suelos de la zona 4, de la cabecera departamental de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Ruíz E. E. (2014). *Análisis de distribución urbana actual, topografía y caracterización de los suelos de la zona 5, de la cabecera departamental de San Marcos* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala.

Sandoval V. H. (2013). *Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Chile

Villalaz C. (2004) *Mecánica de suelos y cimentaciones*, México: Limusa

.

ANEXOS

CAPACITACIÓN MICROZONIFICACIÓN SISMICA

CAPACITACIÓN MICROZONIFICACIÓN SISMICA CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS – INGENIERÍA CIVIL

Capacitación inicio: contando con estudiantes y docentes del centro universitario de San Marcos específicamente de la carrera de ingeniería civil.



Capacitación al final: contando con estudiantes y docentes del centro universitario de San Marcos específicamente de la carrera de ingeniería civil.



CAPACITACIÓN MICROZONIFICACIÓN SISMICA DIRECCIÓN MUNICIPAL DE PLANIFICACIÓN (DMP)

Capacitación inicio: personal de la dirección municipal de planificación.



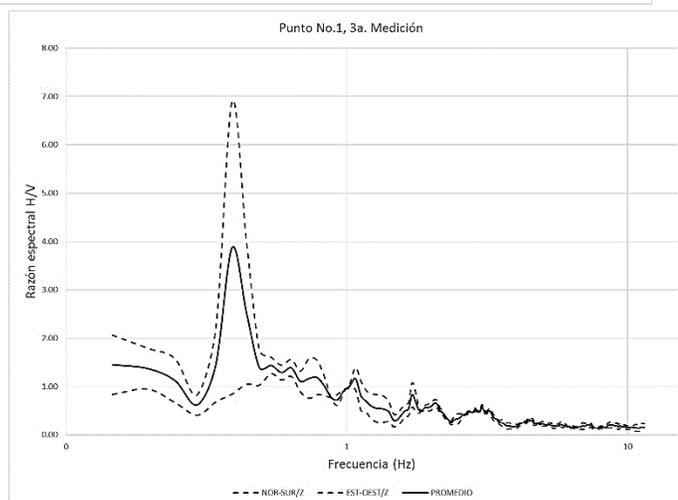
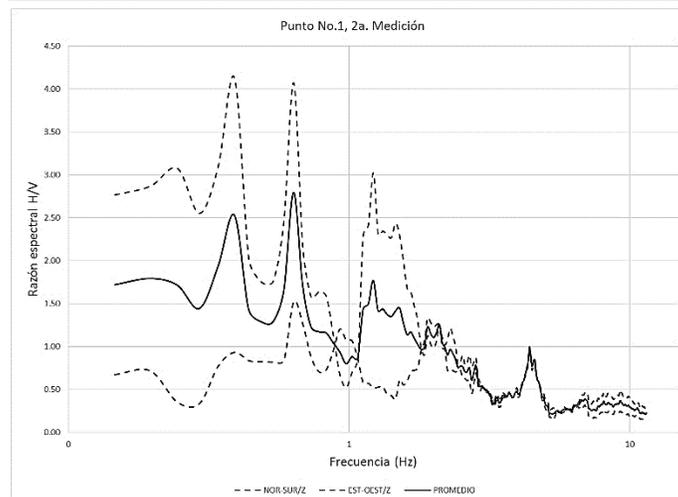
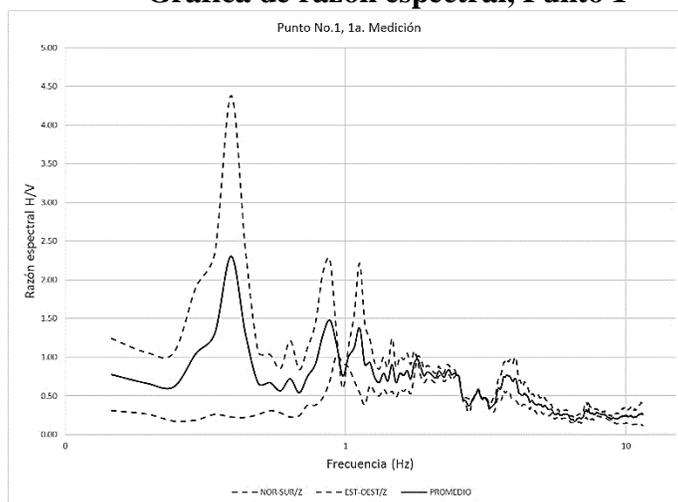
Capacitación final: personal de la dirección municipal de planificación.



**GRÁFICAS DE RAZÓN ESPECTRAL, MEDICIONES DE RUIDO AMBIENTAL
REALIZADAS DE LA CABECERA DEPARTAMENTAL DE SAN MARCOS**

Ejemplo de gráfica de razón espectral frecuencias bajas

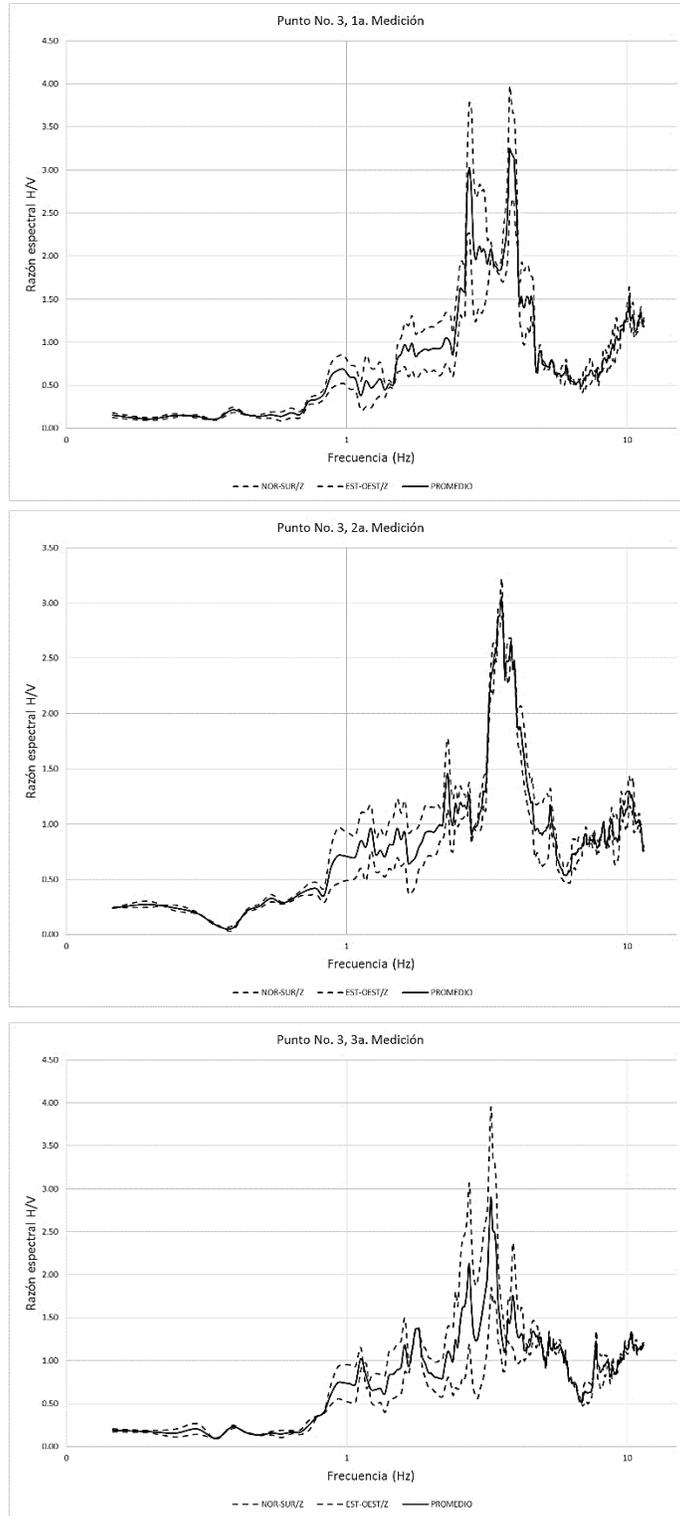
Gráfica de razón espectral, Punto 1



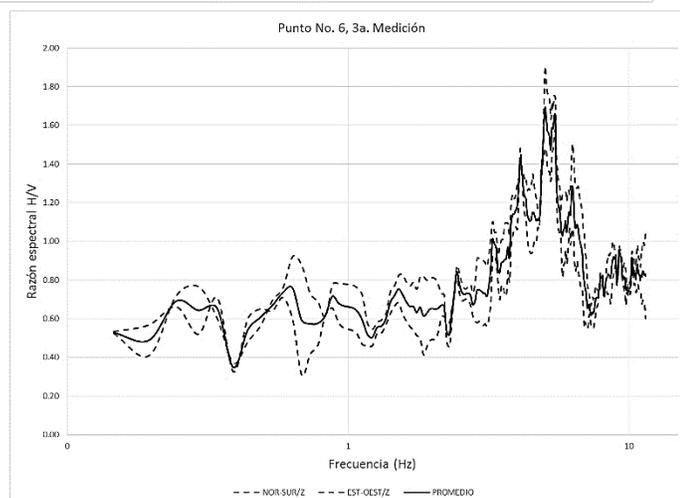
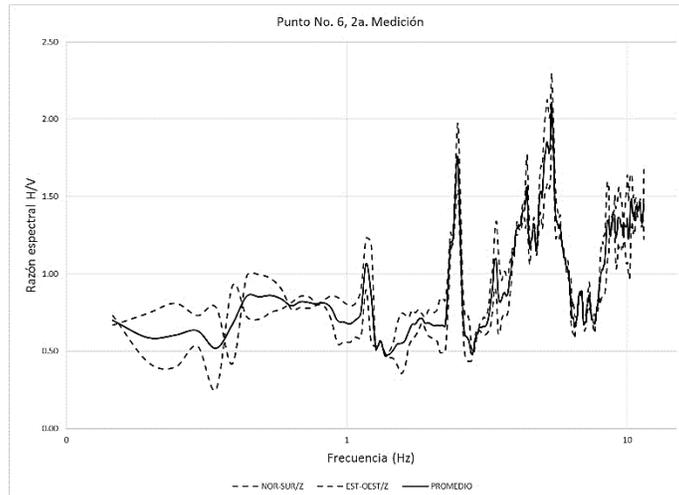
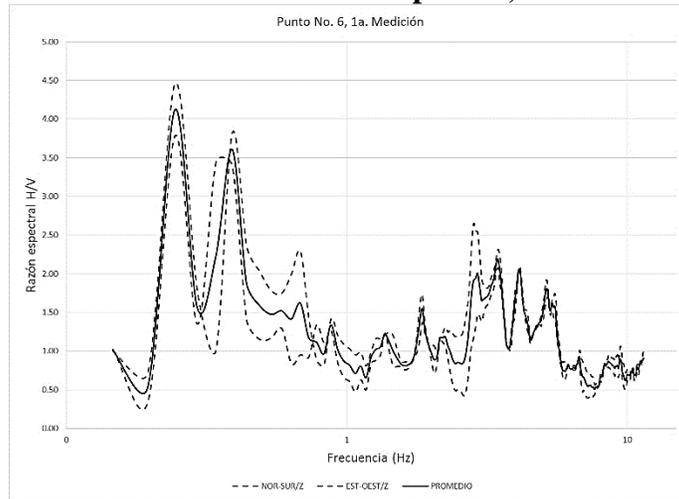
Frecuencia promedio 0.6836 Hz.

Ejemplo de gráfica de razón espectral frecuencias medias

Gráfica de razón espectral, Punto 3



Frecuencia promedio 3.5482 Hz.

Ejemplo de gráfica de razón espectral frecuencias medias**Gráfica de razón espectral, Punto 6**

Frecuencia promedio 4.6224Hz.

