

microzonificación sísmica

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas



R. González / J.C. Mora / J. Aguirre



Proyecto FOMIX



MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

^{a*}Mora, J.C., ^{bc**}González, R., ^dAguirre, J., ^ePiña, J., ^fGarcía-Moreno, L.M.,
^eLovera, S.S., AP., ^eGil, A., ^eDe los Santos, RI., ^eBalbuena, I.J., ^eVázquez, N.E.,
^eTorrijos, M.A., ^cJiménez-Franco, A., y ^cMijares, H.

a).- Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geofísica
Departamento de Vulcanología

b) Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Ingeniería Ambiental

c).- Posgrado de Ciencias de la Tierra (UNAM)

d).- Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Ingeniería
Coordinación de Ingeniería Sismológica

e).- Instituto de Geofísica
Proyecto Sistema Integral de Protección Civil Chiapas

f).- Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de
Desastres, Estado de Chiapas

* Director del proyecto jcmora@igeofcu.unam.mx

** Primer autor ingeraul@yahoo.com

Contenido	
CONTENIDO.....	2
PRESENTACIÓN.....	4
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
1. TECTÓNICA DEL ESTADO DE CHIAPAS.....	9
2. FUENTES SISMO-GÉNICAS EN EL ESTADO DE CHIAPAS.....	12
3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SISMICIDAD EN TUXTLA GUTIÉRREZ.....	17
3.1. FISIOGRAFÍA DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.....	24
3.2. GEOMORFOLOGÍA.....	25
3.2.1. LAS CUATRO GRANDES LADERAS.....	25
3.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL ESTADO DE CHIAPAS.....	28
3.2.1. GEOLOGÍA DE TUXTLA GUTIÉRREZ.....	30
3.2.2. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS EN TUXTLA GUTIÉRREZ.....	36
4. DAÑOS HISTÓRICOS POR SISMO EN TUXTLA GUTIÉRREZ.....	39
5. EFECTO DE LOS EMBOVEDADOS EN LOS DAÑOS EN TUXTLA GUTIÉRREZ.....	46
6. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.....	50
6.1. ANTECEDENTES.....	50
6.2. ESTUDIO ACTUAL DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.....	52
6.2.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	52
6.2.2. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	53
6.2.3. RESULTADOS DE LA TÉCNICA DE NAKAMURA.....	57
6.3. ANÁLISIS DE LA MICROZONIFICACIÓN VERSUS LOS DAÑOS HISTÓRICOS.....	61
6.4. DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD CON LA TÉCNICA DE CORRELACIÓN ESPACIAL, SPAC.....	67
6.4.1. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SPAC.....	68
6.4.2. MÉTODO SPAC EN LÍNEA.....	69
6.4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO SPAC.....	69
6.4.4. RESULTADOS DE LA TÉCNICA SPAC.....	70
6.4.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	92
7. PELIGRO SÍSMICO EN TUXTLA GUTIÉRREZ.....	95
7.1. ANÁLISIS DEL PELIGRO SÍSMICO CONSIDERANDO LA METODOLOGÍA DEL MOC-CFE VERSIONES (1993 Y 2008).....	95
7.2. ANÁLISIS DEL PELIGRO SÍSMICO CONSIDERANDO LA METODOLOGÍA PSM (2004) Y CRISIS (2007).....	97
8. CONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.....	107
8.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA VIVIENDA EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.....	109
8.2. ANTECEDENTES DE LA NORMATIVA DE CONSTRUCCIÓN EN CHIAPAS.....	111

8.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS EMPLEADOS EN TUXTLA GUTIÉRREZ.....	112
8.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EMPLEADOS EN TUXTLA GUTIÉRREZ	116
8.5. PROPUESTA DE RED ACELEROGRÁFICA EN TUXTLA GUTIÉRREZ.....	124
9. COMENTARIOS FINALES	128
10. REFERENCIAS.....	130
11. ANEXOS.....	137
ANEXO 1. SISMOS OCURRIDOS EN EL ESTADO DE CHIAPAS CON MAGNITUD SUPERIOR A 6.5	1377
ANEXO 2. SISMOS HISTÓRICOS OCURRIDOS EN EL ESTADO DE CHIAPAS, REPORTADOS POR DISTINTAS FUENTES CON INTENSIDAD IGUAL O MAYOR QUE VI	139
ANEXO 3. GRAFICAS H/V PARA LA ZONA CENTRO DE LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS.....	143
ANEXO 4. GRAFICAS H/V PARA LAS LADERAS DE LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS.....	153

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado con los proyectos: CONACYT 48506-F, Dr. Juan Carlos Mora Chaparro; PAPIIT IN 103909-3, Dr. Juan Carlos Mora Chaparro; Proyecto externo Instituto de Geofísica I845, Sistema Integral de Protección Civil para la Reducción de Riesgos de Desastres (FOPREDEN); PAPIIT IN 114011, Dr. Jorge Aguirre González. Proyecto FOMIX, COCYTECH.

Presentación

Licenciado Luis Manuel García Moreno
Director Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres.

En Chiapas la política de la protección civil es asumida mediante el enfoque de la reducción de riesgos de desastres, la cual es promovida por el Sistema Nacional de Protección Civil, la Universidad Nacional Autónoma de México y la Organización de las Naciones Unidas, para salvaguardar la vida, el medio ambiente y el patrimonio de los chiapanecos.

Desde esta perspectiva, hoy sabemos que los desastres naturales no existen, sino que son socialmente contruidos, por lo que deben ser vistos como un proceso y no sólo limitarse a la circunstancia caracterizada por una emergencia derivada del efecto de algún fenómeno natural, como los ciclones, las inundaciones, las sequías y los terremotos.

Visión que ha sido impulsada por la administración del Gobernador del Estado Juan Sabines Guerrero, dejando atrás el tradicional esquema de protección civil dedicado básicamente a dar respuesta a los desastres, para pasar a una auténtica política pública de reducción de riesgos de desastres.

En este marco, el enfoque de la reducción de riesgos de desastres se sustenta en Chiapas, en una estrecha colaboración que hemos fomentado con las instituciones de educación superior y de investigación en el país, quienes a través de sus programas de investigación y docencia promueven el conocimiento de los diferentes peligros que representan los fenómenos o amenazas naturales a que nos encontramos expuestos y que resultan indispensables para reducir el riesgo de desastres que éstos pudieran ocasionar a la población.

Sin lugar a dudas, el estudio del fenómeno sísmico es de suma importancia en Chiapas, ya que el Estado se encuentra ubicado en una zona altamente sísmica provocada por el movimiento de tres placas tectónicas: la de Cocos, la Norteamérica y la del Caribe; situación por la que la entidad sufrió la presencia de por lo menos diez sismos de magnitud mayor a 6.5 en la escala de Richter durante el siglo pasado, destacándose entre éstos, el ocurrido en el municipio de Villaflores el 21 de octubre de 1995, de magnitud 6.5, que causó daños importantes principalmente en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Este evento ha convocado a la comunidad científica a realizar investigaciones en este ámbito, como la que se presenta en este *Informe de Microzonificación Sísmica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, la cual fue dirigida por el Dr. Juan Carlos Mora Chaparro, investigador del Instituto de Geofísica de la UNAM y miembro del Comité Científico Asesor del Sistema Estatal de Protección Civil; asesorado por el Dr. Jorge Aguirre, investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM; y bajo la responsabilidad del CaDr. Raúl González Herrera, estudiante de

doctorado de la UNAM e investigador de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y con la colaboración de un destacado grupo de expertos.

Estamos seguros que los resultados de esta investigación contribuirán en el ámbito de la protección civil a disminuir el grado de riesgos que presentan las construcciones ante el fenómeno sísmico en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y serán de suma importancia para contribuir en la formulación de proyectos de crecimiento urbano, con el propósito de construir una comunidad más resiliente ante la amenaza o peligro de este tipo de fenómenos.

Por ello el Gobierno del Estado, felicita a las universidades y centros de investigación que promueven la publicación de este tipo de investigaciones, orientados a generar una cultura de la prevención de desastres entre los ciudadanos y que sean de utilidad para los académicos, estudiantes y profesionistas de diferentes áreas avocados a la gestión integral de riesgos de desastres.

Resumen

Para el presente estudio se tomó en consideración las características geotécnicas, geológicas y morfológicas disponibles de la zona y estudios preliminares de microzonificación sísmica. Se incluyó un estudio detallado del centro histórico de la ciudad y se recurrió, donde esto fue posible, a planos y litografías hasta principios del siglo XIX para ubicar los efectos locales de sismos históricos. Con ello se pudo observar la evolución del tipo de vivienda y la tendencia de crecimiento de la ciudad. Se localizaron antiguos causes de río y caudales, espejos de agua, zonas de relleno, ahora dentro de la mancha urbana, donde el suelo puede presentar características dinámicas especiales. También se recurrió a Cartas de Ordenamiento Urbano para observar la expansión de las ciudades en sus diferentes usos del suelo.

Se emplearon diversas técnicas geofísicas para determinar, mediante microtemores (vibración ambiental), los periodos dominantes, las amplificaciones relativas y los perfiles de velocidad, con los cuales se delimitaron dos zonas: la zona de laderas y la zona centro, con un periodo dominante (T_0) del suelo cuyos valores van de 0.06 a 1 segundos. (15 y 1 Hz, respectivamente) se ubicó la zona de transición centro y la zona de laderas. La zona de laderas tiene un máximo hacia los 15 Hz, para referirnos a suelos originales sin modificación. La zona centro, presenta un máximo espectral hacia los 2 Hz, para referirnos a suelos blandos.

Los valores de la amplificación relativa asociada varían de 2 hasta 25 veces distribuidos en toda la ciudad, la máxima se ubica en el centro y en la parte más baja de la ciudad, cercanas al río Sabinal.

Las señales procesadas permiten identificar que en la zona centro y en parte del norte de la ciudad se encuentran los máximos periodos (0.51 - 1 segundos promedio), respecto al resto de la ciudad (0.06 - 0.50 segundos promedio).

Se desarrollaron diversos mapas que pueden ser utilizados en la gestión del riesgo por un evento sísmico. Estos mapas deben ser modificados al crecer la ciudad y conforme al calibramiento continuo con una red acelerográfica permanente, al registro de eventos sísmicos y al comportamiento de las estructuras. Para este estudio calibramos respecto a la respuesta del sismo del 7 de abril de 2011 y lo obtenido en las estaciones de la UNACH y la UNICACH.

Introducción

El estado de Chiapas es considerado a nivel nacional, como una región sísmicamente activa, ya que se encuentra en un sistema tectónico complejo por la interacción de tres placas: la placa de Cocos, la placa Norteamericana y la placa del Caribe, esta última se desplaza en dirección contraria a las otras. Como consecuencia del contacto y de los movimientos entre estas placas se tienen dos límites: uno de subducción entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana; y el otro transformante entre la placa del Caribe y la placa Norteamericana, donde se desarrollaron varios sistemas de fallas. Es en la zona de límites tectónicos donde se libera la energía y se presenta la mayoría de los sismos en esta entidad.

Los sismos viajan en forma de ondas a través del terreno desde su fuente de origen. A mediados del siglo XIX ya se conocía que el movimiento producido por el paso de las ondas sísmicas después de un sismo, no produce el mismo efecto en todas las zonas por donde éstas pasan.

De esta forma, se observó que los daños se concentraban en algunas áreas muy particulares, respecto a otras que las circundaban. La concentración de los daños en ciertas áreas se asoció a que el terreno donde éstas se localizaban presentaba mayores amplificaciones de las ondas en el suelo, que aumentaba tanto la aceleración como la velocidad y el desplazamiento de la superficie respecto a las áreas que lo circundaban.

La amplificación del terreno local puede deberse a la naturaleza, composición y morfología de las capas superficiales de suelo. A este fenómeno local del comportamiento del terreno se le conoce como “efecto local”, “respuesta local” o “efecto del sitio” (Rodríguez, 2005). El presente trabajo se enfoca principalmente al estudio del efecto de sitio en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Una de las ciudades importantes para el estado de Chiapas es su capital, Tuxtla Gutiérrez, que se localiza en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Este municipio contiene 108 localidades que suman una población de 553,278 habitantes según los resultados preliminares del Censo General de Población y Vivienda 2010. En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se presenta la mayor concentración de población, infraestructura, equipamiento y servicios urbanos en el estado.

La capital del estado de Chiapas no tiene normas técnicas de construcción que contemplen especificaciones de respuesta local a las ondas sísmicas, como el caso del Distrito Federal, es por ello que es indispensable estudiar ese comportamiento y conocer las amplificaciones de las ondas sísmicas en los diferentes suelos de la capital. Esto es con el fin de determinar sus características de efecto de sitio y el grado de vulnerabilidad ante la amenaza sísmica que tienen sus construcciones, como requisito indispensable para la mitigación y prevención de riesgos.

Los planes de desarrollo de las poblaciones deben contemplar la respuesta sísmica local del subsuelo, con el fin de definir los parámetros específicos de diseño estructural sísmoresistente, de acuerdo al historial sísmico de la región (IPCMIRD, 2010).

Los estudios de microzonificación sísmica consisten en la identificación y caracterización de unidades de suelos y unidades litológicas subyacentes, en general la respuesta dinámica de los suelos frente a terremotos es muy variable. Además de los suelos, en un estudio de microzonificación se incluyen los efectos inducidos por fallas, licuación y otros, y se valora su peligrosidad. Los mapas resultantes, o mapas de microzonificación, se presentan en una base cartográfica útil para fines de edificación y planificación urbana (Tupak, 2009).

Tupak (2009) afirma que los aspectos más significativos a considerar en los estudios de microzonificación son los siguientes:

- Propiedades geotécnicas de los suelos, espesor, densidad, velocidad de ondas transversales, módulo de rigidez, resistencia, profundidad del nivel freático, etcétera.
- Susceptibilidad frente a la licuación, deslizamiento y roturas superficiales por fallas.
- Susceptibilidad de laderas de sufrir procesos de remoción.
- Condiciones topográficas que puedan amplificar la respuesta sísmica.
- Peligrosidad frente a tsunamis en zonas costeras.

1. Tectónica del estado de Chiapas

Guzmán y Meneses (2000) dividen al estado de Chiapas en cuatro provincias tectónicas: la provincia de las Fallas Inversas, la provincia de las Fallas Laterales, el Batolito de Chiapas y las Fallas de Motagua-Polochic.

La provincia tectónica de las Fallas Laterales abarca la mayor parte del territorio de la Sierra de Chiapas. Esta provincia está compuesta por un conjunto de bloques que se hundén y se levantan, limitados por fallas laterales izquierdas. En la parte este de la provincialas fallas tienden a estar orientadas en la dirección este-oeste, mientras que en las áreas centrales y occidentales las fallas se orientan en la dirección de N 50° W. Hay nueve fallas en esta provincia siendo las de mayor longitud (120 – 170 km) las Fallas Tecpatán-Ocosingo, Malpaso, y Telestaquín-San Cristóbal. La sismicidad en esta provincia tectónica se caracteriza por sismos moderados y someros (Guzmán y Meneses, 2000).

La provincia tectónica de fallas inversas ocupa la porción oriental de la Sierra de Chiapas y la parte centro-norte de Guatemala. Esta provincia tiene una morfología superficial en forma de una “Z” ancha, formada por anticlinales estrechos cortados a lo largo de sus flancos por fallas inversas. La sismicidad asociada a esta provincia tectónica es menor que en la provincia de las fallas laterales (Guzmán y Meneses, 2000).

El Batolito de Chiapas se extiende desde el Istmo de Tehuantepec hasta la frontera con Guatemala, tiene una longitud aproximada de 300 km con una orientación NW-SE y un ancho de aproximadamente 75 km, está compuesto por rocas intrusivas de composición graníticas a granodioríticas (Rodríguez, 2007). El Batolito de Chiapas se ubica en la porción occidental del estado de Chiapas donde se localiza el contacto entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana, la primera subduce a la segunda.

El contacto entre la placa Norteamericana y la placa del Caribe se extiende desde el Caribe, pasa por Guatemala y se interna en el estado de Chiapas. Este límite ha sido definido por el Sistema de Fallas Motagua-Polochic en Guatemala y por varios sistemas de fallas y cabalgaduras que atraviesan el estado de Chiapas (Guzmán y Meneses, 2000).

Narcía (2002) realizó un estudio de las condiciones geofísicas del estado de Chiapas y concluyó que la corteza tiene un espesor máximo de 49 km. En la figura 1 se muestra el modelo propuesto por Narcía (2002), que representa la discontinuidad de Moho, entre la corteza y manto superior, vista desde arriba.

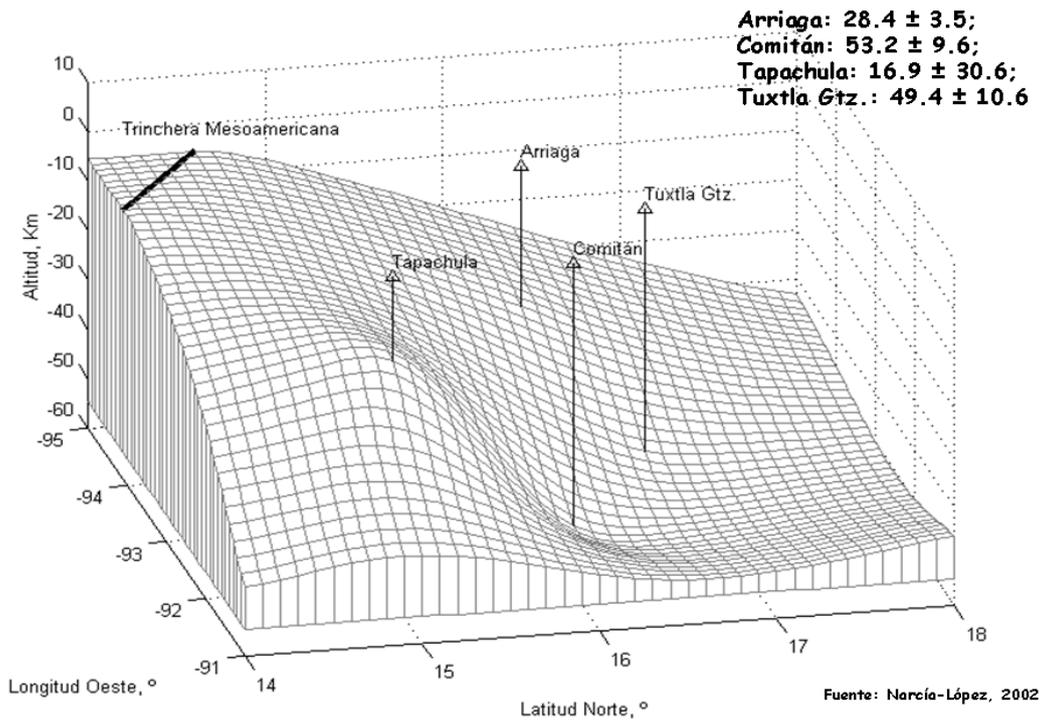


Figura 1. Modelo propuesto por Narcía (2002). La superficie de la figura representa la discontinuidad entre la corteza y el manto superior.

Rodríguez (2007) presenta modelos de velocidad de ondas P para el estado de Chiapas y su frontera con Guatemala, como los que se muestran en la figura 2. En la figura 3, aparece un modelo tridimensional propuesto por el mismo autor.

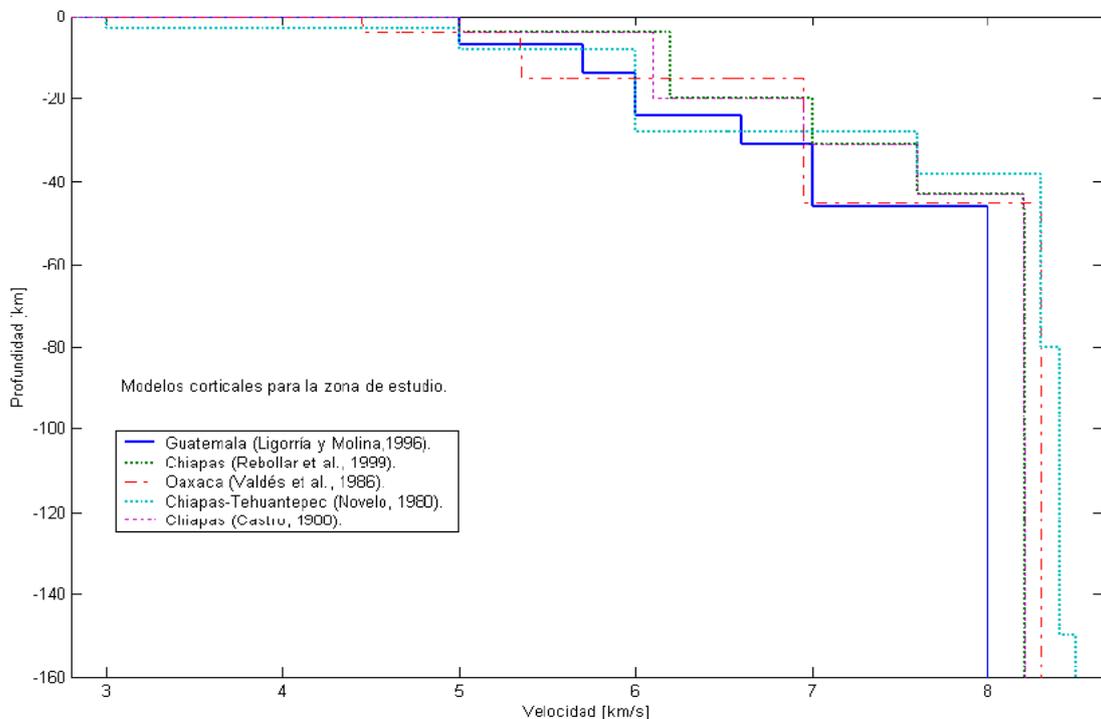


Figura 2. Modelos de velocidades promedio de ondas P de la corteza (1D) para Chiapas, Guatemala y Oaxaca (Rodríguez, 2007).

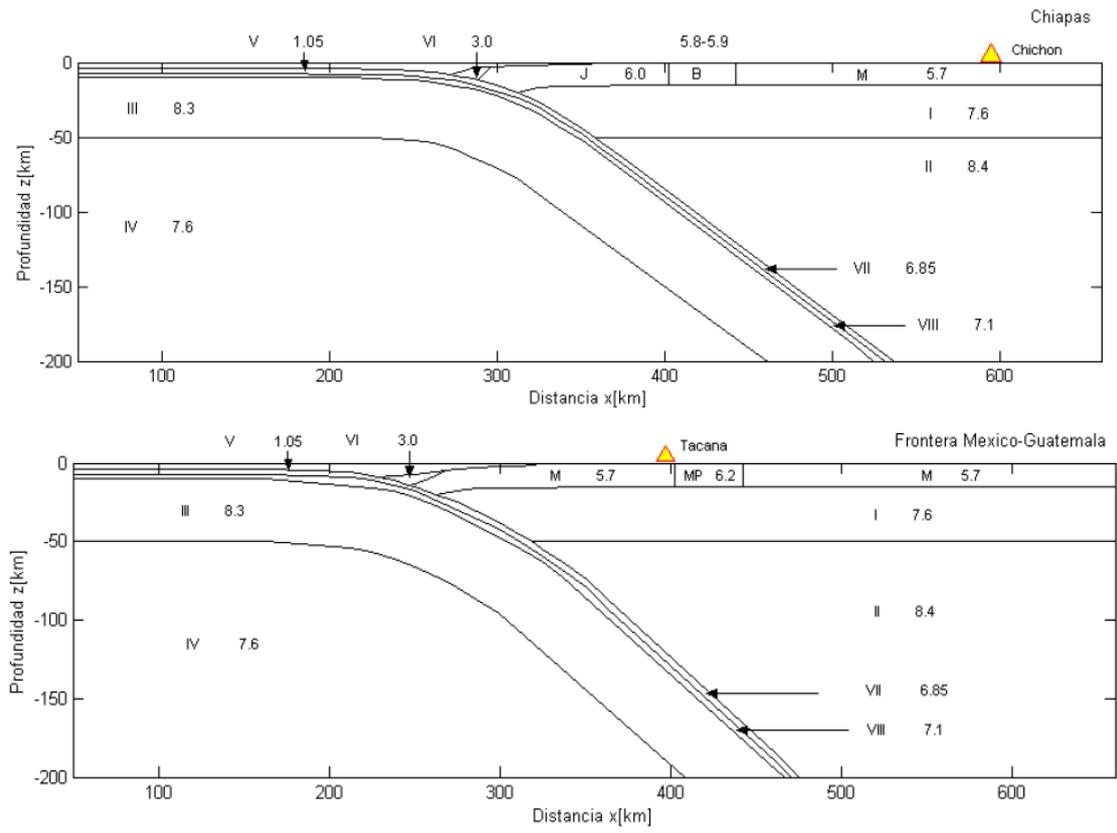


Figura 3. Estructura tridimensional de velocidades de ondas P para cada bloque de Chiapas en km/s (Rodríguez, 2007).

2. Fuentes sismo-génicas en el estado de Chiapas

El estado de Chiapas es uno de los tres estados de la República Mexicana con mayor actividad sísmica. Esta actividad se genera por la interacción de tres placas tectónicas: la placa de Cocos, la placa Norteamericana y la placa del Caribe; la primera subduce bajo la segunda y en el contacto entre la segunda y la tercera se desarrolla un desplazamiento lateral izquierdo (figura 4).



Figura 4. Placas tectónicas y sus correspondientes desplazamientos y velocidades relativas promedio (CENAPRED, 2006).

Los sismos en el estado de Chiapas tienen su origen en cinco fuentes sismo-génicas. La primera es la resultante del proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, misma que da origen a sismos de gran magnitud ($M > 7.0$) (Suárez y Singh, 1986; Pardo y Suárez, 1995). Los sismos producidos por esta fuente han alcanzado magnitudes de 7.7 en la escala de Richter e intensidades hasta de X en la escala de Intensidad de Mercalli Modificada (IMM), como el sismo del 23 de septiembre de 1902 (Figueroa, 1973) y más recientemente el del 21 de enero de 2002, con magnitud de 6.7 e intensidad de VI.

La segunda fuente sismo-génica está constituida por la deformación interna de la placa subducida, lo cual produce sismos profundos o de mediana profundidad (desde 80 hasta 300 km), como el sismo de Villaflores del 21 de octubre de 1995, cuya magnitud fue de 7.2, con una profundidad focal de 165 km y un área de ruptura de 30×10 km (Rebollar *et al.*, 1999). La profundidad de subducción de la placa de Cocos en la costa del estado de Chiapas es mayor que en las costas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, donde no rebasan los 80 km de profundidad. En Chiapas alcanzan valores cercanos a los 200 km como se observa en la figura 5 (Ponce *et al.*, 1992; Barrier *et al.*, 1998).

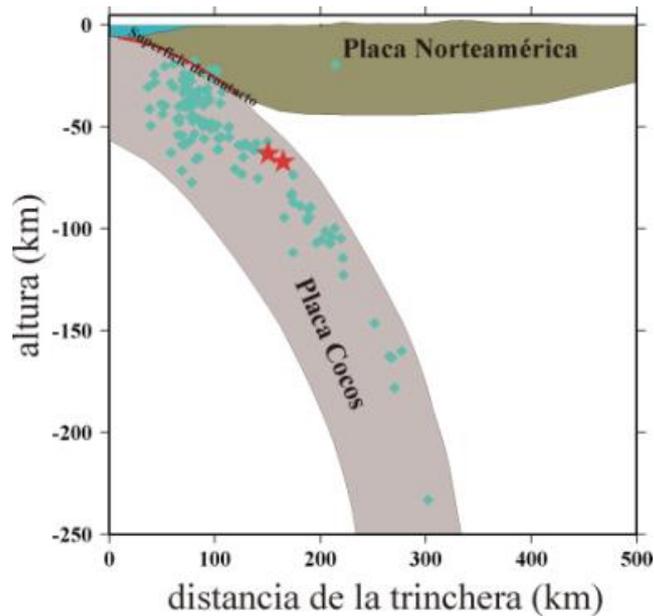


Figura 5. Profundidad y distancia donde se presentan los sismos profundos de subducción en la costa de Chiapas (Barrier *et al*, 1998).

La tercera fuente sismo-génica corresponde a la deformación cortical asociada a sistemas de fallas superficiales, al menos 15 fallas importantes presentes en el estado, que originan temblores de pequeña profundidad (menores a 40 km) Figueroa (1973). Esta fuente origina sismos de magnitud moderada que producen daños locales, por ejemplo, los enjambres de sismos originados en Chiapa de Corzo entre julio y octubre de 1975, (Figueroa *et al.*, 1975). No obstante lo anterior, un grupo importante de la sismicidad cortical de la región ha sido atribuida a la construcción de las presas a finales de los años setenta y al llenado de las cortinas por presión de poro (Rodríguez *et al.*, 1985).

Una cuarta fuente sismo-génica está constituida por la presencia de los volcanes activos en el estado de Chiapas, el Complejo Volcánico Tacaná y el volcán El Chichonal.

La última fuente sísmica está relacionada con el contacto tectónico entre las placas Norteamericana y del Caribe que es una falla lateral izquierda. Ésta ha producido sismos muy importantes como el del 18 de abril de 1902, que destruyó gran parte de los monumentos históricos de la ciudad de Antigua Guatemala y que alcanzó intensidades de VIII en la zona del Soconusco en Chiapas (Benito *et al.*, 2001).

La figura 6 muestra las diversas fuentes sismo-génicas del estado de Chiapas con base en la profundidad de generación y la densidad de eventos presentados. Se observa que la cantidad de eventos hace necesario tener una red más densa de acelerógrafos para estimar de mejor manera los niveles de peligro del estado de Chiapas.

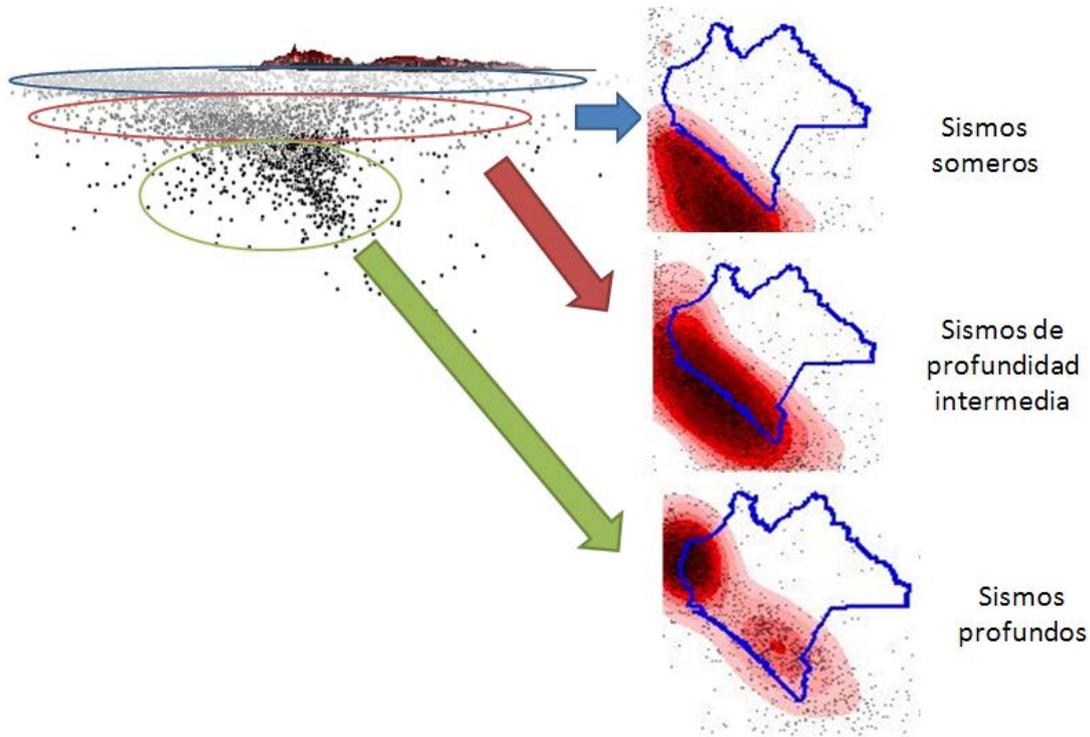


Figura 6. Zonas sismo-génicas relacionadas con la profundidad para el estado de Chiapas.

Las diversas fuentes sísmicas han generado sismos muy importantes históricamente en la República Mexicana, el estado de Chiapas sufrió por lo menos diez sismos con magnitud mayor a 7 en el siglo XX, es decir, un promedio de uno cada diez años (CENAPRED, 2006), ver figura 7 y cuadro 1.

Debemos considerar que la instrumentación sísmica del estado de Chiapas es reciente, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) la desarrolla a partir de la operación de las presas, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) a partir de 1974, el Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica (GIIS) a partir de 1994; debido a ello, pudo haber una mayor cantidad de sismos de esta magnitud, o incluso estos sismos pudieron haber sido de menor magnitud a la señalada.

Otro aspecto a considerar es el tipo de magnitud expresada, ya que ésta puede ser diferente dependiendo de la metodología usada para calcularla, el mismo SSN ha empleado al menos dos tipos de magnitudes diferentes en su historia de 100 años, en el cuadro 1 se presenta una magnitud M_s (magnitud de ondas superficiales), adicionalmente se coloca el valor mayor de la magnitud reportada en otra de las columnas. Actualmente se emplea la M_w (magnitud de momento), cuya metodología es más estable para un rango más amplio de valores.

Como puede advertirse en la figura 8, la diferencia entre escalas puede ser de varios décimos de grado (el sismo de Villaflores de octubre de 1995 tuvo magnitudes entre 7.1 y 6.5), una diferencia importante si no se especifica en qué escala se habla.

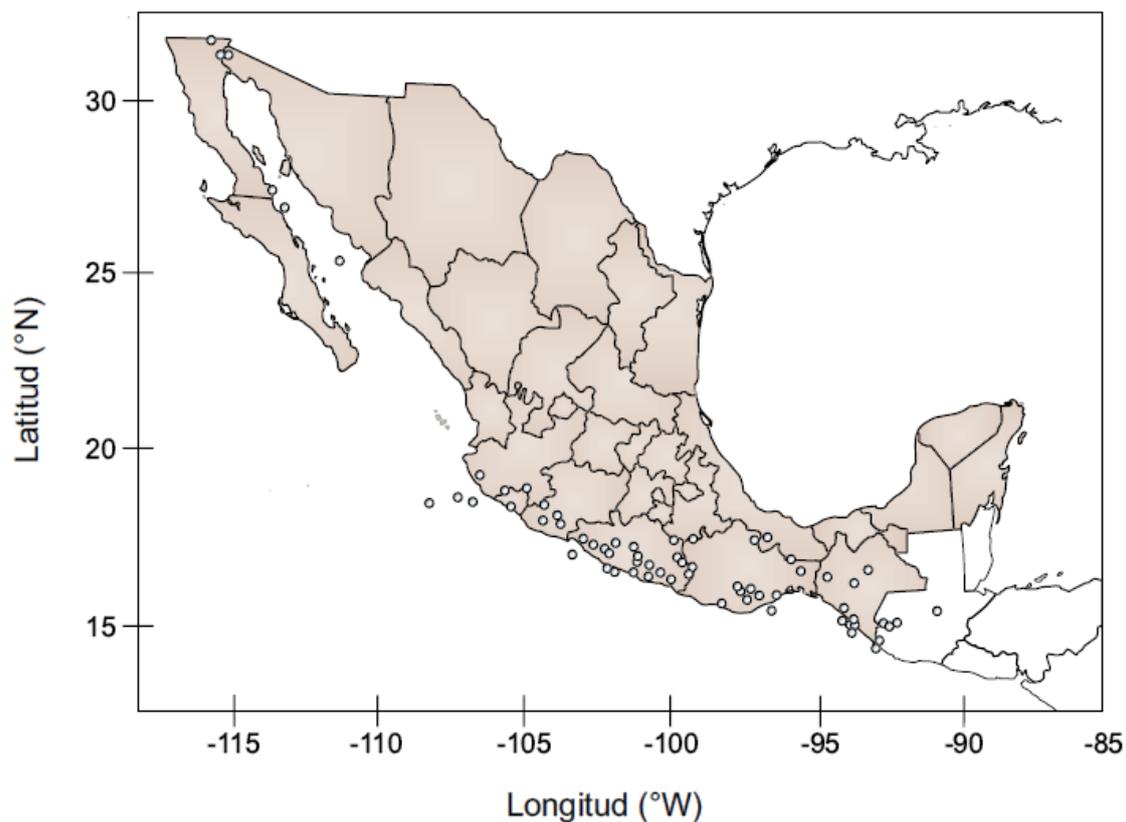


Figura 7. Sismos con magnitud mayor a 7 ocurridos en el siglo XX en la república mexicana y su frontera con Guatemala (CENAPRED, 2006).

Cuadro 1. Temblores de magnitud superior a 7.0 en Chiapas en el siglo XX. Adaptado de CENAPRED, 2006.

Fecha	Lat°N	Long° W	Prof (km)	M (max)	Ms	Región
1902 Sep 23	16.500	92.50	25	7.7	7.7	Chiapas
1903 Ene 14	15.000	93.00	S	7.6	7.6	Costa de Chiapas
1912 Dic 09	15.500	93.00	S	7.0	7.0	Costa de Chiapas
1914 Mar 30	17.00	92.00	150	7.2	-	Chiapas
1925 Dic 10	15.50	92.50	S	7.0	7.0	Chiapas
1935 Dic 14	14.75	92.50	S	7.3	7.2	Costa de Chiapas
1944 Jun 28	15.00	92.50	S	7.1	7.1	Chiapas
1970 Abr 29	14.463	92.683	44	7.3	7.1	Costa de Chiapas
1993 Sep 10	14.800	92.687	34	7.2	7.2	Costa de Chiapas
1995 Oct 21	16.811	93.474	160	7.1	6.5	Chiapas

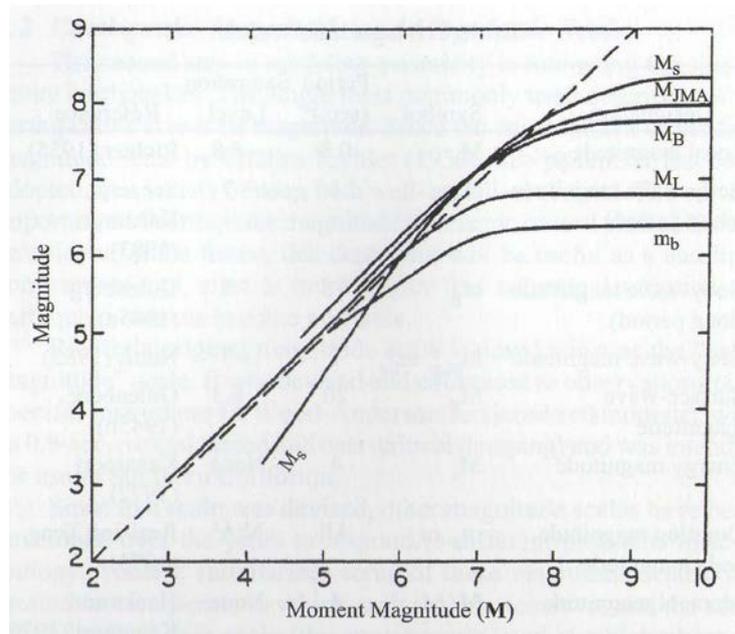


Figura 8. Comparación de escalas de magnitud sísmica (McGuire, 2004).

3. Análisis estadístico de la sismicidad en Tuxtla Gutiérrez

Aunque los inicios del Servicio Sismológico Nacional (SSN) se remontan a las primeras décadas del siglo XX, la información registrada por instrumentos más modernos abarca un periodo de tiempo de 36 años y sólo en los últimos 5 años se tiene un mayor número de equipos con mayor precisión en la red sísmica del estado. Es por ello que los registros del SSN son óptimos a partir de los últimos cinco años y los datos de los últimos 36 años se tomaron únicamente para un análisis meramente estadístico y con alta incertidumbre. Los datos analizados permiten conocer una tendencia general y sin dudarlo son una fuente importante de estudio de la sismicidad en el estado.

Mediante la información del SSN se ubicaron 4,943 eventos sísmicos registrados en el periodo de enero de 1974 a septiembre del 2010, en el área comprendida entre los 90°30' a 94°00' longitud oeste y los 14°00' a 18°00' latitud norte. Con los valores de magnitud de los sismos se aplicó el método matemático del inverso de la distancia ponderada, un modelo determinístico de interpolación que permite generar mapas bajo el supuesto de predicción establecido a partir de zonas próximas a cada registro puntual bajo un principio de proporcionalidad, la fórmula utilizada fue la ecuación 1:

$$IDW_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} M_i / d_{ij}^2}{\sum_{i=1}^{12} 1 / d_{ij}^2} \quad (1)$$

Donde, IDW_j , es el valor de magnitud estimado para cada punto en el estado, generado a partir de los 12 registros más cercanos al punto de predicción, considerando que la magnitud disminuye como una función inversa del cuadrado de la distancia (figura 9, González, *et al.*, 2011c).

En la figura 10 se hace un acercamiento del mapa de conglomerados de sismos superficiales (menores a 30 km de profundidad) y se observa que en el municipio de Tuxtla Gutiérrez se han presentado sismos de magnitud entre 4.5 y 5.5 ubicados dentro de la mancha urbana, los cuales, no obstante que su magnitud es moderada, por su poca profundidad (actividad cortical por fallas superficiales), pueden generar daños.

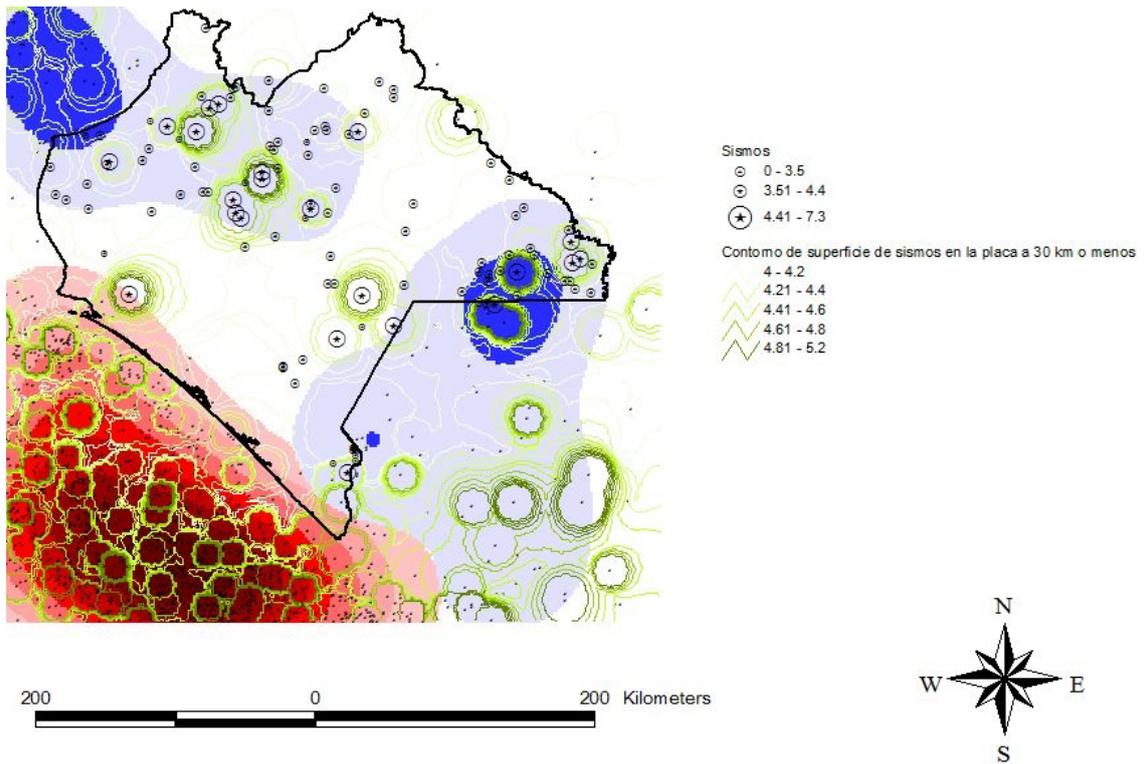


Figura 9. a) Agrupaciones sísmicas en Chiapas considerando datos del SSN de 1974 a 2010 (González, *et al.*, 2011c).

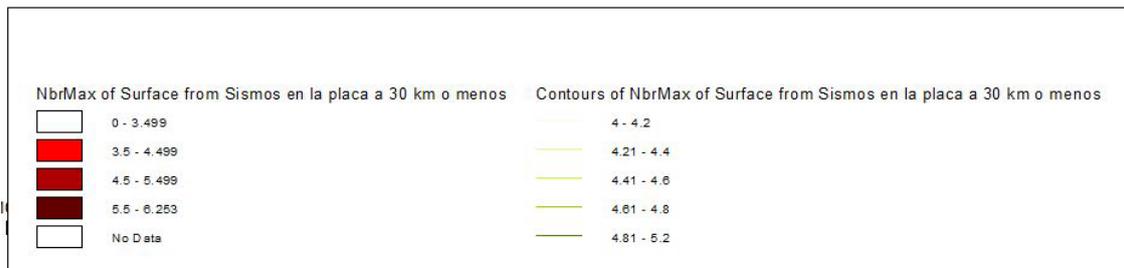
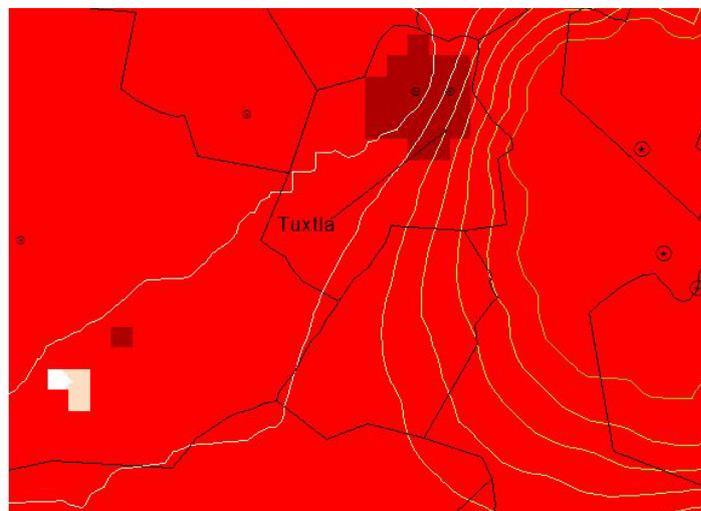


Figura 10. Agrupaciones sísmicas en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, con datos del SSN de 1974 a 2010 (González *et al.*, 2011b).

La figura 11 muestra la tasa de retorno de sismos en el estado de Chiapas considerando todas las fuentes sismo-génicas y las magnitudes de sismos importantes a partir de 6.5. Los datos corresponden a los cuadros de los anexos 1 y 2, donde se emplearon diversas fuentes documentales. Analizando la figura 12 observamos que para sismos con magnitud igual o mayor de 6.5, pero menor a 7.0, el periodo de retorno es de 4 años, para sismos de magnitud igual o mayor a 7 y menores a 7.5 la tasa de retorno es de 11 años y para sismos con magnitud igual o mayor de 7.5 es de 55 años.

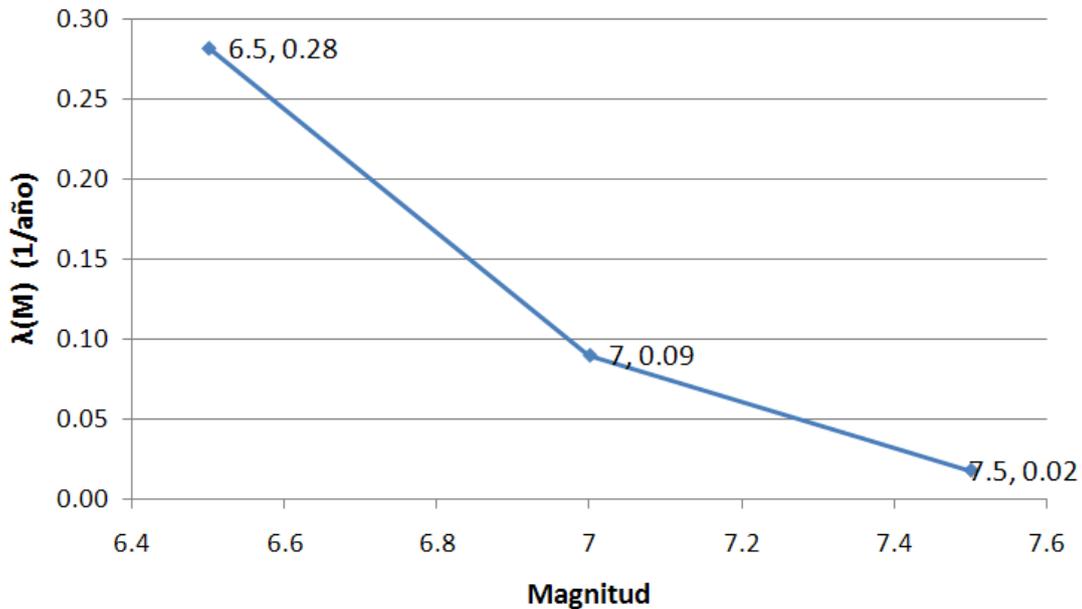


Figura 11. Tiempo de retorno de sismos fuertes en el estado de Chiapas.

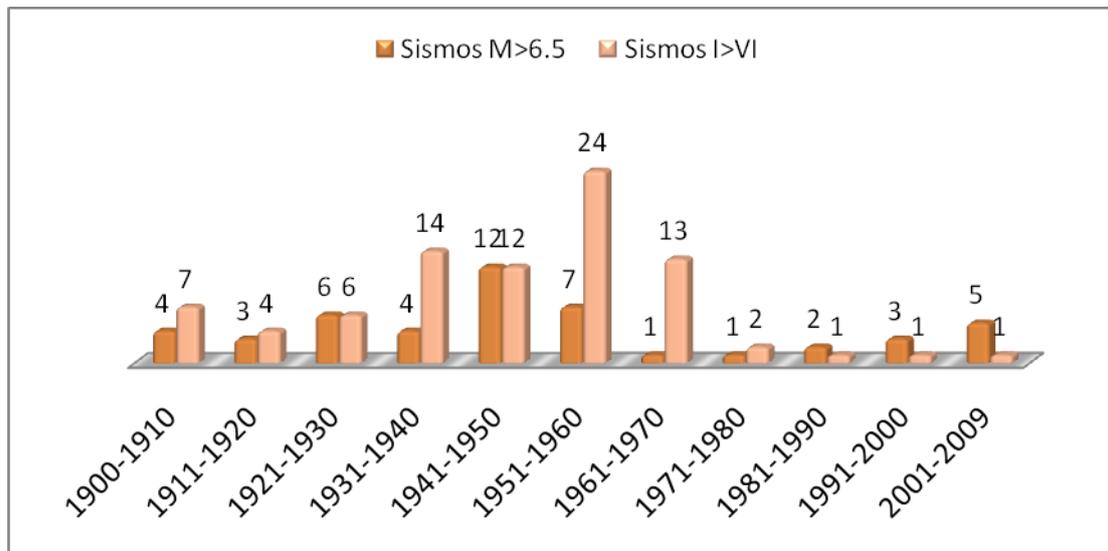


Figura 12. Histogramas conteniendo la frecuencia e intensidad de sismos moderados e intensos en el estado de Chiapas.

Analizando los cuadros de los anexos 1 y 2, obtenidos de distintas fuentes documentales, se observa (figura 12) que desde el año 1900 y hasta el año de 1970, la cantidad de sismos de magnitud igual o superior a 6.5, e intensidad

igual o superior a VI, eran abismalmente superiores a los presentados del año 1971 en adelante, lo cual no implica que la actividad sísmica haya cambiado en el estado, sino que actualmente hay equipos y personal con mayor calificación para determinar de manera más cercana a la realidad la frecuencia, magnitud y consecuencias de los sismos en la entidad.

González (2010) desarrolló un análisis estadístico probabilístico de los sismos en la región, empleando los datos del SSN del año 1974 a 2009, con lo que elaboró mapas de la región para los parámetros: frecuencia de sismos, energía liberada y profundidad media, respectivamente, los cuales se muestran en las figuras 13, 14 y 15.

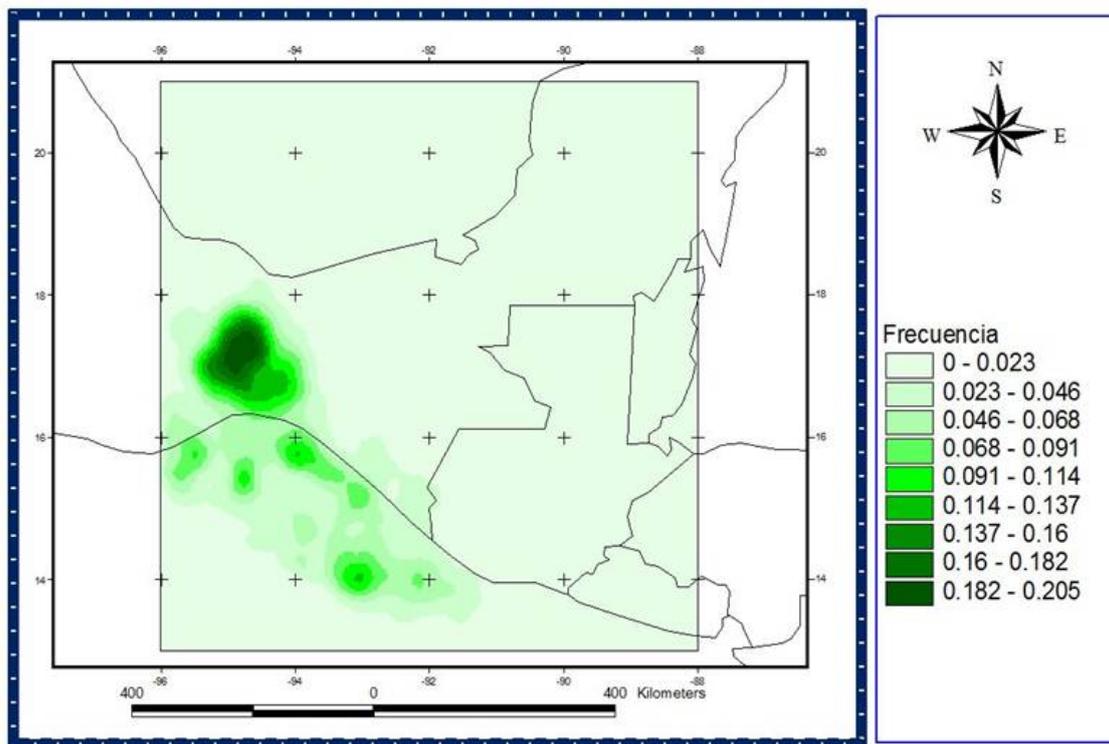


Figura 13. Frecuencia de los sismos en la región considerando datos del SSN 1974 a 2009 (González, 2010).

El mapa de la figura 13 muestra que la frecuencia sísmica es muy importante en la zona del Istmo de Tehuantepec y a lo largo de la zona de subducción. Respecto a los niveles de energía liberada (figura 14), las zonas más críticas se encuentran en el Istmo y en la frontera del Soconusco con Guatemala. La profundidad de los sismos, que se exhibe en la figura 15, muestra la zona de subducción con una inclinación de más de 45° en algunas zonas, permite la generación de sismos con profundidades intermedias y profundas.

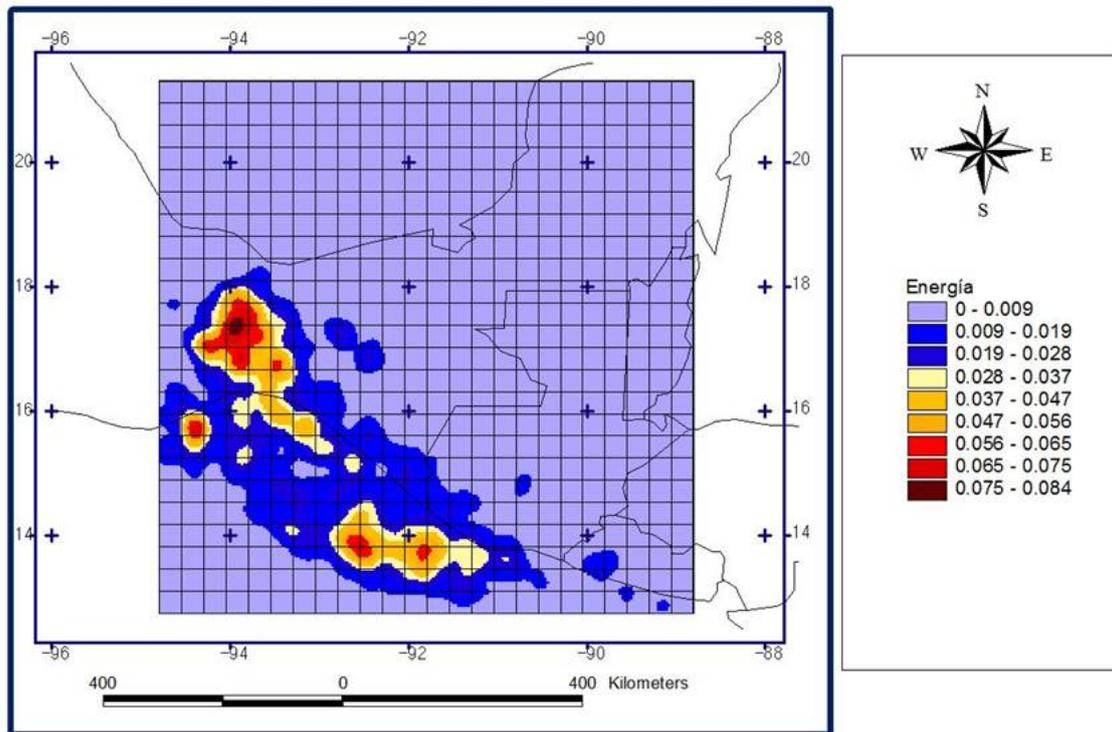


Figura 14. Energía liberada de los sismos en la región considerando datos del SSN 1974 a 2009 (González, 2010).

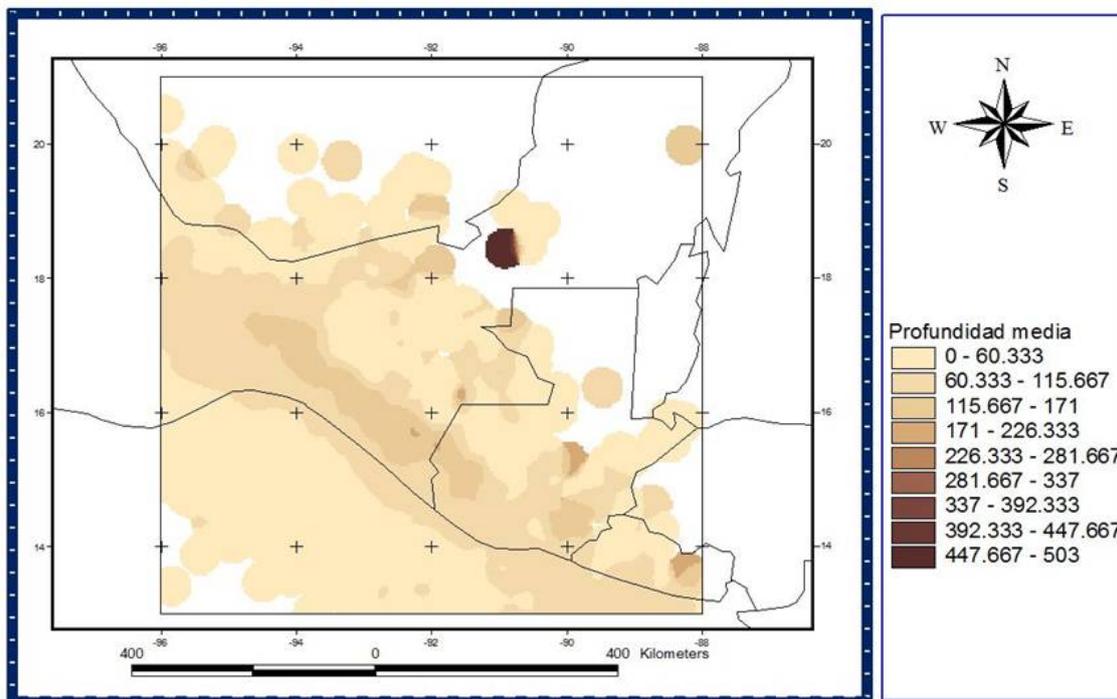


Figura 15. Profundidad media de los sismos en la región considerando datos del SSN 1974 a 2009 (González, 2010).

En las figuras 13 y 14 se mostró la importancia del análisis de la sismicidad de la frontera Chiapas-Oaxaca en la zona del Istmo de Tehuantepec, así como la sismicidad de la frontera del Soconusco con Guatemala. Mientras que a través

del estudio de la información de la figura 15, se pueden identificar algunos de los mecanismos que caracterizan a la generación de los sismos en el estado, observándose la zona de subducción y la zona cortical a la que corresponde la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Al analizar la frecuencia temporal de eventos por año y por mes en el periodo 1974-2010, observamos que en ciertos años, hay aparentemente más sismos (figuras 16).

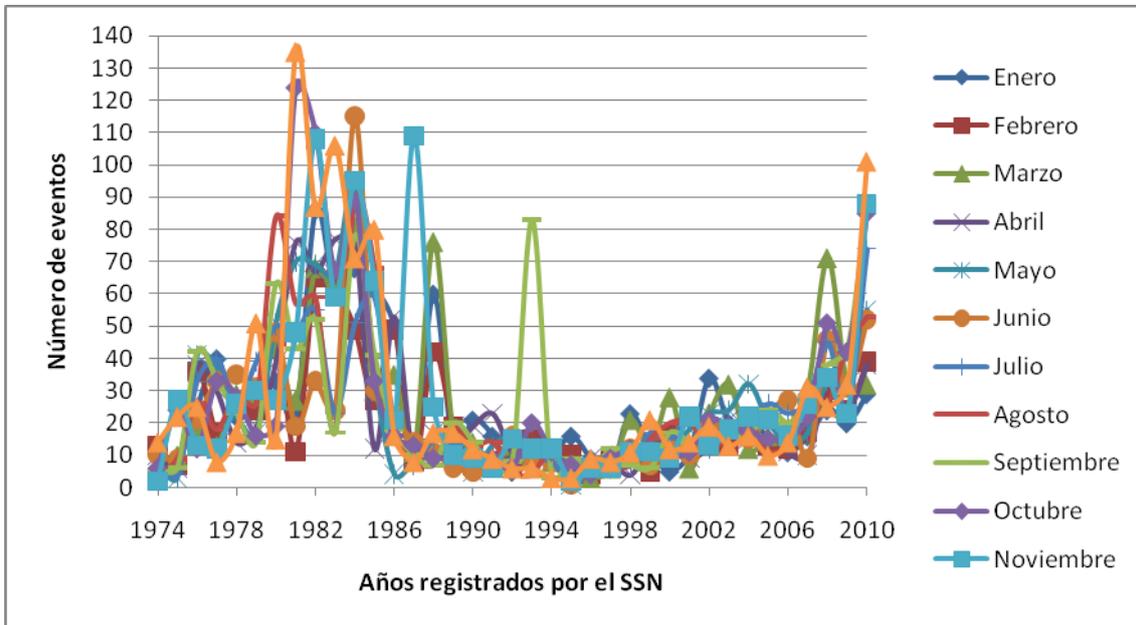


Figura 16. Análisis mensual de los sismos que se presentan en el área de influencia del estado de Chiapas considerando los datos del SSN desde 1974 hasta 2010.

Éstos se asocian a fenómenos como la construcción de las presas (la presión de poro) en la década de los setenta y parte de los ochenta, y del 2006 en adelante por el incremento de equipos (densidad de la red del SSN) y la sensibilidad de los mismos, los cuales son capaces de registrar sismos de menor magnitud.

En la figura 17, se muestra un histograma conteniendo las magnitudes de los eventos sísmicos generados en el área de influencia del estado de Chiapas (entre los meridianos 88 y 96 de longitud oeste y los paralelos 13 y 21 de latitud norte). Normalmente el número de eventos aumenta cuando la magnitud disminuye. Sin embargo, en este histograma el número de eventos disminuye cuando la magnitud disminuye, para magnitudes menores de 4. Esto se debe a la dificultad que se tenía por la sensibilidad de los equipos de SSN en Chiapas de monitorear sismos de magnitudes menores a 3.5. Actualmente la densidad y sensibilidad de los equipos permite captar sismos con magnitud hasta 2.0.

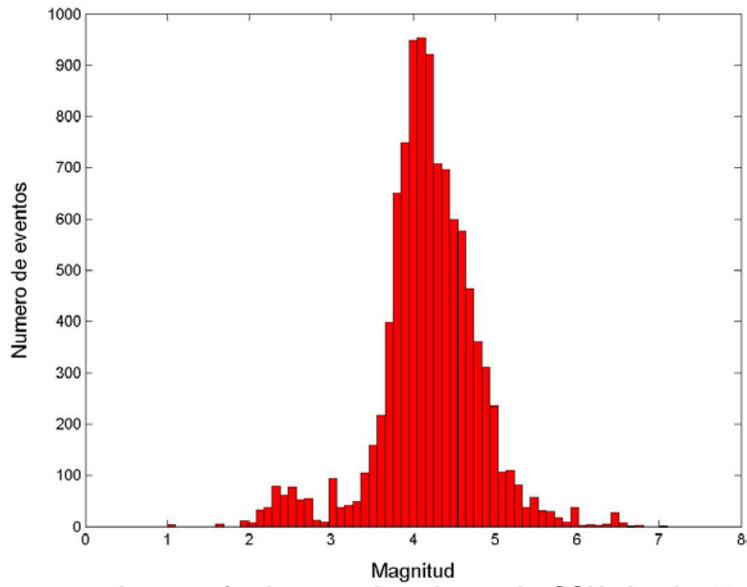


Figura 17. Histograma de magnitudes con los datos de SSN desde 1974 y hasta 2009 (González, 2010).

3.1. Fisiografía de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Al ubicarse en la parte centro–noroeste del estado de Chiapas, y de acuerdo a la clasificación fisiográfica elaborada por F. Mullerried (1957), el municipio de Tuxtla Gutiérrez se localiza en la “Depresión de Chiapas”, la cual está compuesta por una serie de depresiones amplias de fondo plano a ondulado que son interrumpidas por montañas, lomeríos y colinas.

Mediante un análisis orográfico, hoy se conoce que el relieve del territorio municipal es heterogéneo, debido a la presencia de valles, los cuales están rodeados por otros tipos de relieve como son: a) colinas, b) lomeríos y c) montañas.

De acuerdo con lo anterior, las elevaciones de mayor altitud (hasta 1,300 m) se localizan en la parte noreste, dentro del Parque Nacional Cañón del Sumidero; sin embargo, éstas no son las únicas, ya que existen otras de menor altitud (hasta 1,000 m) como la Loma del Taraí y el Cerro Tapongozoc, que se localizan al norte y noroeste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Contrastando con la orografía antes descrita, en la parte centro y suroeste del municipio se localizan los valles de Tuxtla y Suchiapa, los cuales destacan por ser las tierras más bajas, pues poseen un rango de altitud calculado entre los 400 y 600 m. Este tipo de orografía presenta poca pendiente con un fondo plano a ondulado.

Por último, en la zona sur y suroeste del valle se encuentra la Meseta de Copoya, la cual es una montaña que presenta una geometría considerada como plana a ondulada en sus partes altas; sin embargo, en el extremo oeste sobresale una elevación de 1,000 m de altitud conocida como “El Cerro Mactumatzá” (figura 18).

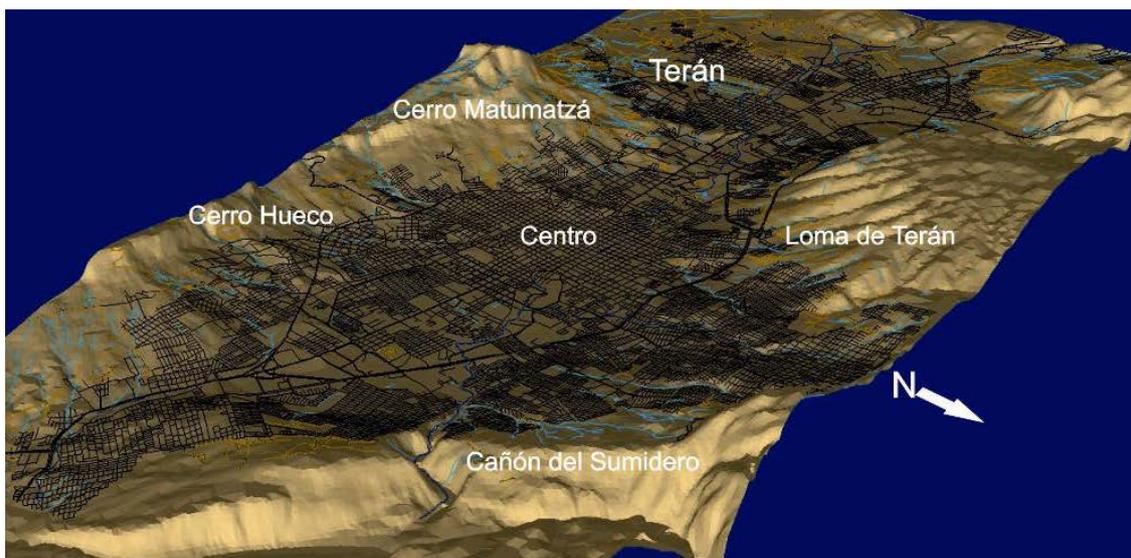


Figura 18. Modelo de elevación digital de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

3.2. Geomorfología

Lugo (1988) y Priego, *et al.* (2008) reconocieron las siguientes geoformas: I) Montañas, II) Lomeríos, III) Piedemonte y IV) Valle. Sin embargo, aún no se termina de caracterizar con mayor detalle la zona urbana y suburbana logrando reconocer las unidades inferiores como son: a) Cimas, b) Laderas, c) Cornisa, d) Dolina, e) Colinas, f) Valle tectónico, g) Valle intermontano y h) Lecho de inundación superior e inferior.

Las montañas y lomeríos considerados como unidades superiores, junto con sus cimas y dolinas (unidades inferiores), están compuestos por roca caliza y dolomías. Estas presentan un fenómeno de erosión tipo kárstico, el cual se manifiesta como un proceso de disolución de los materiales calcáreos. Este relieve provoca una densidad de cauces de mediana a muy baja (< a 4,781 m/km²), las pendientes por su parte describen terrenos moderadamente inclinados (< a 15°) a planos horizontales.

Los suelos son de tipo expansivos Vertisol pélico y Rendzina, los cuales están alternados por suelos someros como el Litosol, sobre todo en aquellos terrenos en donde la pendiente es mayor a los 10°. Ante la estructura antes señalada y los procesos que se tienen en este tipo de relieve, los peligros geológicos y geomorfológicos más probables para este tipo de ambiente es disolución kárstica (Lugo, 1988; Priego, *et al* 2008).

En la zona de estudio se reconoce una génesis del relieve de tipo fluvial, la cual contempla unidades superiores como las colinas, el pie de monte y los valles. Los valles son la parte más baja de la zona de estudio, este tipo de relieve está constituido por materiales blandos no consolidados conocidos como depósitos aluviales poligenéticos. Estos se formaron por los diferentes materiales que fueron arrastrados por los diversos cauces de los ríos que bajan de las montañas hacia el valle.

Con base en las condiciones abióticas (litología, geomorfología y climáticas), así como bióticas (tipos de vegetación) que se encuentran en el lugar, originan el establecimiento de suelos de tipo profundo y expansivos como es el Vertisol Pélico y Fluvisol, los cuales están sujetos a fenómenos de inundación de tipo ordinario como extraordinario (Lugo, 1988, Priego, *et al.* 2008), además de asentamientos diferenciales y daños a las construcciones mal desplantadas, así como amplificación de las señales sísmicas (efecto de sitio).

3.2.1. Las cuatro grandes laderas

Revisando la cartografía y considerando elementos como la diferente constitución litológica y el cambio en la pendiente, se determinan cuatro grandes laderas sobre las cuales se extiende la ciudad y se identifican las colonias establecidas (Paz *et al*, 2011).

1. Mesa Nido de Águilas (Loma Larga). Situada al oriente, fue poblada gradualmente a partir de 1989 en su ladera poniente, por la expansión de la colonia Patria Nueva. La porción oriental alojó en algún momento el basurero

municipal de la ciudad, mismo que fue cerrado ante las presiones de los pobladores de asentamientos contiguos, correspondientes al municipio de Chiapa de Corzo. La parte superior aloja el fraccionamiento “Vida Mejor”, actualmente en ampliación. Se constituye principalmente de capas de roca caliza, mismas que corresponden a la formación (fm) geológica La Angostura, muy cercana a la zona de contacto con la fm Soyaló (Membrillo, 2006). Presenta una dirección noroeste-sureste en su eje mayor, que alcanza los 4.5 km. Hacia el norte se interrumpe por el pequeño cañón que forma el río Sabinal (único escurrimiento) antes de desembocar en el Grijalva. Hacia el sur su pendiente decrece gradualmente de 700 hasta alcanzar los 540 msnm. Al igual que la ladera norte, parte se encuentra dentro del Parque Nacional Cañón del Sumidero.

2. Domo. De la misma naturaleza litológica que la anterior, se caracteriza por innumerables capas sólidas y casi horizontales de roca caliza de color gris o crema, rasgo distintivo de la formación La Angostura, que se aprecian muy bien en el corte carretero que da paso al libramiento norte a la altura del mirador “Los Amorosos”. Identificado como “Loma verde” en la carta topográfica, se localiza al noroeste, y presenta una forma cómica, siendo una prolongación de la Meseta de las Ánimas, que corresponde con la margen izquierda del Cañón del Sumidero. La diferencia de alturas va de los 600 a los 980 msnm. Sobre esta geoforma, sus laderas orientadas hacia el este han sido ocupadas por gran cantidad de colonias, lo que muestra una tendencia de crecimiento en los últimos años; por otra parte, es conveniente mencionar que sobre esta misma, en la porción sur, se encuentran la UNICACH, Caleras Maciel y la planta de PROACTIVA. Por su forma cómica presenta un evidente patrón de escurrimiento de tipo radial centrífugo, cuyos ríos provienen de la parte alta y sus corrientes han labrado profundos cauces. La presencia de roca carbonatada, suficiente agua en temporada lluviosa y bióxido de carbono producto de la actividad biológica (Fernández, 1999), son los elementos y condiciones propicios para el desarrollo de cavernas, la mayoría de las cuales se encuentran en las varias cañadas que corresponden a los cauces de los ríos. Tiene una dimensión de 5.4 km en su eje este-oeste. A partir del libramiento norte hacia las partes altas, conserva relictos de una cubierta vegetal de selva baja caducifolia (INEGI, 2006), aunque presenta áreas sumamente deforestadas principalmente por la extracción de calcita (CaCO_3) para fabricación de cal; no así por debajo de esta vía, en donde se han establecido zonas residenciales (Malibú, Monte Real, Villas Tzisco) y de interés social (El Calichal).

3. Ladera norte. Es la más densamente poblada, y hacia donde se ha dirigido la tendencia al crecimiento, al igual que la sur, debido a un precio más accesible en el valor del suelo, en comparación con las zonas oriente y poniente (H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, 1988). Su pendiente es gradual y va de los 2° a los 7°. Las altitudes van de los 540 a los 740 msnm. Su parte más septentrional queda inmersa en la poligonal del Parque Nacional Cañón del Sumidero. Su forma es de abanico que se abre hacia el sur, teniendo un eje norte-sur de 3.6 km. Presenta una base mayor de 5 km y en la parte más angosta registra 1.4 km, limitada en su parte alta por los contrafuertes montañosos que evidencian la presencia de una falla geológica normal. Su

naturaleza geológica es la misma que la anterior. El relieve es irregular y se caracteriza por gran cantidad de barrancas y lomeríos. El río principal es el Potinaspak que desciende de la parte alta de la meseta de las Ánimas. Los asentamientos ubicados en la parte noreste de esta zona se están extendiendo hacia esa misma dirección y han comenzado a ocuparla, como se puede ver en el mapa de crecimiento histórico, otra ladera de características semejantes a la Mesa Nido de Águilas.

4. Ladera sur. Esta ladera presenta un aspecto semejante a la ladera norte, pero con una pendiente suave que aumenta gradualmente y una geología y morfología distintas. Corresponde a depósitos de talud (también llamados coluviones, es decir depósitos por gravedad), generados por desprendimiento y transporte en la parte alta de la Meseta de Copoya, sus pendientes van de entre 10° y 15°, hasta 70° en la zona de los circos de erosión. Su naturaleza y comportamiento, a diferencia de las tres anteriores, son complejos. Para su comprensión es necesario describir la composición litoestratigráfica de la Meseta de Copoya, que es de donde proviene el material acumulado en la ladera. De acuerdo con Membrillo (2006) se trata de capas casi horizontales de rocas sedimentarias formadas en ambientes marinos someros. Prueba de ello son la cantidad de fósiles observados durante los recorridos. Se menciona también que la parte superior conformada por una capa de 20 a 100 m de espesor de calizas y areniscas se formó en ambientes de baja energía cercanos a depósitos litorales (dato obtenido del perfil geológico incluido en el estudio geohidrológico). Esto se deduce al observar en el cerro Mactumamatzá depósitos rojizos y gran cantidad de cantos rodados de cuarzo lechoso (es común que se llame Mactumatzá; sin embargo, Don Antonio Escobar, habitante de Copoya quien se ha dado a la tarea de realizar registros de palabras zoques, propone Mactuman Matzá, que significa Cerro de las once estrellas). . La formación a la que pertenece se discute, siendo San Juan para algunos y Lumut para otros. La Meseta de Copoya está siendo reducida, porque el continuo fallamiento marginal rompe bloques que forman un talud de pendiente moderada, que se extiende desde los recientes riscos verticales hasta el fondo de la depresión que rodea a la misma (Membrillo, 2006). Esto debe ser analizado y relacionado también con el carsismo que genera el desarrollo de cuevas, algunas con acceso superficial y otras que forman parte de un sistema subterráneo inaccesible.

3.3. Características geológicas del estado de Chiapas

El marco geológico del estado de Chiapas es complejo, ya que en él se encuentran expuestas rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas que cubren un rango de edad desde el Paleozoico hasta el reciente. Ortega *et al*, (1991) dividen al estado de Chiapas en seis provincias geológicas.

En la figura 19 se muestran dichas provincias geológicas y se describen a continuación:

- Cuenca Deltaica de Tabasco: ocupa principalmente el extremo noroccidental del estado.
- Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas: constituye la provincia geológica más extendida en la entidad, ocupando prácticamente un 70% de la superficie estatal.
- Batolito de Chiapas: comprende una franja de rocas plutónicas alineada en dirección NW-SE, constituye una cadena montañosa que se levanta de manera paralela a la costa.
- Macizo Ígneo del Soconusco: provincia en la cual se incluye el entorno geológico del volcán Tacaná y las rocas volcánicas asociadas.
- Cuenca de Tehuantepec: en ella se incluyen depósitos sedimentarios recientes localizados en la zona costera de la entidad.
- La Provincia Cuicateca: en su mayoría se encuentra expuesta en el estado de Oaxaca, está constituida por un cinturón de rocas de afinidad vulcano-sedimentaria epimetamórfica que se localizan en la parte occidental del estado.

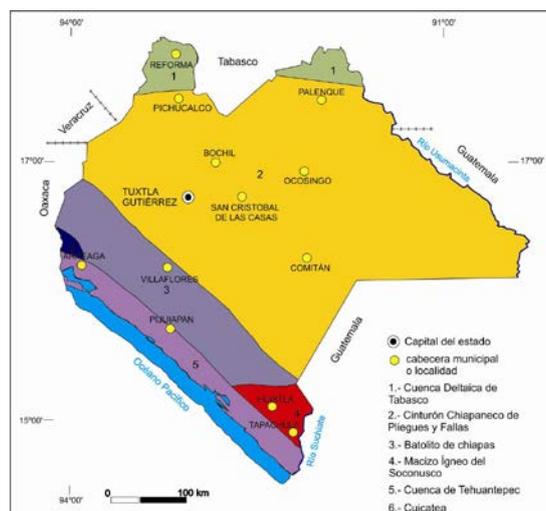


Figura 19. Mapa geológico del estado de Chiapas. (Modificado de Castro-Mora *et al.*, 1999).

El Macizo de Chiapas es la unidad que constituye el basamento del estado y está compuesto por granitos, dioritas y gneis cuarzo-feldespáticos de edad pérmica (Castro-Mora *et al.*, 1999). Sobre estas rocas se encuentran otras del Paleozoico superior representadas por una serie detrítica perteneciente a las formaciones Paso Hondo, Vainilla y Grupera, así como por rocas metamórficas que incluyen serpentinitas, esquistos, gneises y cuarcitas. Tales rocas se encuentran afectadas por intrusiones ígneas que varían de rocas básicas (gabros) a rocas ácidas (granitos). Todas ellas pertenecen al Batolito de Chiapas, cuyas edades isotópicas son únicamente en el Pérmico (isócronas de Rb-Sr; Damon en Salas, 1975). Estas rocas constituyen lo que geográficamente se denomina como macizo granítico de Chiapas y afloran principalmente en el sector meridional de la entidad.

Cubriendo de manera discordante a las rocas del basamento, se tiene el conjunto de rocas mesozoicas marinas que van del Triásico-Jurásico al Cretácico Superior. Esta secuencia de rocas ha sido agrupada en las formaciones Todos Santos, Mogoñé, San Ricardo, Chinameca, Grupo Sierra Madre, Ocozocoautla y Méndez, las cuales afloran principalmente en la porción centro septentrional de la entidad. Constituyen zonas montañosas muy abruptas de anticlinorios y sinclinorios cuyos ejes axiales están orientados en dirección NW-SE siguiendo el patrón de deformación de la provincia geológica de Pliegues y Fallas, fisiográficamente conocida como Sierra Madre Oriental, (Castro-Mora *et al.*, 1999).

Sobre la secuencia de rocas mesozoicas descansa concordantemente un paquete de rocas cenozoicas cuyo rango de depósito abarca del Paleoceno (Formación Soyaló) al Plioceno (Formación Tres Puentes). Las rocas de la Formación Soyaló son de origen marino y constituyen depósitos rítmicos tipo flysh. Por su parte las rocas eocénicas son de naturaleza mixta (continental y marina), las cuales presentan capas rojas hacia el límite con el Oligoceno marino, cuyas rocas están representadas por calizas (Formación Macuspana) y rocas detríticas (Formación La Laja), (Castro-Mora *et al.*, 1999.).

Por su parte, las rocas del Mioceno son de origen marino y están conformadas por una serie arcillo-calcárea representadas, de base a la cima, por las formaciones Encanto, Amate inferior y superior, Tulijá y Belem, las cuales se encuentran mejor expuestas hacia la porción septentrional de la entidad.

Finalmente, durante el Plioceno-Holoceno se conformaron depósitos de limos, arenas, arcillas, así como depósitos piroclásticos derivados de las actividades volcánicas del Chichonal y del Tacaná, así como por materiales aluviales y suelos residuales (Castro-Mora *et al.*, 1999) (figura 20).

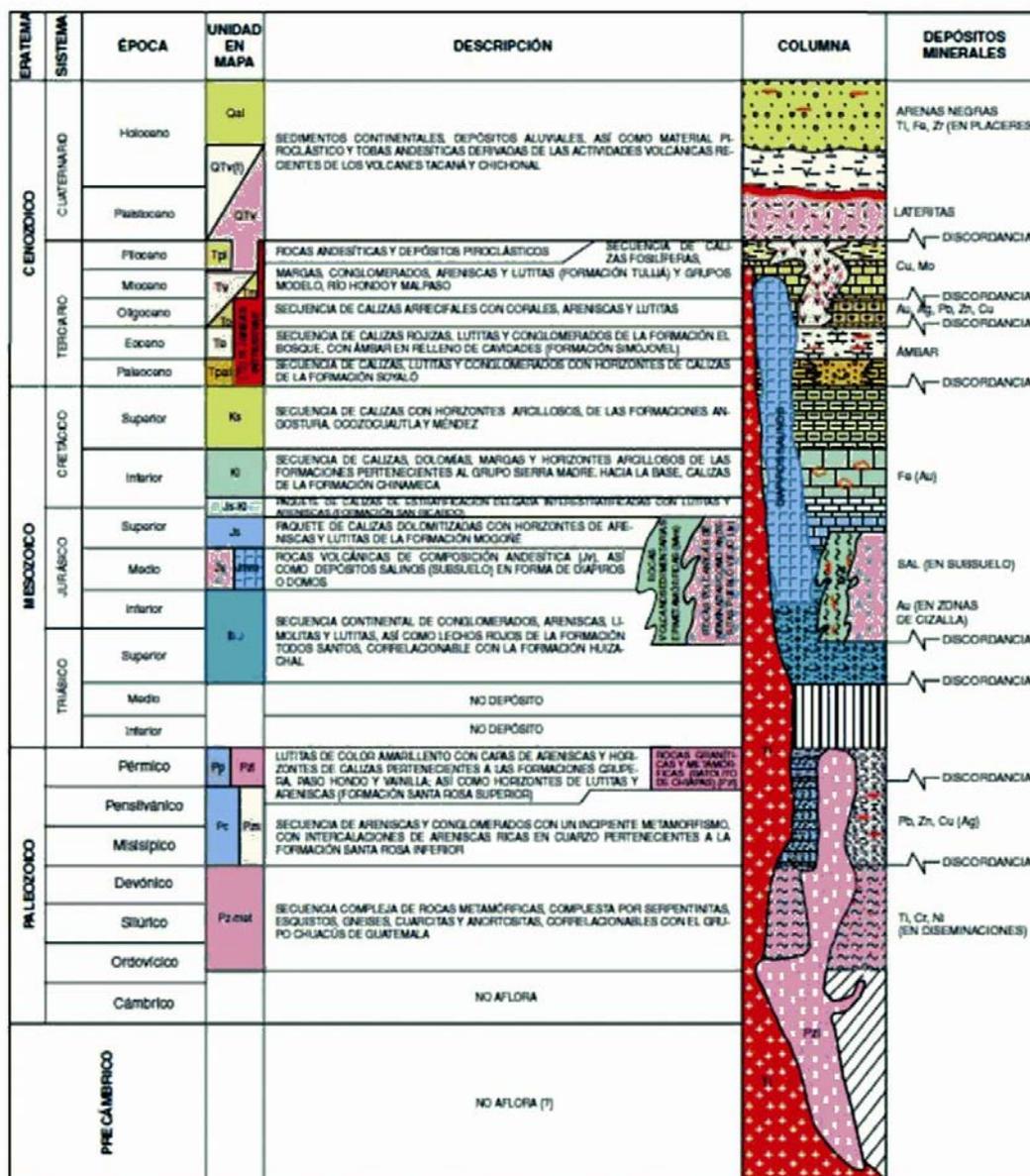


Figura 20. Columna litoestratigráfica del estado de Chiapas, (tomada de Castro-Mora et al, 1999).

3.2.2. Geología de Tuxtla Gutiérrez

El municipio de Tuxtla Gutiérrez, capital de estado, queda comprendida en un valle extenso en donde predominan los depósitos aluviales, provenientes de las diferentes vertientes de los ríos que fluyen desde las partes topográficamente altas.

Geológicamente se encuentra rodeada por una secuencia predominantemente sedimentaria, mayoritariamente calcárea de origen marino, las cuales se encuentran plegadas en una serie de sinclinales y anticlinales, así como fallas, producto de la actividad tectónica terciaria que se llevó a cabo en la región. Algunas de estas estructuras fueron descritas por De la Rosa (1994) y éstas se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Estructuras geológicas que se encuentran en la Subcuenca del río Sabinal (De la Rosa, 1989).

Provincias tectónicas	Plegamientos		Fallas
	Sinclinal	Anticlinal	
Sinclinal central	Sinclinal Grijalva Sinclinal Ocozocoautla Sinclinal Copoya	Anticlinal Copoya	
Fallas de transcurrencia	Sinclinal La Venta Sinclinal Malpaso Sinclinal Ixtapa Sinclinal Larráinzar Sinclinal Tenejapa Sinclinal Chanal Sinclinal Tenango	Anticlinal Ocozocoautla Anticlinal El Sumidero Anticlinal Mono Pelado Anticlinal Chenaló Anticlinal Canouc Anticlinal San Cristóbal Anticlinal Oxchuc Anticlinal Nazareth Anticlinal Comitán	Área Occidental Presa Malpaso a Ixtapa Falla Quintana Roo Falla La Venta Falla San Fernando Falla Malpaso Muñiz Falla Chicoasén Malpaso Falla Chacté, Ocosingo Área Oriental de Ixtapa a Ocosingo Falla Bajucú Falla Huitán Falla Oxchuc Falla Chacté, Ocosingo

De acuerdo con lo expresado por el Servicio Geológico Mexicano en la carta Geológica de la entidad (SGM, 2005), en el Municipio de Tuxtla Gutiérrez, se encuentran aflorando rocas de origen sedimentario y depósitos aluviales recientes, de manera muy general, se presentan a continuación las características principales, así como la ubicación y extensión de dichas unidades.

- Por una parte se encuentra la secuencia de carbonatos que está representada en su mayoría por calizas del Cretácico Superior, ubicadas principalmente en el noroeste, sur y sureste de la zona de estudio con un área estimada en 8,781 ha.
- Por otra parte la secuencia terrígena Terciaria (Paleógeno), comprendida en su mayoría por areniscas que se localizan principalmente en la parte norte, centro – oeste, centro – este y sureste del municipio, la cual ocupa un área estimada en 14,163 ha.
- De igual forma, dentro de la misma secuencia de las rocas conformadas por sedimentos de origen terrígeno, se encuentra una unidad de limonita, también de edad Terciaria Paleógeno, la cual se presenta principalmente en las laderas de la Meseta de Copoya con una extensión calculada en 5,257 ha.
- Así mismo, las lutitas correspondientes al Terciario Paleógeno se localizan en las laderas bajas de la misma Meseta, asociadas a la secuencia de limonita, ocupan un área de 1,705 ha.

- Por último, los depósitos aluviales de Cuaternario, como ya se mencionó, se localizan en las partes bajas de los valles y tienen un área estimada en 4,239 ha.

Para verificar lo expresado en la bibliografía consultada, estas unidades de roca fueron reconocidas en campo en distintas localidades en las inmediaciones de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

En la parte norte de la carretera Tuxtla Gutiérrez – San Fernando aflora parte de la secuencia estratificada de caliza del Cretácico Superior pertenecientes a la Formación Ocozocoautla, que en este sector muestra un rumbo preferencial de N33°E y un espesor promedio que varía entre 20 cm y estratos más gruesos de hasta 150 cm aproximadamente (figura 21). Además, se aprecian grandes bloques debido a que dicha unidad se observa muy fracturada (figura 22), asociada a una zona de falla con una dirección de 245°, rellena de calcita secundaria (figura 23).



Figura 21. Fotografía izquierda, se aprecia la disposición de bloques de roca caliza. Tramo Tuxtla – San Fernando. Fotografía derecha, se muestran bloques de caliza asociados a fracturamiento debido a fallamiento.



Figura 22. Fotografía izquierda, muestra la disposición estratificada del afloramiento. Fotografía derecha, conformación de los estratos y ubicación de la falla.

En el sector NW del libramiento norte, se observa una secuencia estratificada e intercalada de conglomerados, lutitas y calizas correspondientes a la Fm

Soyaló del Paleoceno. La facie conglomerática se compone de fragmentos de roca que van del tamaño de las arenas finas hasta las gravas (figura 23). Los estratos de lutitas y calizas son de color beige a ocre, cuyo espesor aproximado es de entre los 10 y los 40 cm, esta unidad se encuentra dispuesta con una inclinación de 26° y un rumbo de 181° (figura 23).



Figura 23. Fotografía izquierda, vista cercana del tamaño del grano del afloramiento. Fotografía derecha, estratos inclinados pertenecientes a la Fm Soyaló.

En el sector SW de la ciudad, en la zona del relleno sanitario de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, nuevamente se encuentra la secuencia estratificada de calizas de la Fm Ocozocoautla, que se encuentra afectada por una falla con orientación de 165° e inclinación de 87° hacia el S (figura 24), dicha falla ha producido deformación en la estratificación dispuesta en este punto, provocando que en los estratos de un lado de la falla tengan orientación E-W y en la otra sea contraria, causando fuerte fracturamiento en bloques angulosos (figura 24). En otra de las secciones de este mismo afloramiento, las rocas se encuentran dispuestas con un rumbo de 95° e inclinación de 31° al S, en la última sección del afloramiento el rumbo es de 10° y la inclinación de 13° . Así mismo en esta misma zona se encuentran aflorando calizas estratificadas con diversas tonalidades de color gris y abundante presencia de fósiles marinos muy consolidada y con presencia de algunas fracturas correspondiente a la Fm Sierra Madre (figura 24).





Figura 24. Fotografía superior izquierda, disposición estratificada del afloramiento en zona de falla. Fotografía superior derecha, forma angulosa de los bloques expuestos. Fotografía inferior izquierda, disposición estratificada del afloramiento y se observa la presencia de fósiles. Fotografía inferior derecha, calizas de la Fm Sierra Madre, estratificada y con fracturamiento intraformacional.

Por otra parte, en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, en la zona NE de altos topográficos de Tuxtla Gutiérrez, se encuentra nuevamente aflorando una secuencia calcárea de la Formación Angostura, que en esta zona aparece dispuesta de forma estratificada con rumbo de 155° e inclinación al SE en paredes verticales (figura 25). En general, presentan tonalidades desde el blanco hasta el gris, con abundante presencia de fósiles de amonites y gasterópodos. Los espesores de los estratos son muy variados, desde aproximadamente 20 cm hasta 180 cm (figura 25).



Figura 25. Fotografía izquierda, disposición estratificada del afloramiento de calizas de la Fm Angostura. Fotografía derecha, calizas con presencia de fósiles de la Fm Angostura.

En esta sección, conforme se desciende topográficamente los estratos cambian su disposición con una inclinación de 20° NE y rumbo de 296° ; en las zonas topográficamente más bajas esta secuencia calcárea se encuentra en contacto con calizas de la Fm Ocozocoautla, en donde en general se presenta con textura de grano fino, con menor proporción de presencia de fósiles (figura 26). En la zona del valle los estratos presentan una inclinación de 75° SE y un rumbo de 300° (figura 26). El contacto entre estas unidades es de carácter

estructural y está determinado por una falla lateral de componente izquierda, de dimensiones regionales conocida como Falla Tuxtla.



Figura 26. Fotografía izquierda, disposición estratificada de calizas de la Fm Ocozocoautla. Fotografía derecha, disposición estratificada semi vertical de calizas de la Fm Ocozocoautla.

Hacia el extremo sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez afloran las unidades más recientes conformadas en una secuencia sedimentaria de areniscas y lutitas indiferenciadas del Eoceno, formando parte de la estructura conocida como Sinclinal de Copoya; en el núcleo de esta misma estructura, geográficamente localizadas en la zona de la Meseta de Copoya, se encuentra una unidad de calizas parcialmente dolomitizadas, también de edad eocénica, de la Fm Lomut (SGM, 2005).

La zona urbana se encuentra dispuesta predominantemente, sobre depósitos aluviales cuaternarios, que rellenaron el valle central de esta región del estado.

La distribución espacial de las unidades geológicas antes mencionadas, así como sus características estructurales y la disposición que guardan entre sí, se aprecian en el mapa geológico anexo (figura 27).

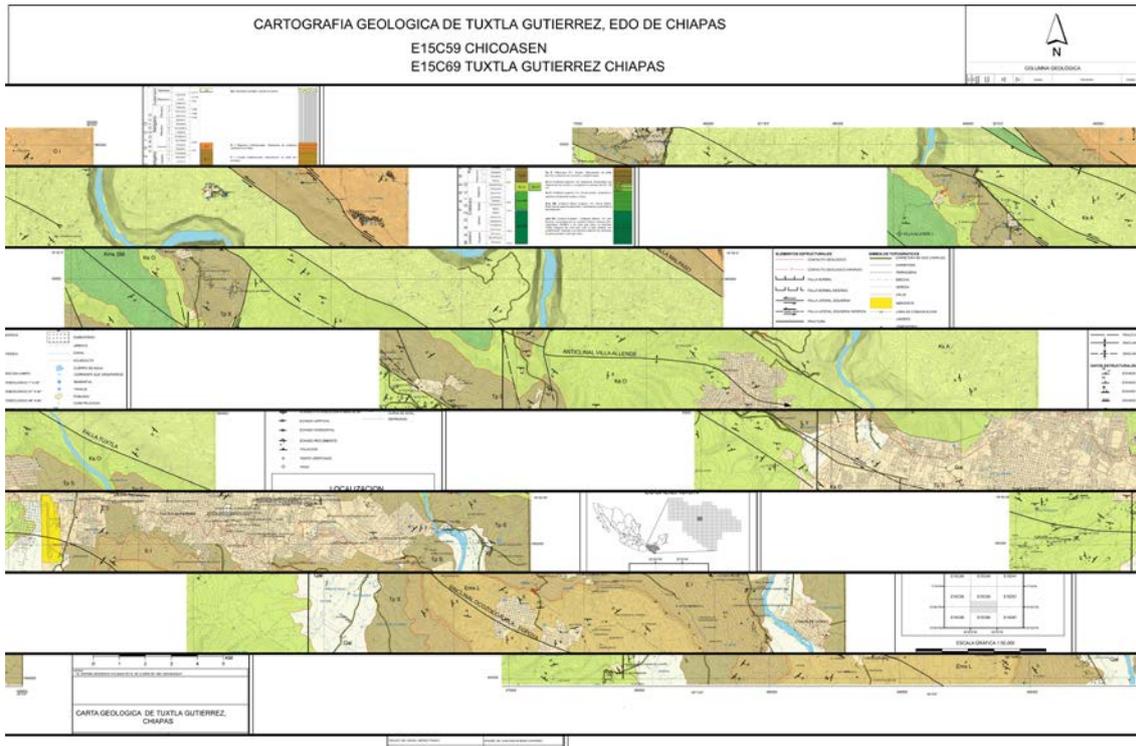
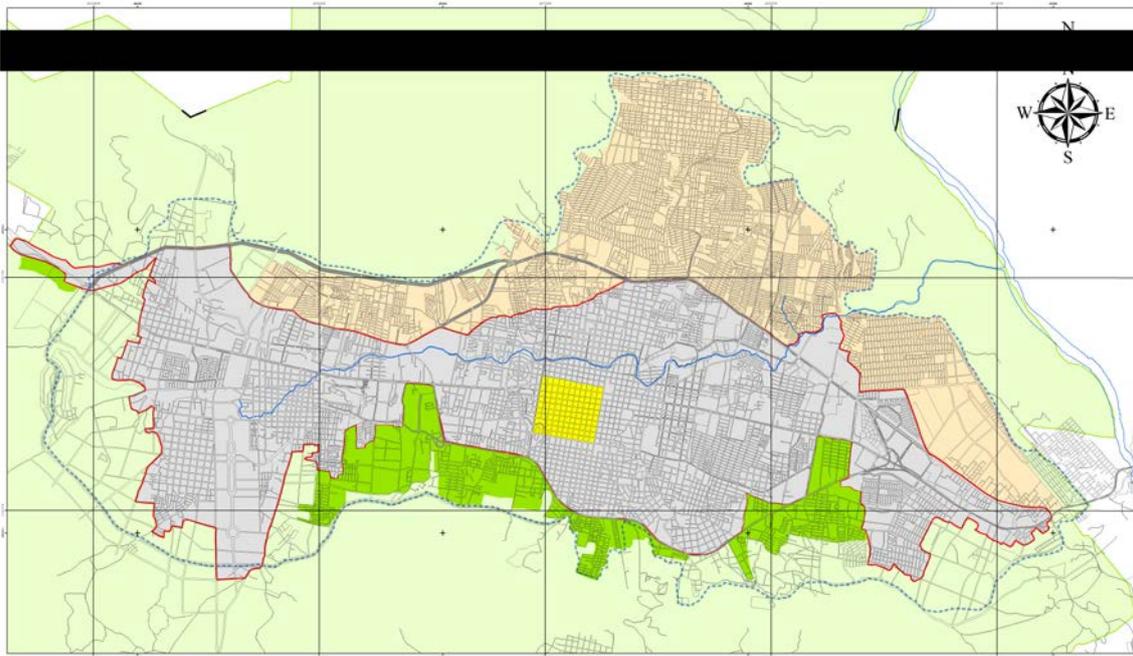


Figura 27. Mapa con la cartografía geológica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

3.2.3. Características geotécnicas en Tuxtla Gutiérrez

En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se han desarrollado estudios geotécnicos a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Espinosa (1976) consideró que la ciudad tenía dos tipos de suelos (materiales limosos y arenas, de buena capacidad y otra de depósitos aluviales con problemas de expansividad). Posteriormente, Ordóñez (1994 y 2008) hace notar que existen estratos plásticos saturados de hasta 10 m de profundidad en la zona de la cuenca del río Sabinal, y divide a la ciudad en cuatro zonas (figura 28).

- Zona A'. Primer cuadro de la ciudad, (limos y arcillas de color café claro, no expansivo), zona III MOC-CFE-1993.
- Zona A. Resto del valle, arcillas de color gris oscuro a café claro, suelos expansivos, zona III MOC-CFE-1993.
- Zona B. Ladera sur, lutitas, zona II MOC-CFE-1993.
- Zona C. Ladera norte, caliche y roca caliza, zona I, MOC-CFE-1993.



Zona A: Centro Histórico.
Propiedades índice y de resistencia de los suelos de la zona A: Centro Histórico.

u	G _u	W _L	W _p	PI	F	S	G	γ _m	e _s	C _c	q _u	φ _v	P _c	P ₀		
%	%	%	%	%	%	%	Mg/m ³				kPa	°	kPa	kPa		
15-	65-	25-	23-	13-	22-	85-	5-	0-	1.7-	0.3-	0.07-	0.15-	90-	14-	130-	20-
24	80	3.7	55	22	30	100	15	1.95	0.9	0.005	0.27	750	18°	750	130	130

Zona B: Ladera Sur.
Propiedades índice y de resistencia de los suelos de la zona B: Ladera Sur.

u	G _u	W _L	W _p	PI	F	S	G	γ _m	ρ̄	ρ̄ _{prom}	q _u	ρ̄ _{prom}	q _u	ρ̄ _{prom}
%	%	%	%	%	%	%	Mg/m ³		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
10-	25-	2.5-	41-	15-	20-	60-	8-	0-	1.7-	100-	3-	50-	6-40	400
28	95	2.7	65	35	50	90	40	8	1.9	10200	7	100	100	1000

Zona A: Valle central.
Propiedades índice, resistencia y deformaciones de las arcillas de los suelos de la zona A: Valle central.

u	G _u	W _L	W _p	PI	F	S	G	γ _m	e _s	C _c	q _u	φ _v	P _c	P ₀
%	%	%	%	%	%	%	Mg/m ³				kPa	°	kPa	kPa

Zona C: Ladera Norte.
Propiedades índice y de resistencia de los suelos de la zona C: Ladera Norte.

u	G _u	W _L	W _p	PI	F	S	G	γ _m	e _s	C _c	q _u	φ _v	P _c	P ₀
%	%	%	%	%	%	%	Mg/m ³				kPa	°	kPa	kPa

Figura 28. Zonificación geotécnica propuesta para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (modificado de Ordoñez, 2008).

De acuerdo con los estudios de Ordoñez (2008), las arcillas expansivas cubren gran parte del área urbana de Tuxtla Gutiérrez con espesores de hasta 4.5 m de profundidad y, de acuerdo con la experiencia que se ha tenido con ellas en el mundo, producen daños severos en construcciones que refuerzan al suelo con demandas menores de 5 ton/m², es decir, viviendas, escuelas, pavimentos, entre otras estructuras, las cuales corresponden a la mayoría del inventario constructivo presente en la ciudad.

Las presiones de expansión generadas tienen un rango entre 1.0 y 1.5 kg/cm² (100 a 150 KPa). Los daños se observan en diversas regiones de la ciudad, zona del estadio Víctor Manuel Reyna, Colonias Las Palmas, El Retiro, Los Laureles, La ladera sur oriente y poniente, entre otras.

En la figura 29 se presenta un perfil estratigráfico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, elaborado con diferentes estudios de mecánica de suelos que fueron compilados para la microzonificación.

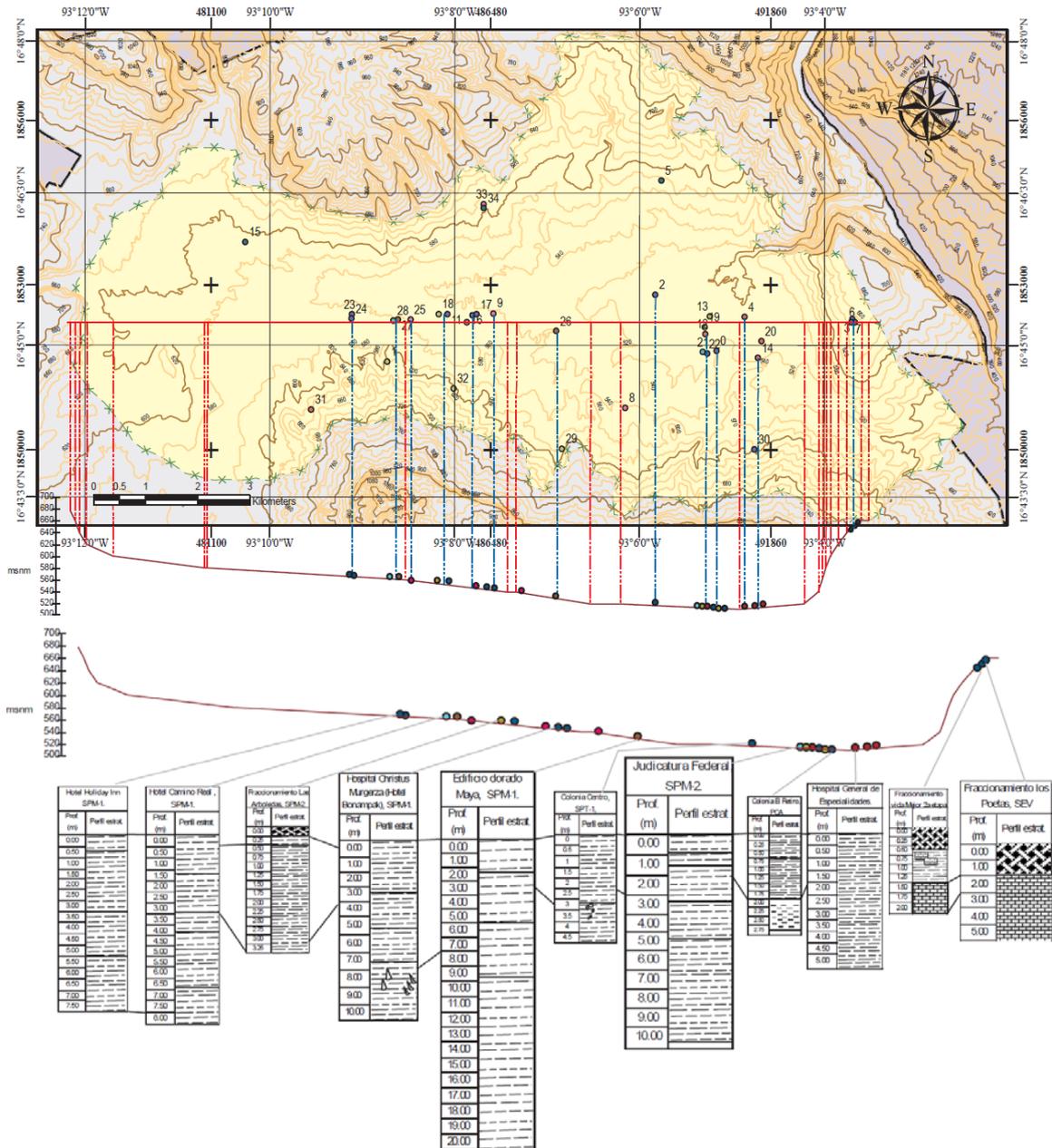


Figura 29. Perfil con las características estratigráficas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

4. Daños históricos por sismo en Tuxtla Gutiérrez

Un elemento clave a considerar para entender el peligro sísmico de una región y desarrollar una microzonificación sísmica considerando elementos imprescindibles, son los daños históricos que los sismos han generado en ella. Éstos se pueden representar con un mapa de intensidades sísmicas, como el desarrollado por Figueroa (1986), utilizando 49 mapas de isosistas (líneas que separan áreas de igual intensidad de daños), que toman en cuenta los sismos más importantes ocurridos en nuestro país, entre el 7 de abril de 1845 y el 19 de septiembre de 1985.

En la figura 30, se observa que considerando los daños sísmicos reportados y censados en el rango de tiempo del estudio de Figueroa (1986), para el caso del estado de Chiapas, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez es la única que ha alcanzado a registrar intensidades sísmicas de hasta X¹, mientras que la ciudad de Tapachula presenta intensidades de IX², el resto de los municipios del estado muestran intensidades entre VI y VII.

Las intensidades sísmicas al estar directamente relacionadas con los daños observados son un buen indicador del peligro sísmico, lo cual permite considerar que Tuxtla Gutiérrez presenta un peligro sísmico importante.

De acuerdo con los trabajos de Castro (2001), la investigación de García y Suárez (1996), y trabajos recientes de González *et al.*, (2010), González *et al.*, (2011a) y González *et al.*, (2011b), se han presentado varios sismos que generaron afectaciones en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, las cuales han provocado pánico en la población y, en algunos casos, daños moderados y hasta importantes.

¹ Según escala de Intensidades de Mercalli Modificada, en la intensidad X se destruyen gran parte de las estructuras de mampostería de toda especie, los cimientos de las estructuras de madera, así como algunas estructuras de madera bien construidas, incluso puentes. Se producen grandes daños en represas, diques y malecones. Se generan grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, ríos, lagos, etc., sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.

² Según escala de Intensidades de Mercalli Modificada, en la intensidad IX se produce pánico general. Las estructuras de mampostería mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras corrientes de albañilería bien construidas se dañan y a veces se derrumban totalmente. Las estructuras de albañilería bien proyectadas y bien construidas se dañan seriamente. Los cimientos se dañan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Se quiebran las tuberías (cañerías) subterráneas. Aparecen grietas aun en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.

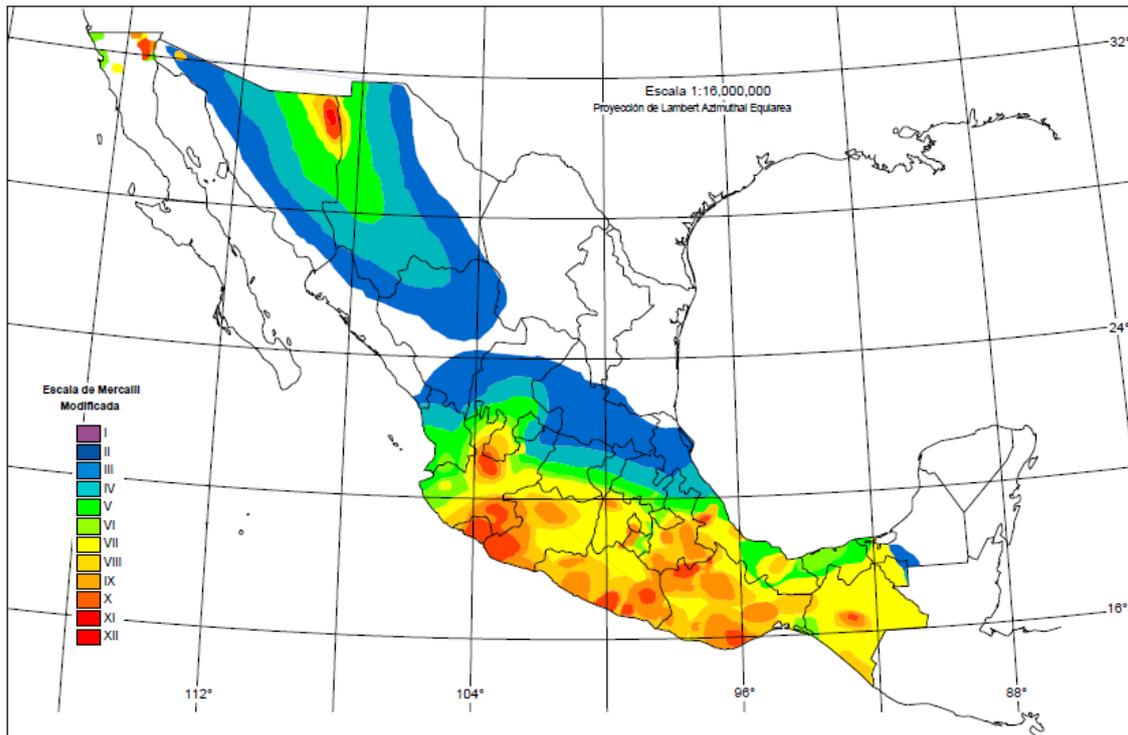


Figura 30. Mapa de intensidades sísmicas máximas (Figuroa, 1986).

En el presente trabajo se consideran tres eventos sísmicos particulares que fueron seleccionados por la cantidad de daños y porque se contaba con información suficiente para su localización, a saber:

- El 23 de septiembre de 1902 se presentó un sismo por el fenómeno de subducción, de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana, a 25 km de profundidad con magnitud de 7.7 e intensidades de X en la ciudad capital, alcanzando daños muy importantes y generalizados (Figuroa, 1973, García y Suárez, 1996).
- El 21 de octubre de 1995 sacude a Tuxtla Gutiérrez un fuerte terremoto con epicentro cercano a Villaflores, a 165 km de profundidad, con magnitud 7.1 e intensidad de VII en esta ciudad ocasionando cuarteaduras de edificios y viviendas, la caída de bardas y pánico en la población (González *et al.*, 2011a) (figura 31).





Figura 31. Fotografías de los daños debidos al sismo de Villaflores de octubre de 1995 en edificios públicos de Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2011a). Fotografía superior izquierda y superior derecha, edificio en el centro de la ciudad. Fotografía inferior izquierda, en la rectoría de la UNACH. Fotografía inferior derecha, en la catedral de San Marcos.

- El tercer evento se desarrolló el 7 de abril de 2011. Un sismo de magnitud 6.7 e intensidad de VI se presentó a 83 km de las Choapas, Veracruz y generó en Tuxtla Gutiérrez un conjunto de daños significativos para la distancia de la fuente, la profundidad (167 km) y la magnitud del evento (González *et al.*, 2011b), (figura 32).





Figura 32. Fotografías de los daños causados por el sismo de Las Choapas de 2011 en edificios públicos de Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2011b). Fotografía superior izquierda, edificio Corzo. Fotografía superior derecha, hundimiento en rectoría de la UNICACH. Fotografía intermedia izquierda, instalaciones de COCYTECH. Fotografía intermedia derecha e inferior izquierda, hospital de especialidades “Vida mejor”. Fotografía inferior derecha vivienda en el centro de la ciudad.

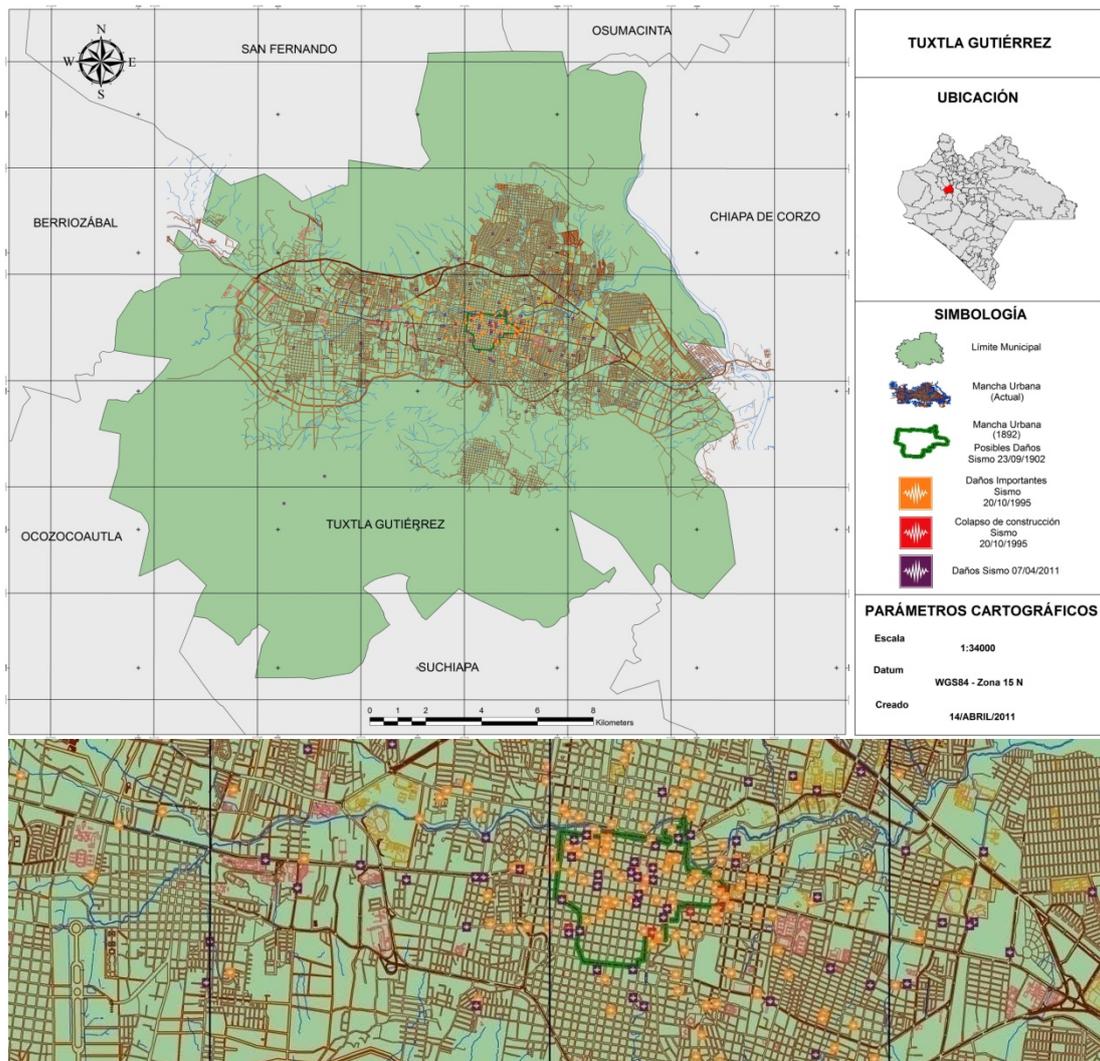


Figura 33. Daños históricos por sismo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González *et al.*, 2011b) En la parte superior se muestra toda la ciudad y en la parte inferior un acercamiento del centro de la ciudad. El polígono verde representa la mancha urbana de 1892, donde se concentraron los daños del sismo de 1902; los puntos naranja, los daños del sismo de 1995 y los puntos morados, los daños del sismo del 7 de abril de 2011.

En la figura 33 aparece un mapa que relaciona los daños ocasionados por el sismo del 23 de septiembre de 1902, el sismo del 21 de octubre de 1995 y el sismo del 7 de abril de 2011. Se observa cómo los daños se han concentrado en la zona de suelos blandos (arcillas expansivas) que se encuentran en el primer cuadro de la ciudad y zonas aledañas.

En la figura 34 se muestra la ubicación de los daños causados por los sismos del 21 de octubre de 1995 y del 7 de abril de 2011, de acuerdo con el uso de las construcciones. En ella se observa cómo sobresalen las construcciones de uso habitacional y escuelas. También es importante notar que los hospitales han sufrido daños que, aunque menores, se debe considerar esta experiencia y mejorar las estructuras para nuevos hospitales y rehabilitar de forma urgente las existentes. Esto es porque escuelas y hospitales son puntos clave durante y después de un sismo, al fungir como albergues las primeras y por la función de los segundos. Además, durante un sismo estas estructuras pueden contener un número muy importante de personas por lo que deben mantener un comportamiento adecuado.

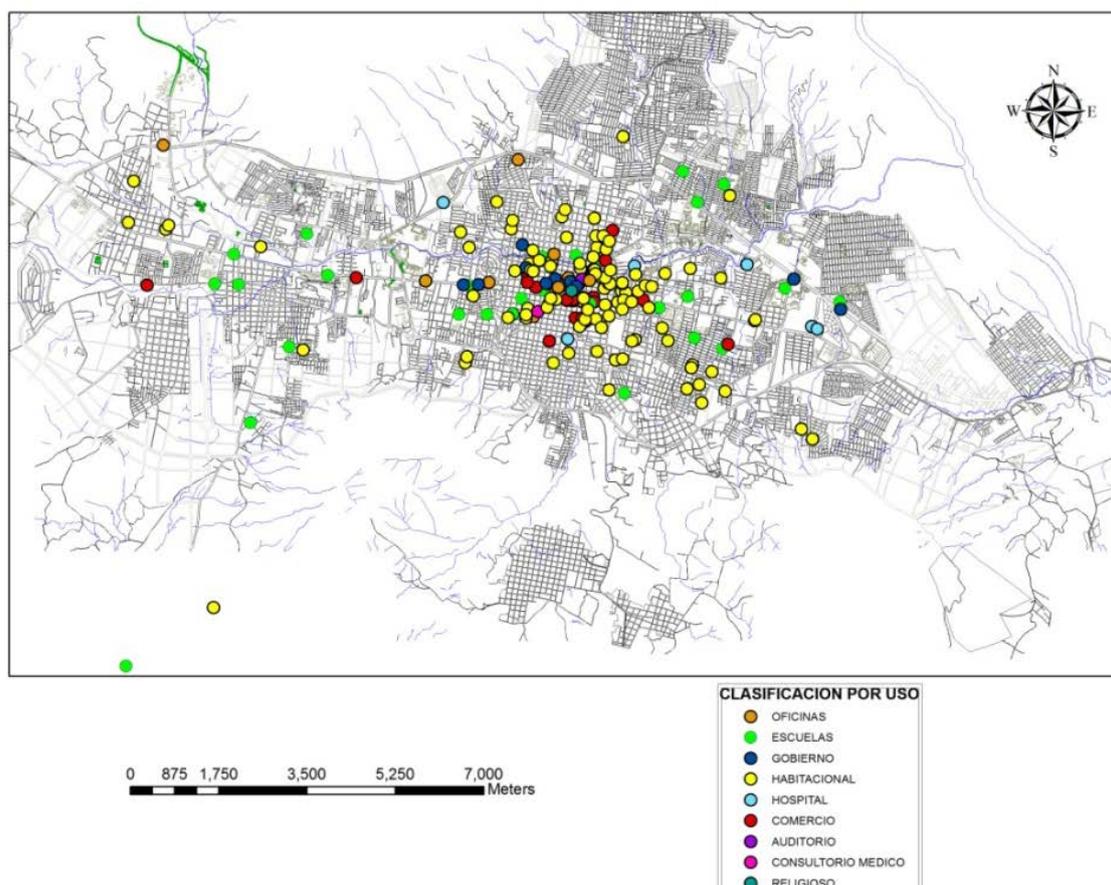


Figura 34. Localización de daños del sismo del 21 de octubre de 1995 y del 7 de abril de 2011, considerando el uso de las construcciones.

Otro factor importante en la concentración de daños, considerando los mismos sismos, es la edad de las construcciones, como se muestra en la figura 35. Se puede observar que donde hay construcciones con antigüedad considerable

(30 años o más) es en el centro de la ciudad, aunque también se han dañado estructuras que tienen menos de 10 años de construidas.

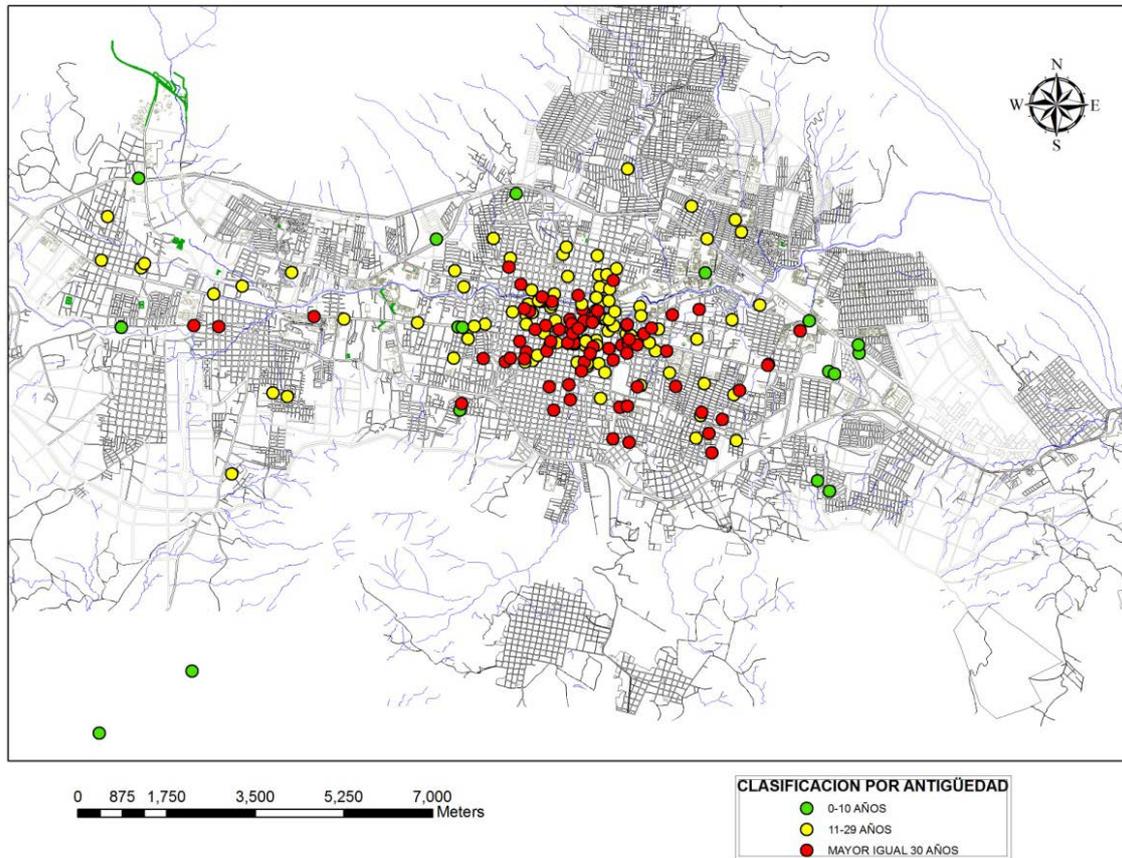


Figura 35. Localización de daños del sismo del 21 de octubre de 1995 y del 7 de abril de 2011, considerando la antigüedad de las construcciones.

En la figura 36 se observa que el periodo fundamental de las estructuras que sufrieron daños, era muy pequeño, correspondiendo, principalmente, a construcciones de uno y dos niveles. Las construcciones de tres o cuatro niveles que sufrieron daños fueron localizadas muy cerca del río Sabinal. Algunas estructuras de más de cuatro niveles, que fueron afectadas, se localizan también en el centro de la ciudad.

Las características del inventario de las construcciones locales (de uno a cuatro niveles en promedio) hacen que los periodos bajos o frecuencias altas de éstas sean similares a las del suelo, lo que permite generar fenómenos de resonancia.

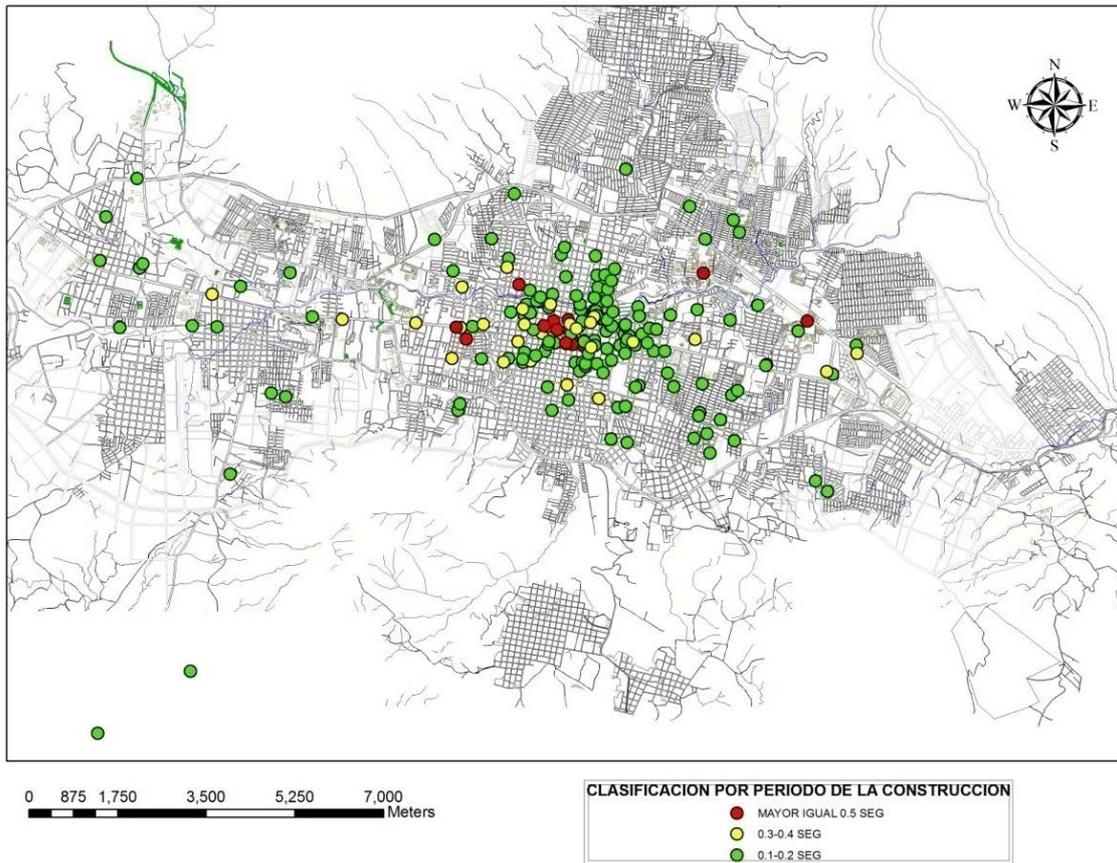


Figura 36. Localización de daños del sismo del 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011, considerando el periodo natural de vibración de las construcciones.

5. Efecto de los embovedados en los daños en Tuxtla Gutiérrez

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez se fundó en el valle fluvial y en las márgenes del río Sabinal. Toda el agua de lluvia escurre por una serie de afluentes, de temporal y permanentes, hasta llegar al cauce principal del Sabinal y de allí al Grijalva.

Desafortunadamente, los cauces naturales de estos escurrimientos fueron cubiertos en forma de embovedados o tapados por el crecimiento de la ciudad, con sus asentamientos alrededor del centro de la ciudad (figura 37).



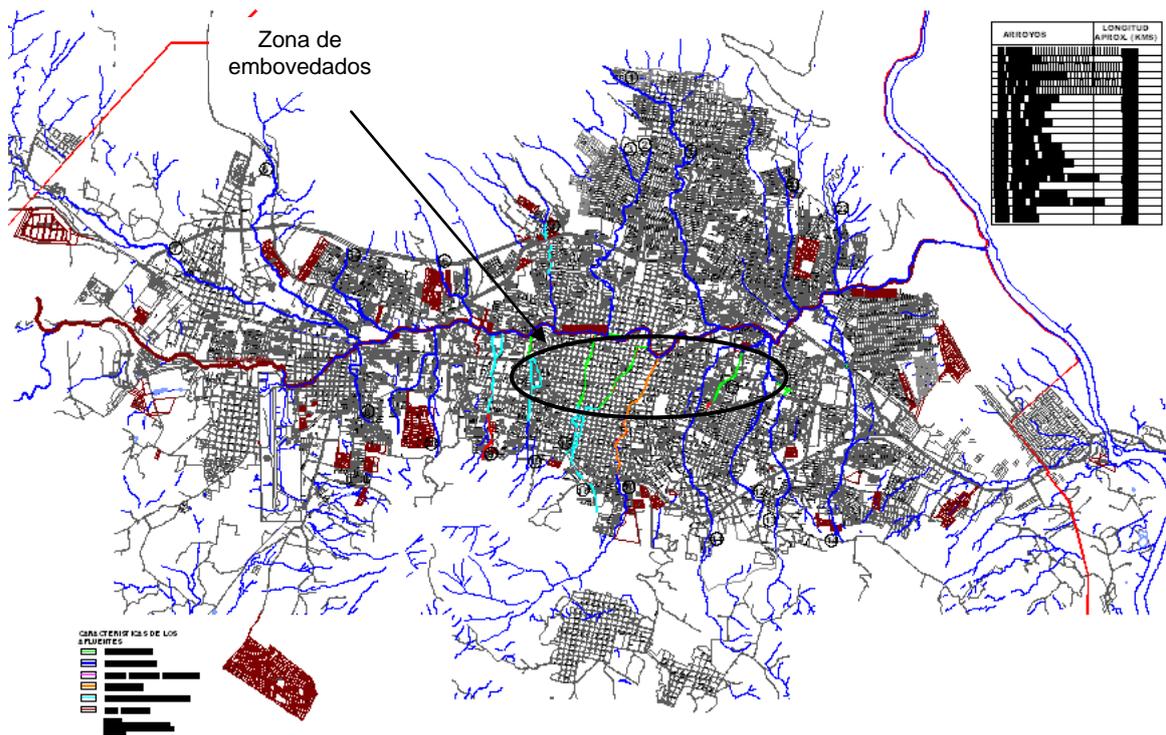
Figura 37. Mapa facsímil editado por el Gobierno del Estado, con motivo del centenario de Tuxtla Gutiérrez de manera definitiva como capital del Estado de Chiapas en 1992.

Al realizar el análisis de los daños en las construcciones y relacionarlos con la ubicación de los antiguos cauces de los ríos, se encontró que un porcentaje importante de los daños se localiza sobre algunos de los antiguos cauces de los afluentes que irrigaban el río Sabinal en el primer cuadro de la ciudad. Es decir, la existencia de éstos bajo construcciones importantes, incluidos edificios públicos de varios niveles, hace que aumente el riesgo de las mismas.

En la figura 38 se presenta un plano de localización de los principales embovedados con líneas de color verde, que abarca las zonas de los barrios

de San Marcos, El Calvario, San Pascualito, Los Milagros, Barrio Guadalupe, Fracc. San Roque, Colonia Moctezuma y Colonia las Palmas.

Todo lo anterior aumenta en forma exponencial por la razón de que los embovedados presentan deterioro importante en su estructura, debido a la falta de mantenimiento, fatiga y a que ya rebasaron los años de vida útil con que fueron diseñados. Además, el proceso de deterioro se aceleró porque en ellos corre un importante número de descargas de aguas negras domiciliarias. El grado de acidez de las aguas negras, así como la presencia de objetos y residuos sólidos arrastrados por el drenaje pluvial superficial provocaron serios problemas en sus estructuras. En la figura 39 se muestra el estado actual de tres de los principales embovedados.



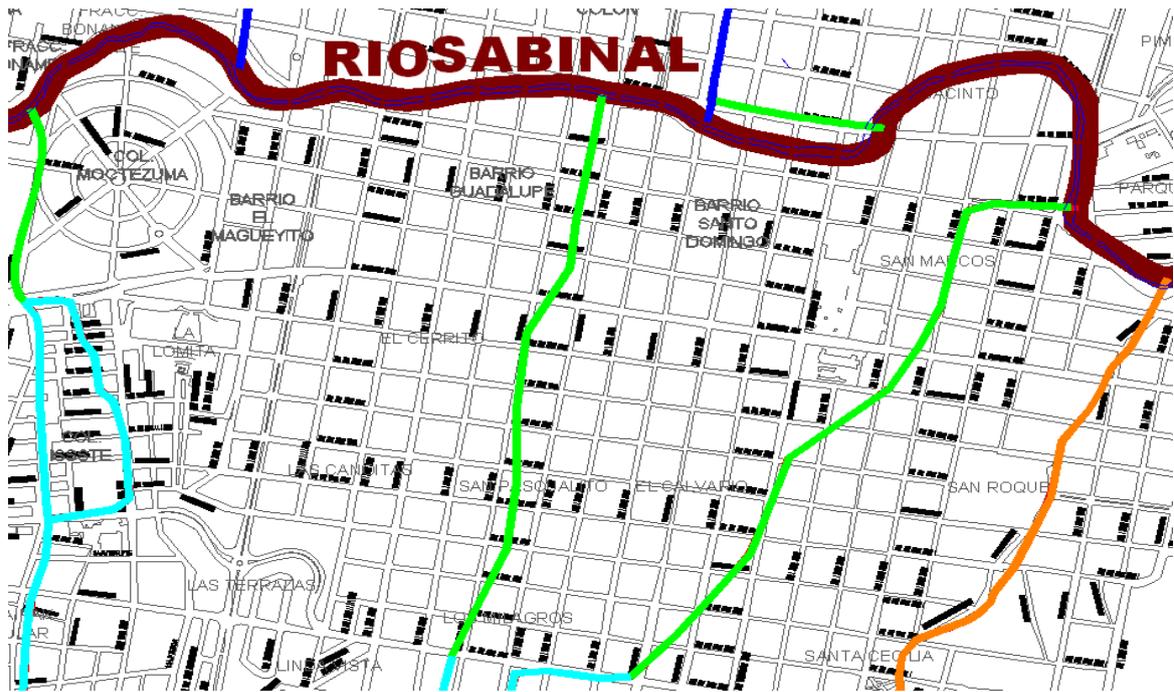


Figura 38. En la parte superior aparece el mapa de toda la ciudad y en la parte inferior un acercamiento del centro de la misma. Se muestra la ubicación de los embovedados siguiendo la trayectoria de las líneas color verde.



Figura 39. Fotografías superior derecho e izquierdo, deterioro en estructura del embovedado de 4ª Norte y 4ª Oriente. Fotografía inferior izquierda, corrosión en estructura del embovedado del barrio San Roque. Fotografía inferior derecha, deterioro y corrosión de la estructura del embovedado de 5ª Poniente a la altura del Barrio

Guadalupe. Las fotografías corresponden al recorrido realizado por Protección Civil Estatal, Protección Civil Municipal y otras dependencias municipales durante el mes de marzo de 2008.

Actualmente el deterioro en los embovedados sigue incrementándose, lo que puede resultar en colapsos parciales de los mismos, incluso sin la presencia de sismos. Las deformaciones que se observan en algunos de sus tramos, debilitan la estructura de las construcciones vecinas y las que sustentan, lo cual se manifiesta por medio de la aparición de fisuras generadas por los asentamientos diferenciales.

6. Microzonificación sísmica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

6.1. Antecedentes

A mediados del siglo XIX ya se conocía que el movimiento sísmico no se producía de igual forma en todas las zonas del terreno. En ese tiempo se había observado que en algunas áreas se producían concentraciones de daños mayores que en otras zonas circundantes. El origen de esta concentración se debe al fenómeno de amplificación y periodo fundamental del movimiento del suelo, el cual aumenta tanto la aceleración, como la velocidad y el desplazamiento de la superficie en puntos concretos del terreno. Esta amplificación puede deberse a la naturaleza, composición y morfología de las capas superficiales del subsuelo. Al conjunto de estos fenómenos se le conoce como “efectos locales”, “efecto local”, “respuesta local” o “efectos del sitio” (Rodríguez, 2005).

Tras el sismo del 20 de octubre de 1995, el Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica (GIIS) a través de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco y la Universidad Autónoma de Chiapas, realizaron el primer mapa de Microzonificación para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, mediante vibración ambiental y con sólo 75 puntos, considerando espectros de Fourier (Alonso *et al.*, 1995).

Estos autores realizaron también un mapa de isoperiodos (figura 40), en el cual se observó que la ciudad presenta un suelo muy homogéneo con tres curvas de 0.15, 0.20 y 0.25 segundos. Esto redunda en un solo espectro para suelo firme con amortiguamiento del 5.0% y con un coeficiente sísmico de 0.60.

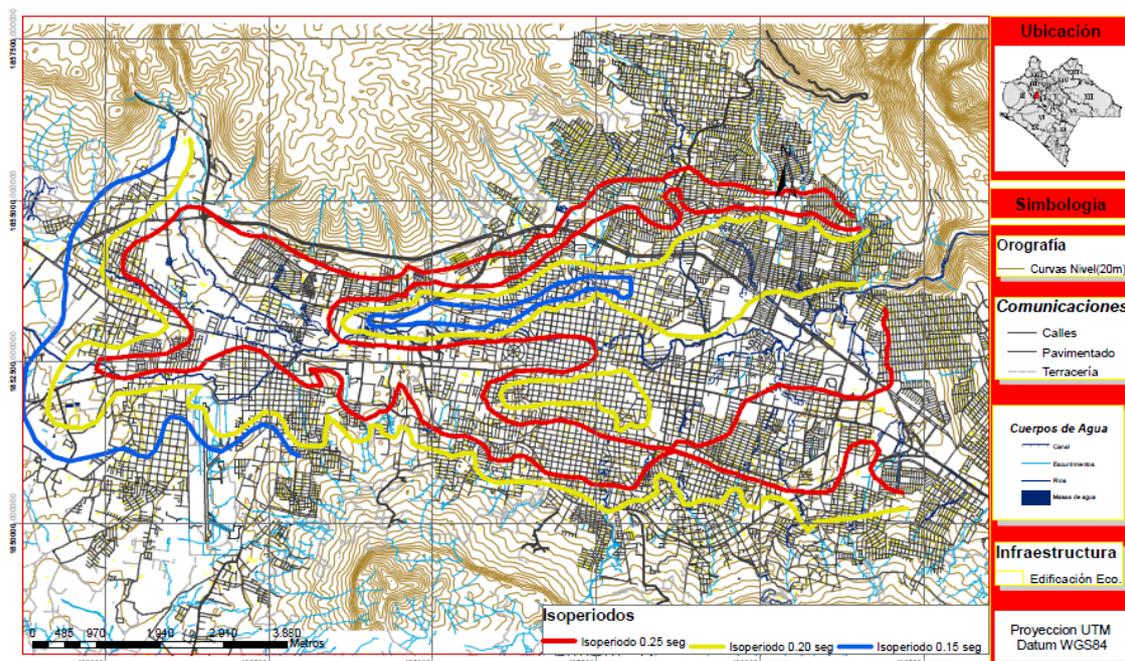


Figura 40. Mapa con curvas de isoperiodos del estudio de 1995 del GIIS (adaptado de Alonso *et al.*, 1995).

En los años 2004, 2005 y 2006 continuaron los estudios de microzonificación para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, (Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) en Narcía *et al.*, 2006). El resultado de estos estudios fue el mapa de isoperiodos para la ciudad, considerando las nuevas colonias y refinando puntos del estudio previo (se pasó de 75 a 96 puntos de medición), los resultados se observan en la figura 41.

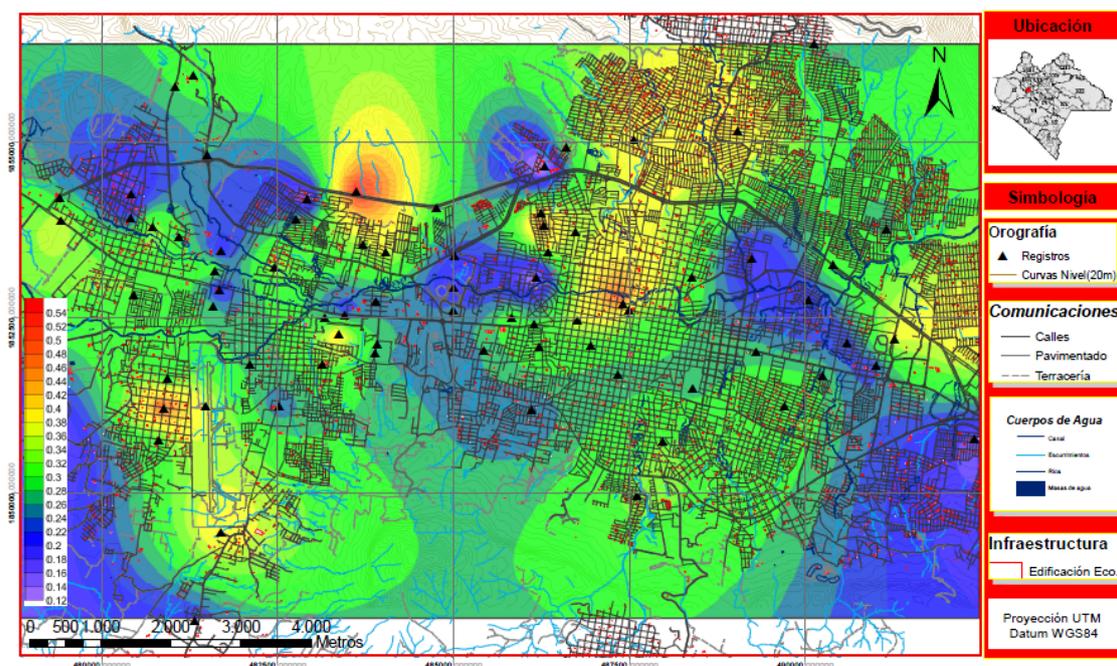


Figura 41. Mapa de isoperiodos del estudio de 2006 (adaptado de Narcía *et al.*, 2006).

El estudio señaló que los periodos naturales de vibración de los suelos de Tuxtla Gutiérrez están entre 0.10 y hasta 0.53 segundos, las amplitudes relativas encontradas son del orden de hasta 13 y se hace conciencia de la vulnerabilidad sísmica de la cuenca sedimentaria donde se desplanta la ciudad capital.

Los espesores de los sedimentos se encontraron desde 3.82 y hasta 19.95 m. Se concluyó que el terreno debe clasificarse como intermedio para la mayor parte del valle y en algunos casos como firme. Considerando estos datos habría dos zonas siguiendo las tendencias de la microzonificación del Distrito Federal: zona de lomas hasta 0.50 segundos y una pequeña zona de transición con periodos mayores a 0.50 segundos, así como dos espectros de diseño, los cuales no se obtuvieron en el estudio.

La falta de espectros de diseño, las incertidumbres de las técnicas usadas (se consideraron únicamente cocientes espectrales), el crecimiento de la ciudad y mayor información sobre daños históricos, determinaron continuar con los estudios de microzonificación sísmica para la ciudad capital.

6.2. Estudio actual de microzonificación sísmica

6.2.1. Área de estudio

El municipio de Tuxtla Gutiérrez está ubicado en la Depresión Central del estado de Chiapas, presentando relieve montañoso al norte y al sur. Su extensión territorial es de 412.40 km², lo que representa el 3.26 % de la región Centro y el 0.55% de la superficie estatal. Esta ciudad limita al norte con los municipios de San Fernando y Usumacinta, al este con Chiapa de Corzo, al sur con Suchiapa y al oeste con Ocozocoautla y Berriozábal (CEIEG, 2011).

La cabecera municipal es a su vez la capital del estado y lugar central de la región I Metropolitana como hemos señalado y se ubica en un valle de laderas tendidas. Las coordenadas de la ciudad son 16° 45' 10" de latitud norte, 93° 07' 00" de longitud oeste y se ubica a una altitud de 600 metros sobre el nivel del mar (CEIEG, 2011), (figura 42).

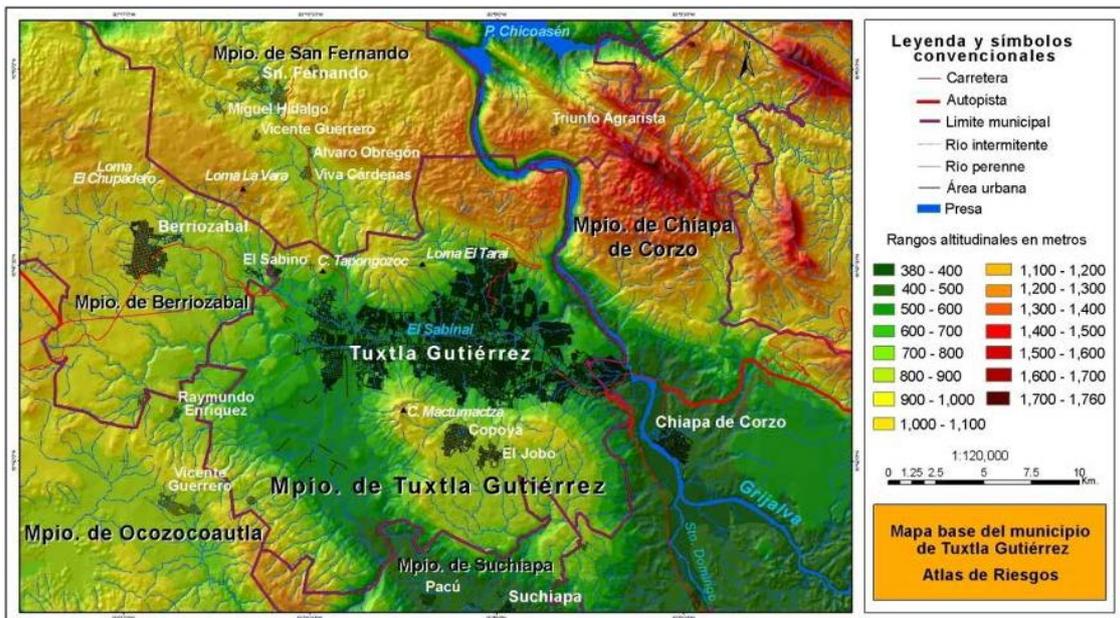


Figura 42. Municipio de Tuxtla Gutiérrez. Fuente: Secretaría de Infraestructura, 2011.

El territorio municipal se conforma de sierras altas con laderas tendidas, llanuras con aportes aluviales y mesetas por erosión, en el parteaguas norte, prevalece un conjunto de sierras cuya altitud no rebasa los 1,200 msnm, lo cual motiva que el relieve presente una serie de lomeríos de pendientes suave, que originan un modelo erosional representativo de una baja densidad de drenaje. En la región de estudio se encuentran formaciones como el Cañón del Sumidero y Cerro Mactumatzá lugares de belleza natural que forman parte del paisaje municipal y urbano (CEIEG, 2011).

El estudio de microzonificación actual para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez es coordinado por la UNAM (Instituto de Geofísica e Instituto de Ingeniería) y se

trabaja en colaboración con el Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de desastre del estado de Chiapas.

6.2.2. Adquisición y procesamiento de datos

El uso de microtemores (vibración ambiental) para obtener la estimación de la respuesta de un sitio fue introducido en Japón en los años cincuenta (Kanai y Tanaka, 1961). Las mediciones de microtemores presentan un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo como por la rapidez con que permiten obtener resultados.

Una de las técnicas, introducida para estimar efectos de sitio usando registros de microtemores, es el cociente espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro denominada técnica de Nakamura, propuesta originalmente para interpretar mediciones de microtemores (Nakamura, 1989). Lermo y Chávez-García (1994) compararon resultados de microtemores contra cociente espectral estándar de registros de temblores y concluyeron que los microtemores, cuando son analizados con dicha técnica, determinan con buena precisión el periodo dominante (T_0) en sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.5 y 10 Hz. En la figura 43 se muestra un esquema del proceso de la técnica de Nakamura, al cual se denominará indistintamente a lo largo del estudio H/V.

Para el estudio de microzonificación se realizaron registros de vibraciones en toda la mancha urbana de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con el objetivo de determinar el periodo fundamental de vibración del suelo, así como también las amplitudes relativas asociadas. Para la adquisición de estos registros se utilizaron dos grabadoras Altus modelo Makalu con sensores modelo Episensor con una sensibilidad de $\frac{1}{4}$ de gal y sensores de velocidad Lenartz de un segundo. Los registros se tomaron con 200 muestras cada segundo a lo largo de 30 minutos de muestreo por cada punto.

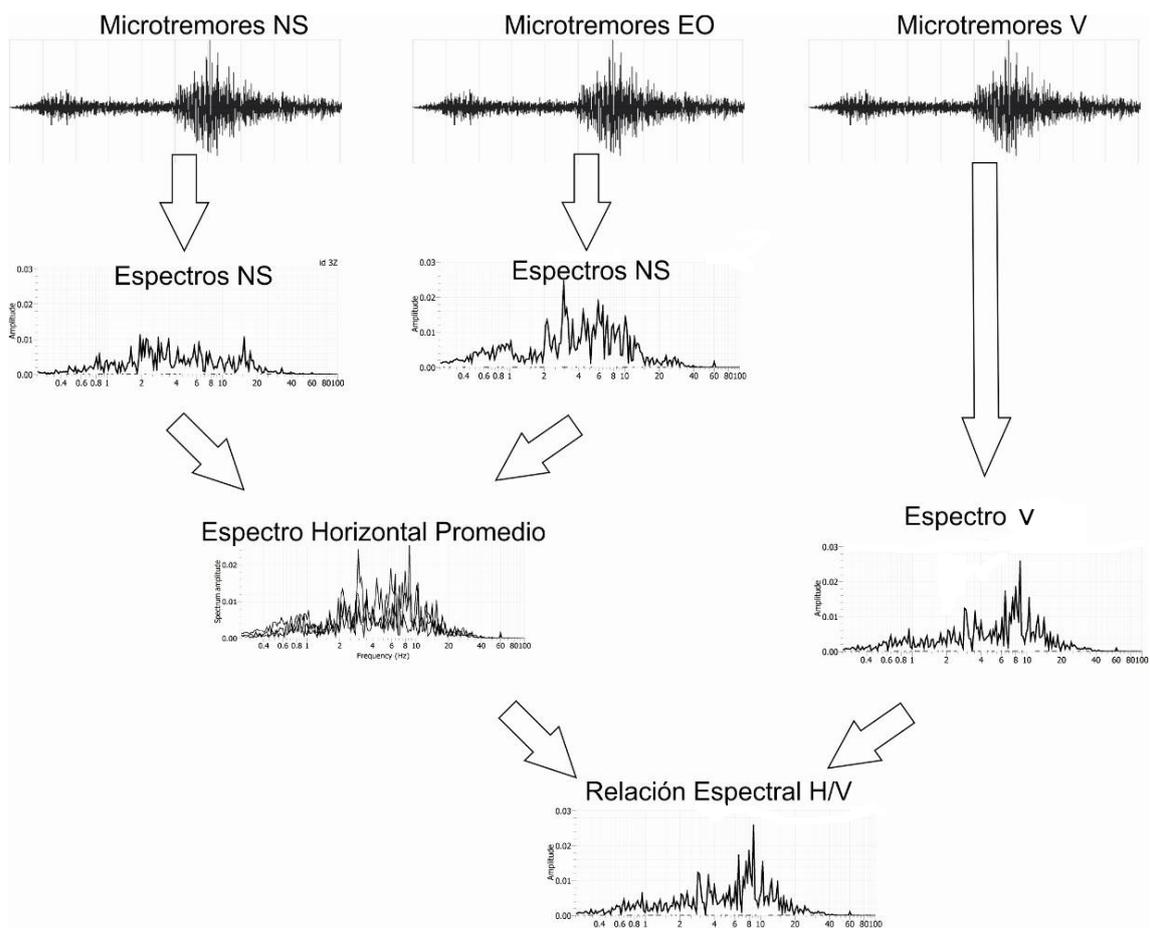


Figura 43. Diagrama de flujo para el procesamiento de señales con la técnica de Nakamura (H/V).

La distribución de estos registros se tomó con base en la densidad de población, además de la necesidad de realizar una triangulación entre los registros para cubrir una mayor superficie del terreno interpolando los mismos. Con lo anterior delimitamos, con una mayor aproximación, las zonas con un comportamiento dinámico similar para identificarlas en el mapa. El trabajo se desarrolló concentrando el mayor número de registros en la zona centro de la ciudad, para tener detalle del comportamiento dinámico. En la figura 44, se muestra la distribución espacial de los puntos de medición en las laderas de la ciudad y en el mapa de la figura 45 se muestra la distribución de los puntos de medición sólo en la parte del centro.

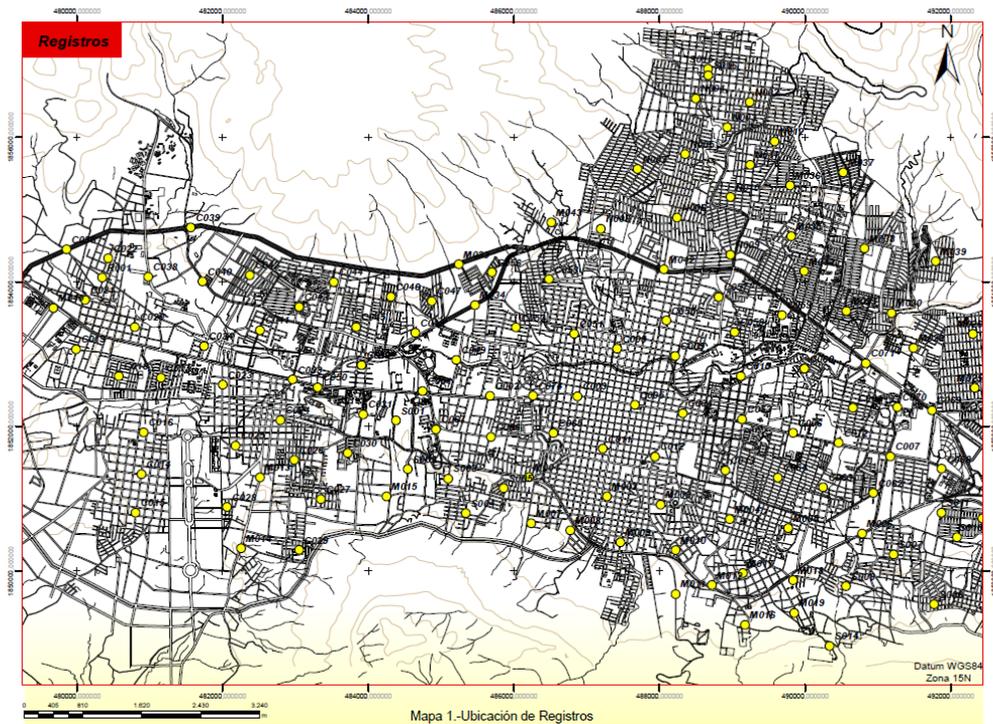


Figura 44. Mapa con la distribución espacial de los puntos de medición en las laderas de la ciudad.

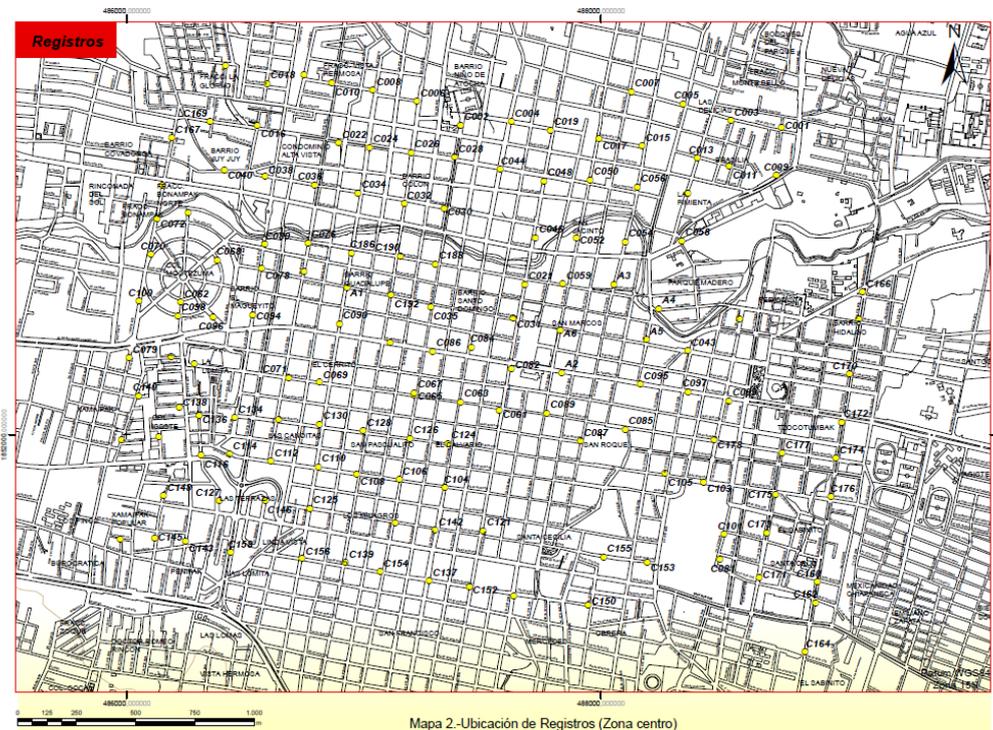


Figura 45. Mapa con la distribución espacial de los puntos de medición en el centro de la ciudad.

En cada punto se realizaron registros de 30 minutos aproximadamente, para tener suficiente tiempo de registro como para discriminar las frecuencias que correspondían al ruido interno del aparato, al cruce de vehículos y personas,

etc. Los datos así obtenidos se transfieren a una computadora portátil para su almacenamiento y posterior análisis, con la cual adicionalmente se acciona el equipo de registro (acelerógrafo).

La primera parte del análisis de la señal registrada consiste en la visualización de las trazas para seleccionar aquellos segmentos de registro que no estén contaminados por transitorios de corta duración que puedan afectar la estacionalidad de las señales (principalmente vehículos y peatones en la proximidad del instrumento).

Dentro de los registros se seleccionaron ventanas de entre 30 segundos de duración para cada punto, las cuales se utilizaron para calcular espectros de Fourier. Al seleccionar varias ventanas de registro para cada punto, permite obtener estimaciones más robustas del espectro de amplitudes de Fourier para cada punto de observación.

Los espectros de amplitudes de Fourier fueron suavizados con el filtro de Konno Ohmachi con un constante de 30 y un *cosine taper* al 5%, para disminuir la varianza. En las figuras 46 y 47 se ha graficado una ventana de 30 minutos para cada una de las tres componentes de un registro, así como sus respectivos espectros de amplitud.

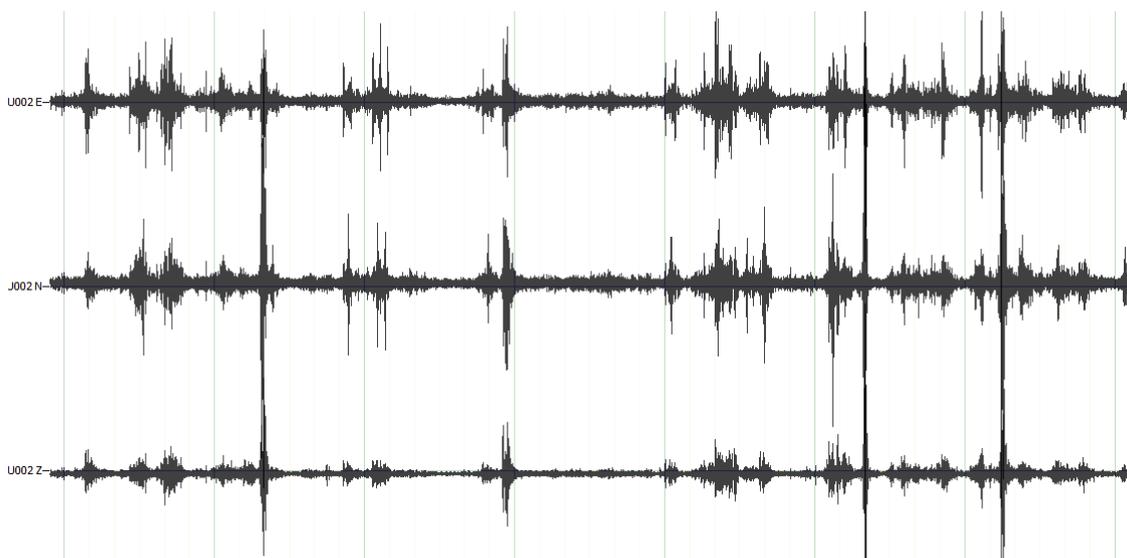


Figura 46. Registros de vibración ambiental para las componentes E-W, N-S y V de arriba abajo, respectivamente.

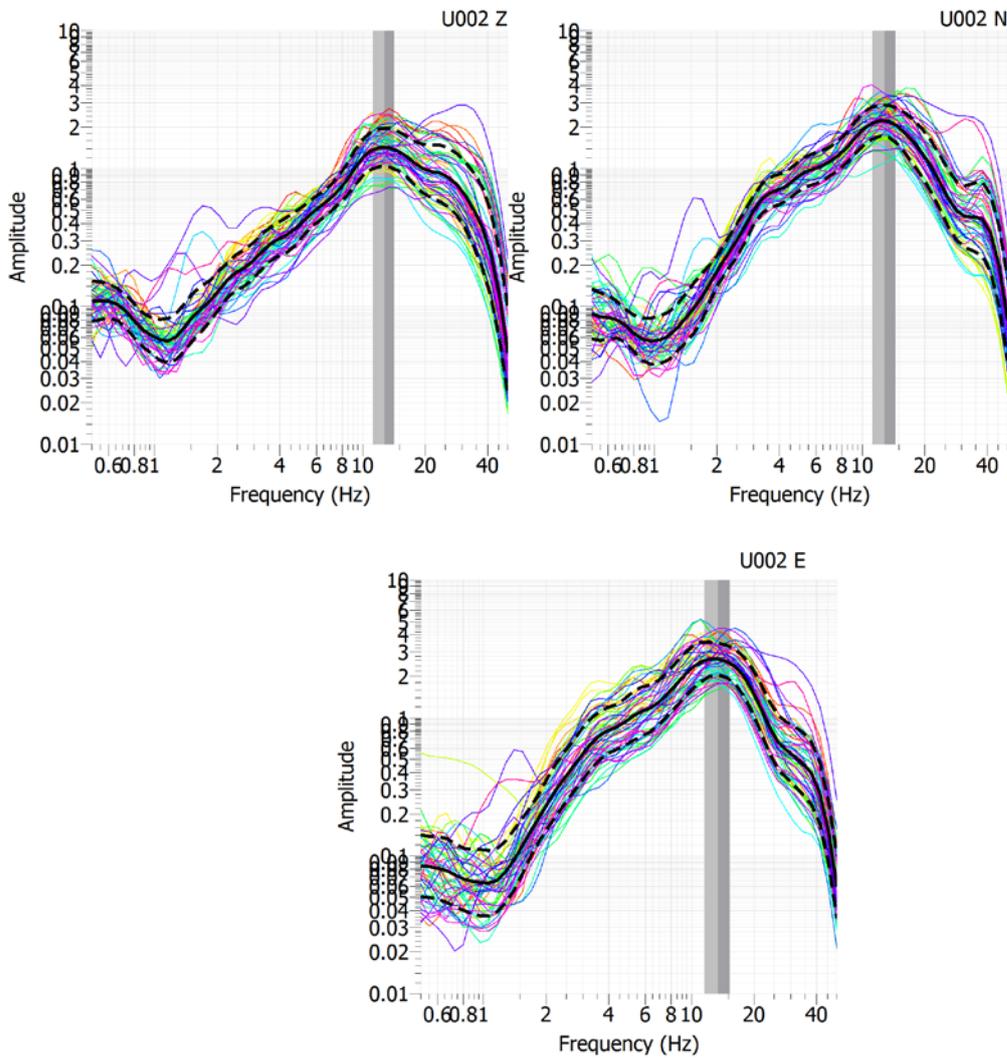
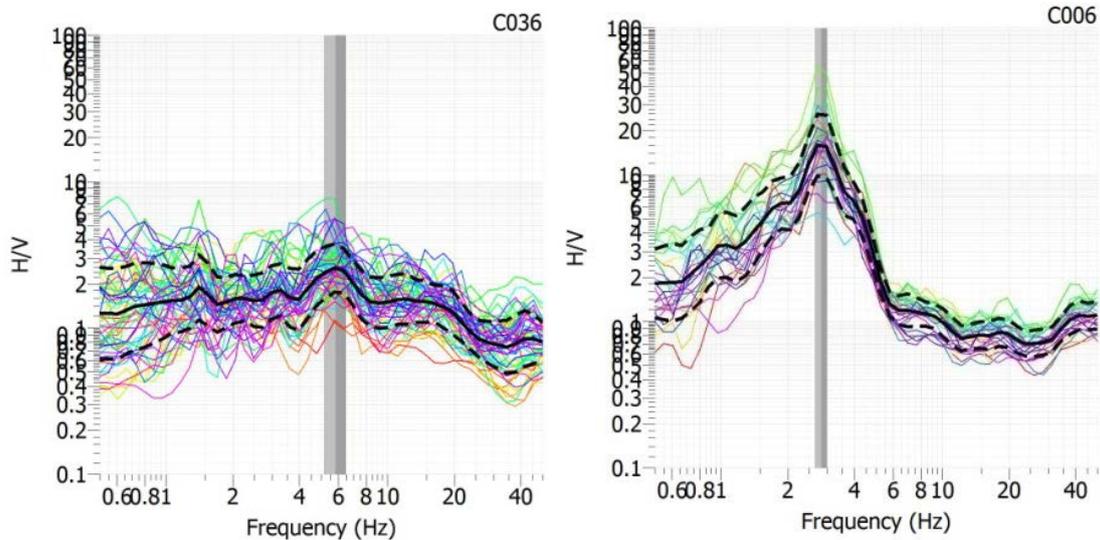


Figura 47. Espectros de amplitud para cada una de las componentes del registro mostrado en la figura 45.

6.2.3. Resultados de la técnica de Nakamura

En las figuras 46 y 47 se presentan los resultados en gráficas de los datos obtenidos al aplicar la técnica de Nakamura en las laderas, y en las figuras 48 y 49 se presentan los ejemplos de los cocientes obtenidos en la zona del centro de la ciudad. Las componentes N-S y E-W son empleadas para obtener una suma vectorial.

El resto de las gráficas de los cocientes espectrales para cada uno de los registros realizados en este estudio se encuentran en los anexos 3 y 4, las líneas en color corresponden a los cocientes de las ventanas de 30 segundos seleccionadas, la línea negra gruesa continua indica el promedio de la relación H/V y las líneas discontinuas más y menos la desviación estándar. En el eje de las abscisas se puede observar la frecuencia (Hz) y en el eje de las ordenadas se indica la amplificación relativa asociada (A_r).



Figuras 48. Gráficas de cociente espectral correspondientes a los registros obtenidos en las laderas de la ciudad. Figura izquierda, muestra una frecuencia dominante en 6 Hz (0.17 s de periodo) y amplitud relativa máxima del orden de 2.5. Figura derecha, muestra un pico predominante en frecuencias mayores a 2.5 Hz (0.40 s de periodo) y amplitud relativa máxima del orden de 16, lo cual representaría un mayor efecto de sitio.

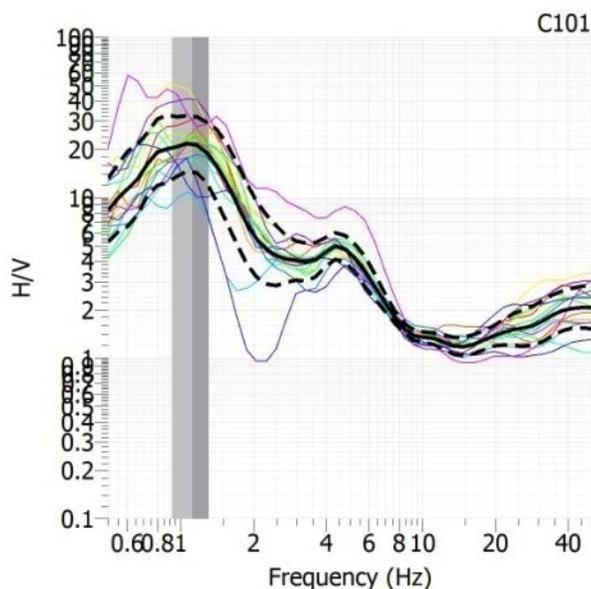


Figura 49. Gráfica de cociente espectral correspondiente al registro de la colonia El Sabinito en el centro de la ciudad, mostrando un pico predominante en la frecuencia de 1.12 Hz (0.89 s de periodo) y una amplitud relativa de 21 veces.

En las gráficas se presentan las frecuencias dominantes y su amplificación relativa a un sitio de referencia en suelo firme obtenidas de la relación H/V. Estos valores muestran variación en sus frecuencias dominantes de 1 a 15 Hz (1 a 0.07 s de periodo) y una amplificación relativa máxima promedio de hasta 25 veces. Sin embargo, estas amplificaciones han de tomarse con reserva pues se ha reportado que las reales pueden ser mayores (Bard, 1999).

Finalmente, del análisis de estos puntos en la ciudad, donde se estimó el efecto de sitio, se presenta un mapa con la distribución espacial de este efecto. En el

mapa de la figura 50 se ha dividido la ciudad en dos zonas, donde el periodo dominante (T_0) del suelo presenta valores de periodos desde 0.07 segundos y hasta 1 segundo (frecuencias de 15 y 1 Hz, respectivamente), en este rango se puede ubicar una zona de transición.

Todos los espectros como se puede constatar en las gráficas H/V fueron obtenidas en dos familias de curvas que se encuentran en los anexos. La primera familia de curvas (anexo 1) tiene un máximo de frecuencia hacia los 15 Hz y se le ha denominado como “zona de laderas”, para referirnos a suelos más consolidados y de menor espesor de estratos finos o sedimentos. La segunda familia corresponde a las gráficas H/V que presentan un máximo espectral hacia los 2 Hz y son denominados “zona centro”, para referirnos a suelos con mayor número de sedimentos y por lo tanto mayor posibilidad de amplificaciones relativas importantes.

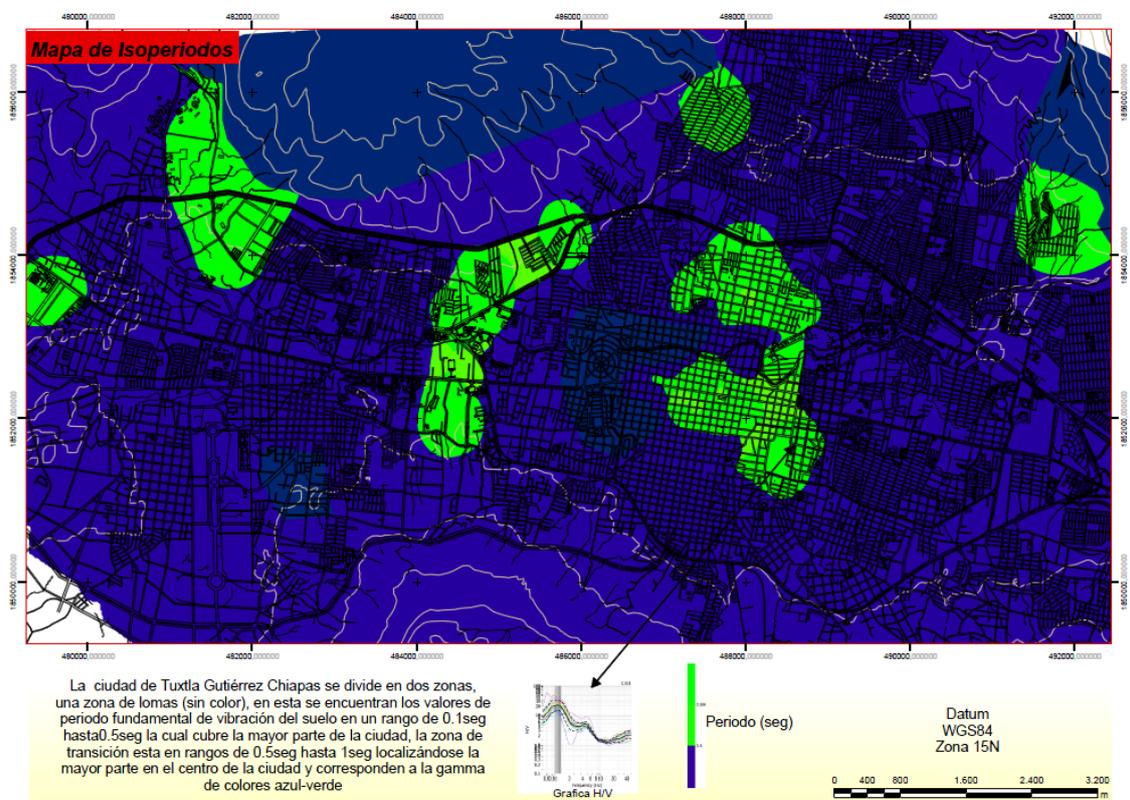


Figura 50. Zonificación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez considerando el periodo fundamental.

Los datos obtenidos con la metodología descrita anteriormente varían desde 0.06 y hasta 1 segundos, como se muestra en el mapa de la figura 50, siendo los periodos de 0.06 hasta 0.5 segundos los que predominan en la ciudad; los periodos de 0.51 hasta 1 segundo se presentaron principalmente en el centro y otras zonas de la ciudad, afectando a las colonias Barrio Niño de Atocha, Fracc. La Llave, Penipak Norte, Las Asturias, Las Delicias, Fracc. Monte Bello, Brasilia, Fracc. Miramar, La Pimienta, Parque Madero, Barrio Santo Domingo, San Marcos, El Calvario, San Roque, El Sabinito, Santa Cruz, Fracc. Las Canteras, Fracc. Ladera de la Loma, Fracc. Paraíso Ojo de Agua, Fracc. Primero de Mayo, El Calichal, San Francisco Sabinito, Fracc. San Francisco

Sabinal, Magdalena, Unidad Habitacional La Joya, Fracc. Aramoni, Bugambilias, Villas Montes Azules, Los Tucanes, Fracc. Bugambilias, Ampliación Arrollo Blanco, Paulino Aguilar Paniagua, Arroyo Blanco y parte de las colonias Nuevo Mirador, Pedregal San Antonio, Fracc. Loma Real, Quetzalcóatl, Rincón de la Florida, Bosques del Parque, Tzocotumbak, Santa Cecilia, Obrera, San Jorge, Fracc. Monte Real, Fracc. Monte Azul, Fracc. SAHOP, Plan de Ayala y San Pedro Progresivo, la mayoría de estos resultados principalmente se encuentran afectados por el río Sabinal.

Como se muestra en el mapa de la figura 51, la amplificación relativa asociada varía desde 2 hasta 25 veces, en una distribución dispersa en toda la ciudad, pero encontrando tendencias debidas a características del suelo concentrándose la mayor amplificación en el centro y la parte más baja de la ciudad y cercanas al río Sabinal.

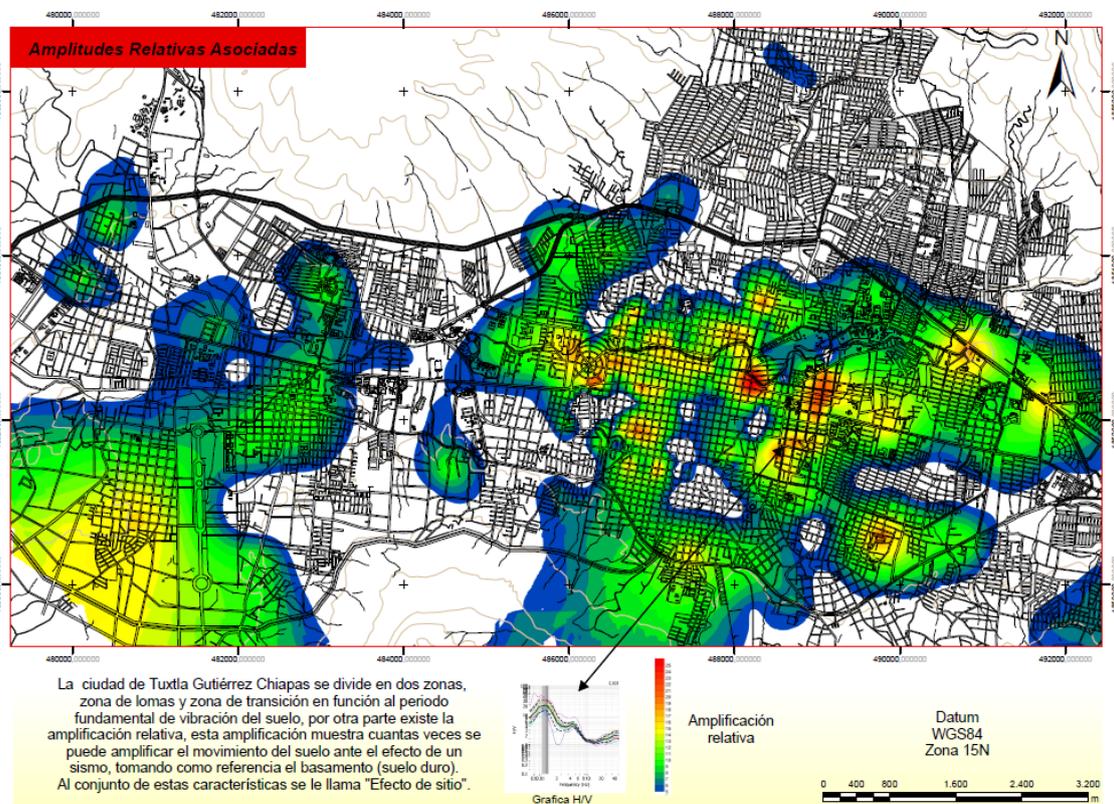


Figura 51. Mapa de amplificaciones relativas asociadas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Las señales procesadas de las laderas permiten observar que en la zona centro y parte del norte encontramos mayores periodos (desde 0.51 y hasta 1 segundos promedio) que en el resto de la ciudad (desde 0.06 y hasta 0.50 s, promedio), lo cual, se debe posiblemente a mayor espesor de sedimentos deformables, material constitutivo menos denso, entre otros factores.

6.3. Análisis de la microzonificación versus los daños históricos

Con la información hasta aquí obtenida (mapa de isoperiodos y amplificaciones relativas) y empleando los daños sísmicos históricos (20 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011), se construyeron los mapas de las figuras 52 y 53. Se observó que no se pueden explicar las causas de los daños con sólo considerar los periodos fundamentales de vibración del suelo (posibilidad de contar las construcciones y el suelo con periodos similares, lo cual permitiría el fenómeno de la resonancia) (figura 52) o con las amplificaciones relativas (a mayor amplificación de la señal sísmica debería haber más daños) (figura 53).

Se encontró que los daños se presentan en alineamientos bien definidos y que éstos pueden seguir probablemente direcciones de paleocanales, producto del flujo de agua preexistentes al desarrollo y crecimiento de la ciudad. Estos paleocanales o paleocauces fueron bloqueados y obstruidos mediante materiales de relleno conforme creció la ciudad. Los materiales empleados, al no estar consolidados o compactados, sin duda alguna permiten mayores desplazamientos y amplificaciones del suelo por tener menor nivel de consolidación.

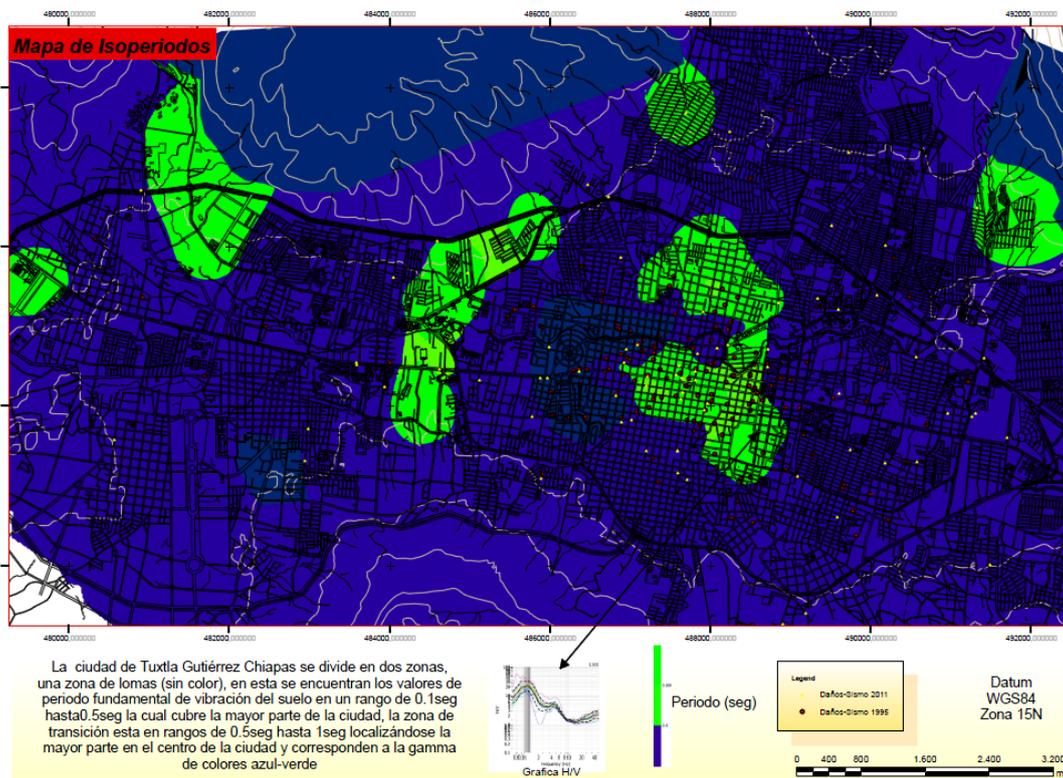


Figura 52. Comparación entre la distribución de los isoperiodos y las zonas que han sufrido daños en los sismos históricos.

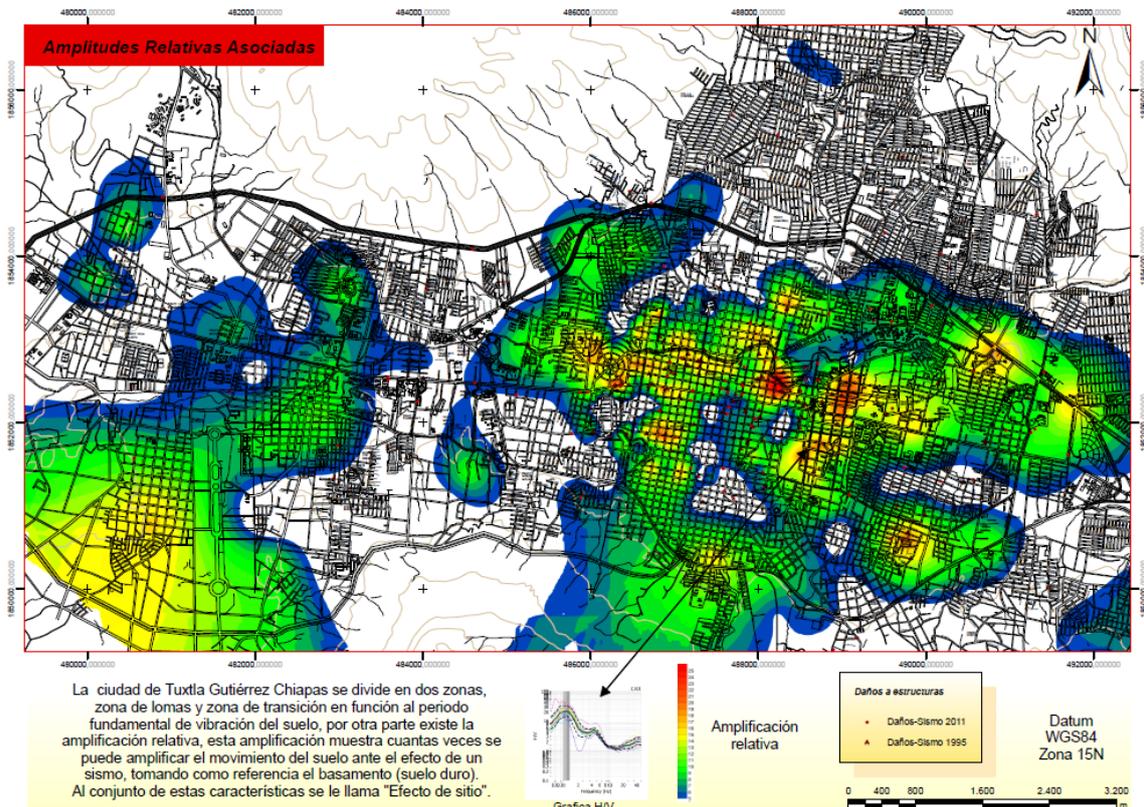


Figura 53. Comparación de las amplificaciones relativas con los daños de sismos históricos.

Adicionalmente los daños se centran donde se ubican un gran número de construcciones que por su uso se consideran esenciales para la ciudad, como es el caso de hospitales, escuelas, zonas comerciales, edificios de gobierno, entre otras (véase figura 54).

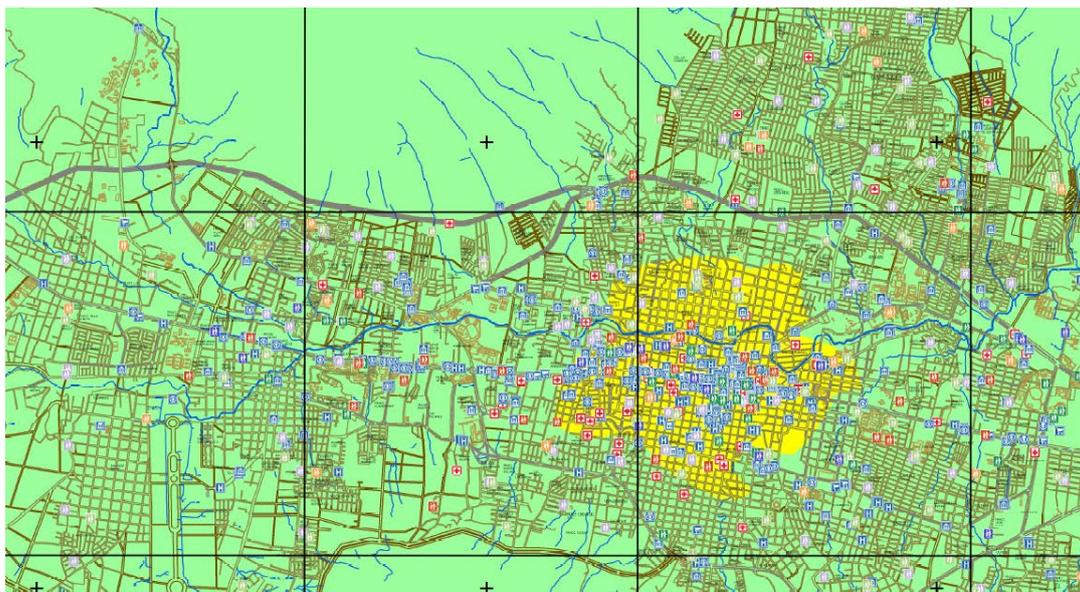


Figura 54. Concentración de daños (zona amarilla) y unidades económicas de la ciudad (hospitales, escuelas, zona comercial y edificios de gobierno, con diversos colores predominando el azul).

Las causas de la concentración de daños son diversas debido a la importancia de definir el porqué de los daños en la microzonificación sísmica, por lo cual se desarrolló un estudio de mayor profundidad, tanto de campo como analítico, el cual consideró la adquisición de una importante cantidad de registros con sensores de velocidad y de aceleración, empleo de la técnica de correlación espacial denominada SPAC, tanto en su versión tradicional como con modificaciones de la misma (calicatas SPAC, correlación lineal o en pares), uso de Georadar, visita a cada una de las estructuras dañadas, etcétera.

En la figura 55 se muestran en azul los puntos que se tomaron hasta junio de 2011 y en verde el trabajo de campo en la zona de más concentración histórica de daños que se llevó a cabo durante julio y agosto de 2011.

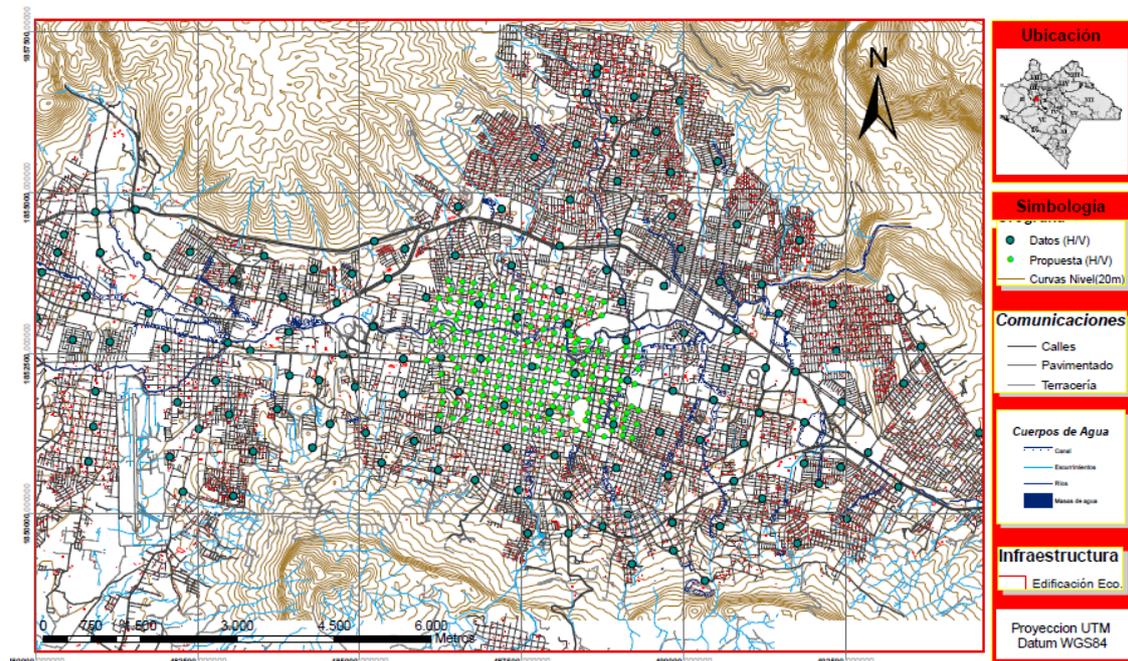


Figura 55. Puntos adquiridos para el centro de la ciudad y registros tomados hasta junio de 2011.

Para el desarrollo de la técnica de arreglos de correlación espacial (ACES; SPAC, siglas en inglés) se consideraron en primer momento los puntos de colocación y los arreglos de la figura 56. Todos éstos para la zona centro de la ciudad, para evaluar el efecto de los embovedados y la posibilidad de presencia de paleocanales.

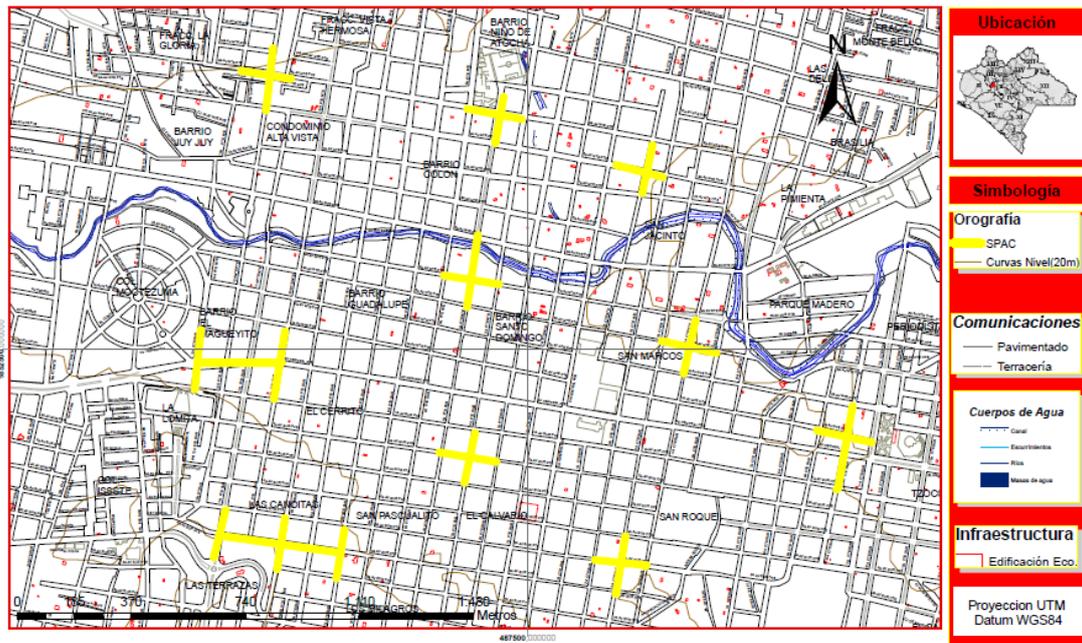


Figura 56. Ubicación preliminar de arreglos SPAC en Tuxtla Gutiérrez.

Se realizó un mayor detalle en el centro debido a que ahí es donde se localizan una gran cantidad de las unidades económicas y se localizan en las regiones con mayores niveles de amplificación relativa.

Amplificaciones relativas y unidades económicas

En los mapas de las figuras 57 a 60 se presentan las unidades económicas (escuelas, hospitales, bancos, hoteles, edificios de gobierno, etc.) que se ubican en zonas con periodos más largos (implica que se asientan sobre sedimentos menos consolidados, lo cual está relacionado con zonas sujetas a mayor amplificación sísmica).

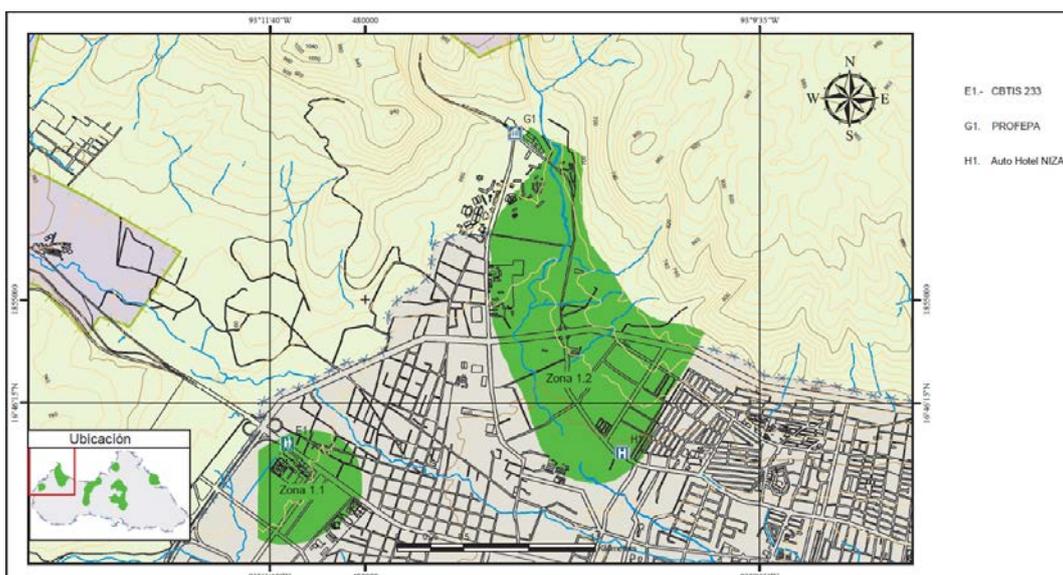


Figura 57. Unidades económicas ubicadas en zonas 1.1 y 1.2.

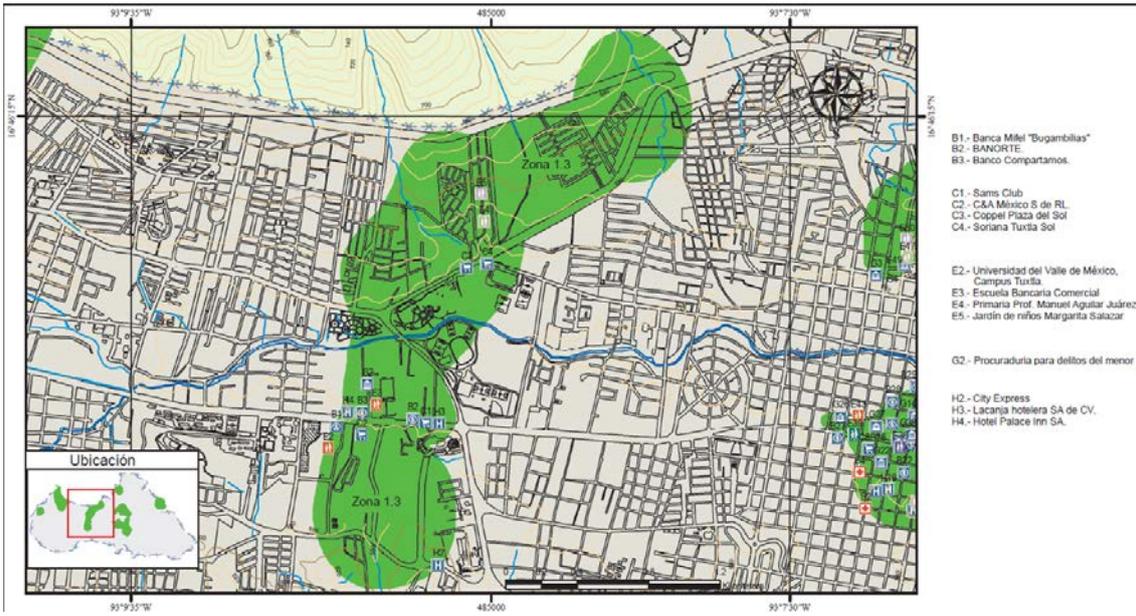


Figura 58. Unidades económicas ubicadas en zona 1.3.

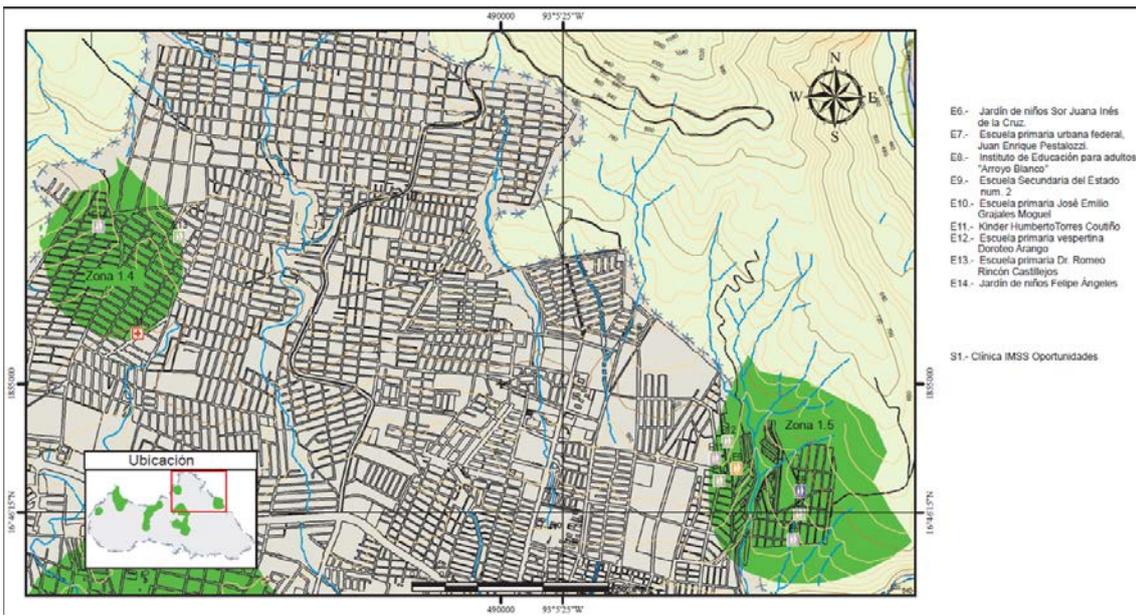


Figura 59. Unidades económicas ubicadas en zonas 1.4 y 1.5.

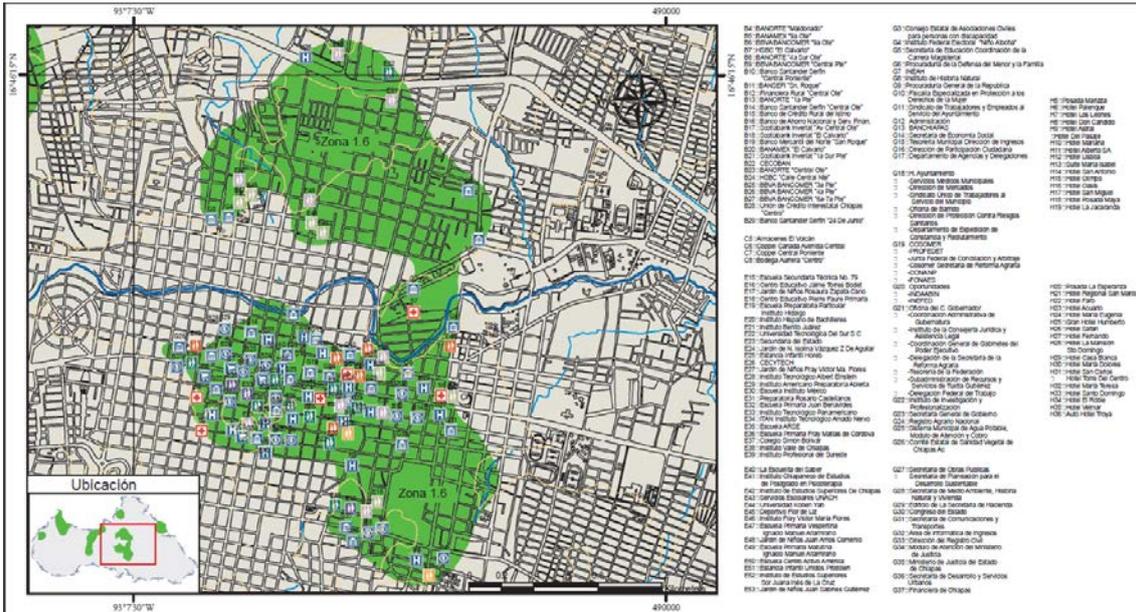


Figura 60. Unidades económicas ubicadas en zona 1.6.

En la figura 61 se ubican las unidades económicas que se relacionan con las zonas de mayor amplificación relativa (rojos y naranjas), los cuales coinciden con mayores amplificaciones sísmicas sobre las estructuras desplantadas sobre ellas.

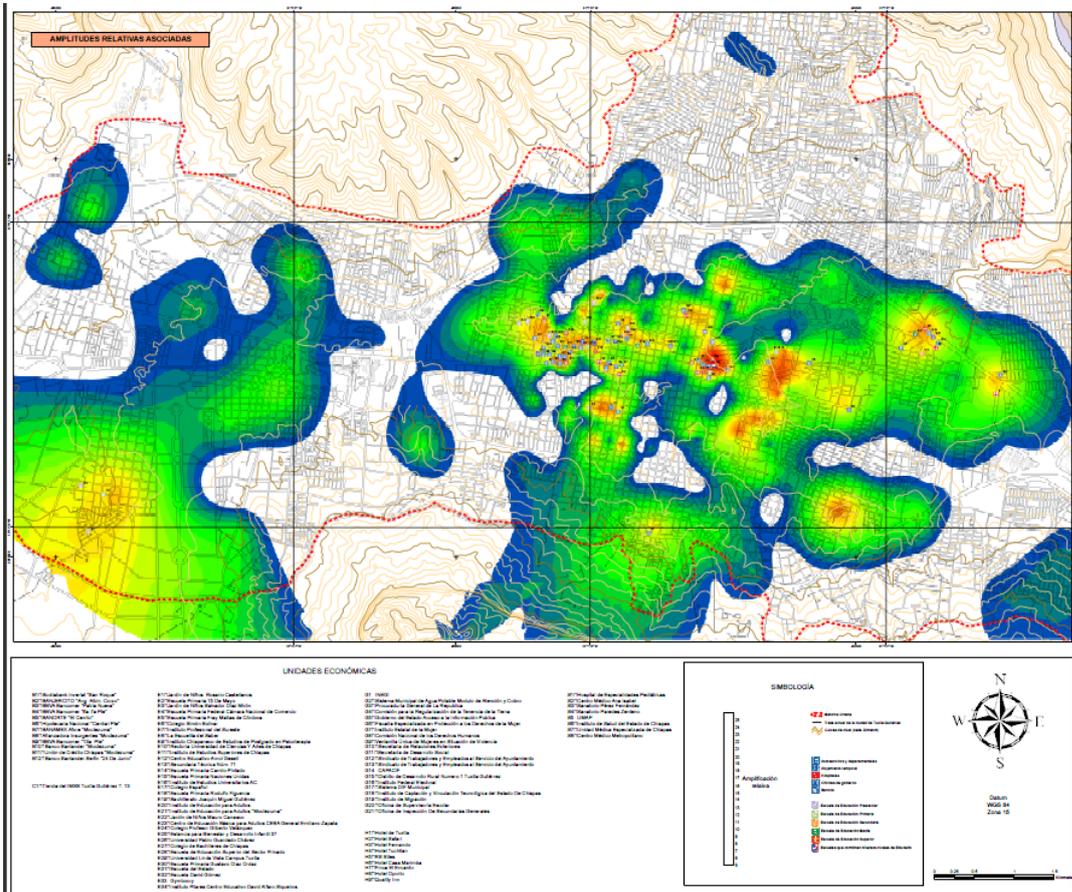


Figura 61. Unidades económicas ubicadas en zonas de mayor amplificación relativa.

6.4. Determinación de los perfiles de velocidad con la técnica de correlación espacial, SPAC

Para estimar los efectos del suelo, primero se determinó la estructura estratigráfica del subsuelo mediante la variación de la velocidad de las ondas de cortante con la profundidad. En los valles donde los espesores de sedimentos se extienden a profundidades aproximadas de 40 m, como es el caso de algunas zonas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, fue necesario conocer con más detalle las características de los depósitos someros, debido a la amplificación de las ondas sísmicas de periodo corto (entre 0.5 y 1 segundo) que se localizan en el centro de la ciudad.

Existen varias técnicas para lograr este objetivo, en general, al utilizar cualquiera de ellas, es posible realizar la inversión de las velocidades de fase de las ondas Rayleigh y así obtener el perfil de velocidades de ondas de cortante. Una técnica que se puede aplicar con mucha rapidez y facilidad es la que utiliza las componentes verticales de los microtemores registrados de manera simultánea por un arreglo de sismógrafos.

Los métodos de exploración sísmica convencionales de reflexión y de refracción son complicados de aplicar en áreas urbanizadas por la limitación de usar una fuente artificial, por lo que cada vez toman más importancia las técnicas basadas en microtemores. Son varios los métodos que utilizan como base las observaciones simultáneas de microtemores; por ejemplo, Nakamura (1989) utilizó la relación espectral Horizontal-Vertical (HVSR) para determinar los periodos dominantes; otros investigadores (Arai y Tokimatsu, 2004) han aplicado una técnica basada en la inversión de la relación H/V con la que es posible estimar la variación de la velocidad de las ondas de cortante. Aunque este procedimiento ha sido cuestionado por su falta de fundamento teórico (Horike *et al*, 2001), en la actualidad su aplicación se ha extendido y se utiliza como una herramienta muy versátil para estimar las características del sitio donde se localiza la estación sismográfica o acelerográfica (Lozano *et al*, 2009).

A partir de los primeros trabajos de Aki (1957) se ha demostrado la confiabilidad de las técnicas basadas en mediciones de arreglos de microtemores, para conocer los perfiles del subsuelo.

Recientemente se están empleando cada vez más estas técnicas que utilizan arreglos de microtemores, como el método convencional de autocorrelación Espacial (SPAC, por sus siglas en inglés), que requiere al menos de cuatro estaciones. Este método se basa en la teoría de funciones aleatorias estacionarias, de tal manera que los microtemores se consideran como un proceso estacionario en el tiempo y en el espacio.

Aki (1957, 1965) estableció las bases teóricas para estimar las velocidades de fase a partir del método SPAC. Demostró teóricamente que una función de autocorrelación espacial entre dos estaciones será una función Bessel de

primer tipo y orden cero con el argumento de número de onda bajo la suposición de distribución aleatoria de la dirección de propagación con una velocidad fija. Usando estas relaciones, el autor obtuvo curvas de dispersión de ondas superficiales observadas de un arreglo de datos de microtemores.

6.4.1. Métodos de análisis de SPAC

En los siguientes párrafos describiremos brevemente los métodos utilizados en el presente trabajo. Éstos son el método de Calicatas SPAC en arreglos triangulares (tradicional modificado por el Doctor Jorge Aguirre González) y el arreglo SPAC modificado.

El método SPAC tiene el propósito de obtener el modelo estructural a partir de registros de Microtemores. Para ello se requiere registrar Microtemores simultáneamente en varias estaciones que conforman un arreglo instrumental. Con esa información y mediante el procesado que describiremos a continuación se obtiene la curva de dispersión de ondas Rayleigh, que posteriormente se usa para determinar la estructura de velocidades buscada.

Siguiendo la metodología descrita por Aki (1957), consideremos un arreglo de estaciones dispuestas en un arreglo circular para la observación de Microtemores.

Representamos ondas armónicas de frecuencia circular ω de Microtemores por $u(0,0,\omega,t)$ y $u(r,\theta,\omega,t)$, las cuales son observadas en el centro $C(0,0)$ del arreglo y en el punto $X(r,\theta)$ sobre el círculo de radio r . Entonces la función de Autocorrelación espacial se define por la ecuación 2:

$$\phi(r, \theta, \omega) = \overline{u(0,0, \omega, t) \cdot u(r, \theta, \omega, t)}, \quad (2)$$

Donde $u(t)$ significa el valor promedio en el dominio del tiempo. El coeficiente de Autocorrelación espacial se define como el promedio de la función de Autocorrelación (SPAC) en todos los sitios de observación que se encuentran en el arreglo circular, como se muestra en la ecuación 3:

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi \cdot \phi(0, \omega)} \int_0^{2\pi} \phi(r, \theta, \omega) \cdot d\theta, \quad (3)$$

Donde $\phi(0,\omega)$ es la función SPAC en el centro $C(0,0)$, la integral de la ecuación (2) se reduce a la ecuación 4:

$$\rho(\omega; r) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad (4)$$

Donde $J_0(\omega r/c(\omega))$ es la función de Bessel de primer especie y de orden cero, $c(\omega)$ es la velocidad de fase en la frecuencia ω . El coeficiente SPAC de la

ecuación (2) puede ser calculado directamente en el dominio de la frecuencia usando la transformada de Fourier de los microtemores observados de la forma de la ecuación 5:

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{Re}[S_{CX}(\omega; r, \theta)]}{\sqrt{S_C(\omega) \cdot S_X(\omega; r, \theta)}} d\theta \quad (5)$$

Donde $\text{Re}[S_{CX}(\omega; r, \theta)]$ significa la parte real de un valor complejo, (ω) CS y S $(\omega; r, \theta)$ X son los espectros de potencia de los microtemores en los dos sitios C y X respectivamente, y S $(\omega; r, \theta)$ CX es el espectro cruzado (*Cross Spectrum*) entre los dos sitios. Esta ecuación significa que los coeficientes SPAC son obtenidos por medio del promedio de una función de coherencia normalizada definida como coespectro (*co-spectrum*) entre dos sitios con respecto a la dirección θ .

La ecuación (5) puede ser obtenida directamente a partir de los microtemores observados usando técnicas como el método FFT. La velocidad de fase puede ser calculada para frecuencia ω a partir del argumento de la función Bessel de la ecuación (4).

6.4.2. Método SPAC en línea

Chávez-García *et al.*, (2005) presentaron una extensión del método SPAC, donde las curvas de dispersión de velocidad de fase fueron obtenidas desde los registros de datos de un arreglo sísmico temporal con una geometría muy irregular. La diferencia básica con respecto al método propuesto por Aki (1957) fue el sustituir el promediado azimutal requerido por el método, por el promediado temporal. Los buenos resultados obtenidos en ese trabajo condujeron a los autores a proponer arreglos de estaciones tan diferentes como fuera posible de un círculo, una línea de estaciones (Chávez-García *et al.*, 2006). Los resultados nuevamente fueron muy buenos, con lo que se consiguió liberar al método SPAC de las restricciones geométricas en la forma del arreglo usado al que estaba sujeto.

6.4.3. Descripción de los Sitios de Estudio SPAC

Los lugares en donde se realizaron los arreglos SPAC son en total ocho, cinco de ellos ubicados en el centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, uno más en el estacionamiento del estadio de futbol Víctor Manuel Reyna, otro más en las cercanías de la Torre Chiapas y finalmente en la Ciudad Universitaria de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (ver figura 62).

El interés de conocer la estructura de velocidades de estos sitios es debido a que en cinco de ellos se observaron daños estructurales, además del efecto de sitio obtenido en estudios anteriores. En los dos restantes (estacionamiento del estadio "Zoque" Víctor Manuel Reyna y cercanías de la Torre Chiapas) el propósito fue de hacer arreglos hasta de 300 m por lado y correlaciones lineales. En la UNICACH y UNACH el objetivo fue de poder tener el perfil de

velocidades de los dos puntos donde hay una estación acelerométrica fija UNICACH (ladera norte) y UNACH (centro poniente de la ciudad).

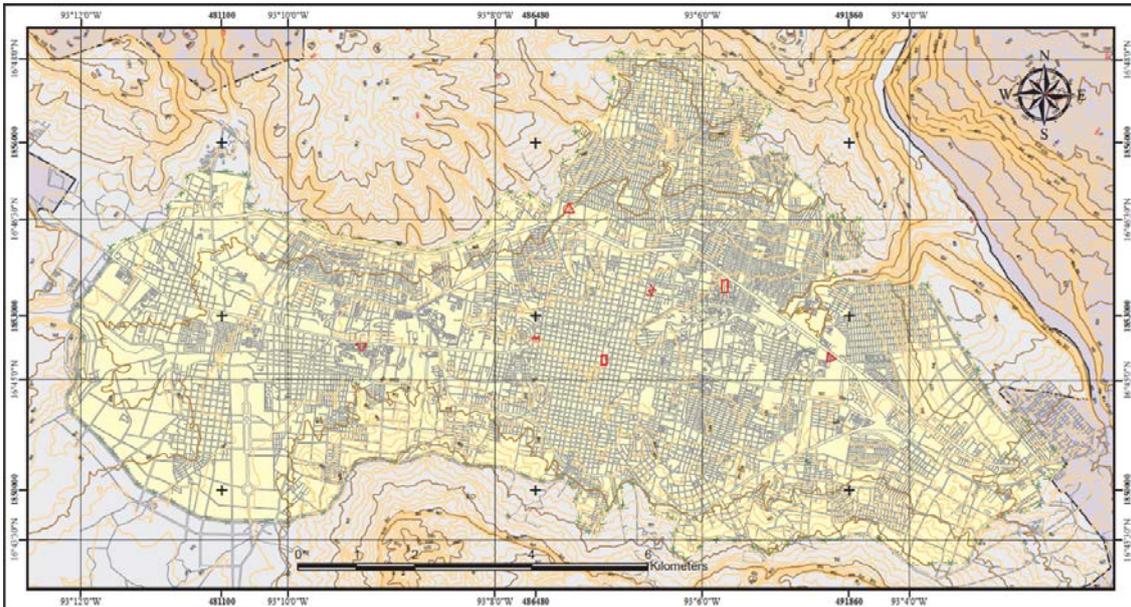


Figura 62. Mapa con la localización de los mega arreglos SPAC, arreglos SPAC y Calicatas.

6.4.4. Resultados de la técnica SPAC

Arreglos de calicatas SPAC en la avenida 1ra Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente

A continuación se describe el procedimiento de aplicación del método de autocorrelación espacial SPAC tradicional modificado que usamos para la mayoría de los arreglos. En todos los sitios estudiados se obtuvieron registros de 3,600 segundos de grabación en cada una de las aperturas usadas (5 m).

En la figura 63 se muestra un ejemplo de registros en los vértices del triángulo registrado en la avenida 1ra Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente. A pesar de la larga duración de los registros, se puede observar la ocurrencia de varios transitorios que no son comunes a los cuatro registros, por lo que las ventanas son seleccionadas cuidadosamente evitando estos transitorios.

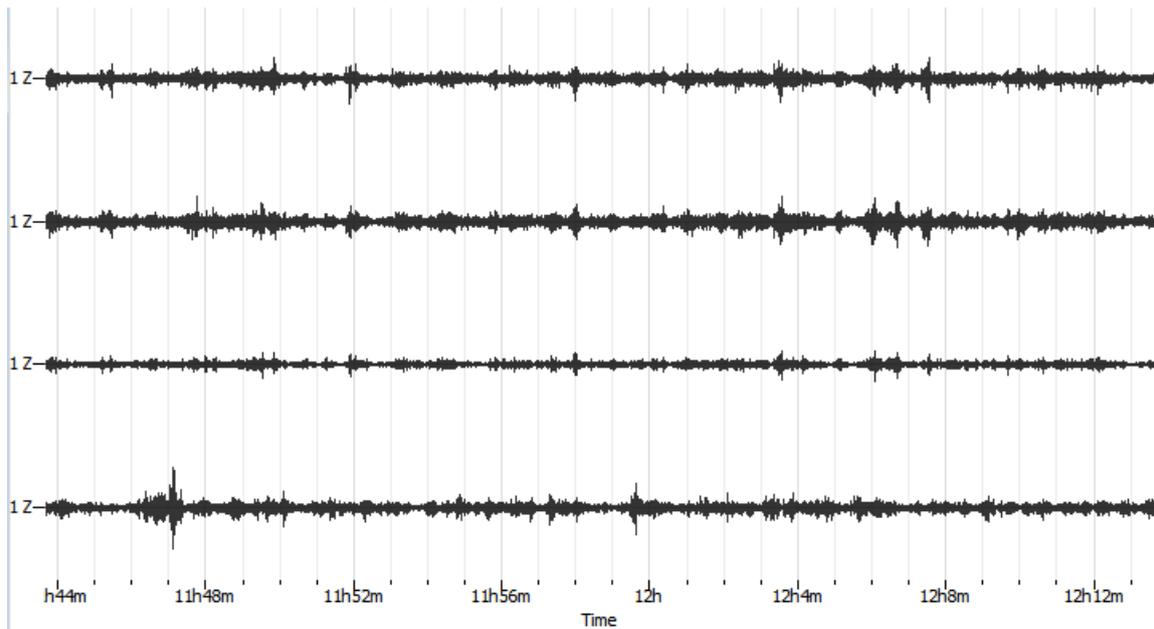


Figura 63. Gráfica de los registros de microtemores registrados en la 1ra Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, para el arreglo triangular de 5 m. Las unidades en el eje horizontal están en segundos y en el eje vertical en volts.

Se usaron sólo las componentes verticales del movimiento de los microtemores para extraer las ondas Rayleigh; en cada triángulo equilátero al hacer mediciones simultáneas se formaron dos triángulos y por consiguiente cuatro registros en las estaciones ubicadas en los vértices.

Para un tiempo de grabación de 60 minutos se tomaron ventanas de 60 segundos, por lo tanto se cuenta con 90 espectros de potencia en cada vértice del triángulo equilátero. La primera parte del análisis consistió en obtener las correlaciones entre pares de estaciones de cada triángulo equilátero, donde se verificó que la forma de las funciones de correlación observadas se asemejara a las funciones Bessel de primera especie y orden cero, condición que debe cumplirse puesto que esto es lo que predice la teoría para obtener resultados confiables (Campillo, 2006), como se puede observar en la figura 64.

El promedio de las correlaciones de las 90 ventanas de cada triángulo conduce al coeficiente de autocorrelación y el primer cruce por cero de esta función es la frecuencia de interés para cada triángulo.

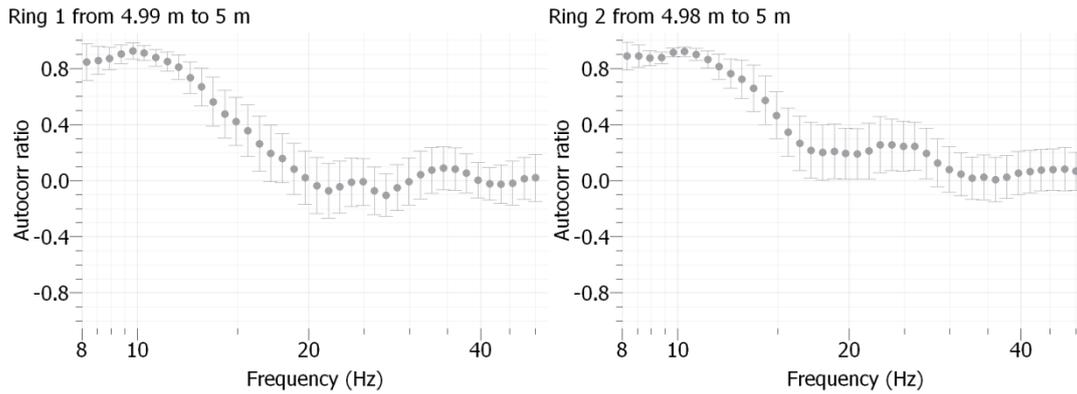


Figura 64. Ejemplo del coeficiente de autocorrelación obtenido para el arreglo de 5 m.

De acuerdo al método propuesto por Aki (1957), se relacionó el coeficiente de autocorrelación con la función Bessel de primera especie y orden cero, en cuyo argumento aparece la dependencia de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh con la frecuencia. Entonces, a partir de los coeficientes de autocorrelación se obtiene la variación de la velocidad de fase en función de la frecuencia de las estaciones de cada triángulo.

Se calcularon tres curvas de velocidad de fase para cada triángulo, las cuales representan el promedio y su correspondiente desviación estándar (superior e inferior). Con las velocidades de fase definidas para cada triángulo individual se construye la curva de dispersión correspondiente de cada arreglo, con las que es posible obtener la ley de velocidades en el sitio estudiado.

Posteriormente, se obtiene la curva de dispersión a partir de la curva de autocorrelación, para después invertir la curva teniendo un modelo inicial del modelo estratigráfico. Después se invierte la curva de autocorrelación con el programa Geopsy, obteniendo así un perfil de velocidades de ondas de compresión y de cizalla logrando el mejor ajuste de inversión.

En la figura 65a se muestra el mejor ajuste de la curva de autocorrelación, teniendo como desajuste (*Misfit*) del 10%; en la figura 65b se tiene la curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión de la curva de autocorrelación; y en la figura 66 se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de compresión y de cizalla del punto estudiado. La figura 67 muestra el perfil de velocidades para cada uno de los arreglos de las calicatas, las ondas de compresión y de cizalla. La figura 68 muestra la tomografía para el perfil de velocidades para todos los arreglos de las calicatas, las ondas de compresión (derecha) y de cizalla (izquierda).

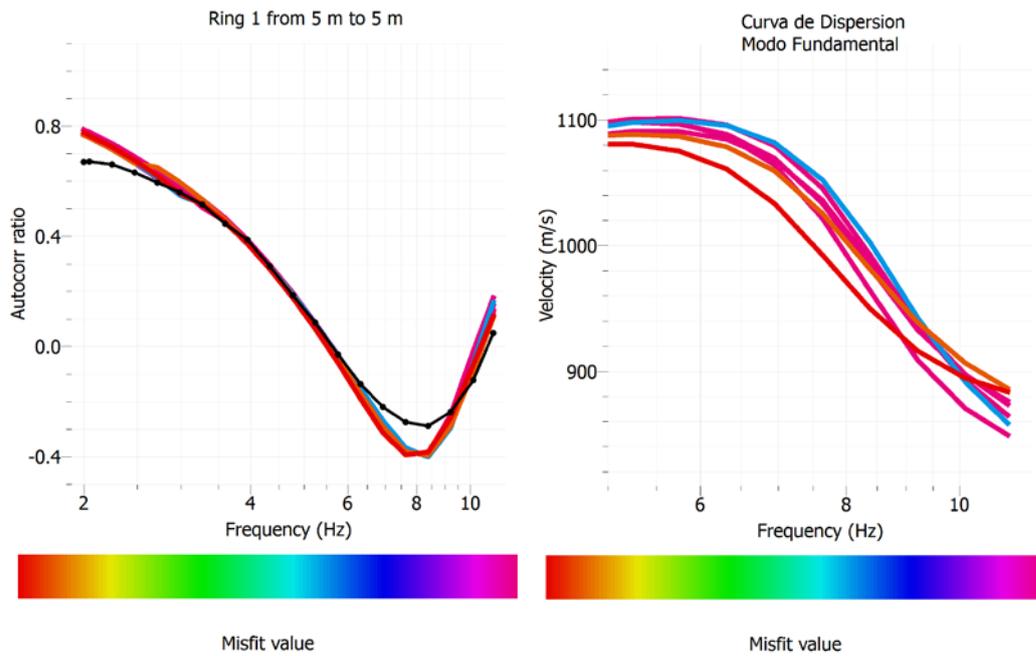


Figura 65. Izquierda ajuste de la curva de autocorrelación. Figura derecha, curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión.

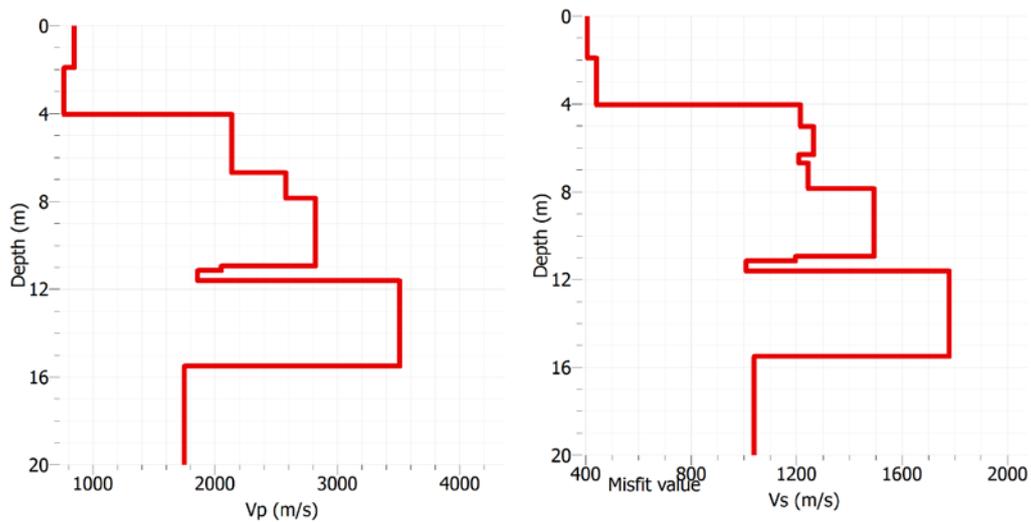


Figura 66. Perfil de velocidades para las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha).

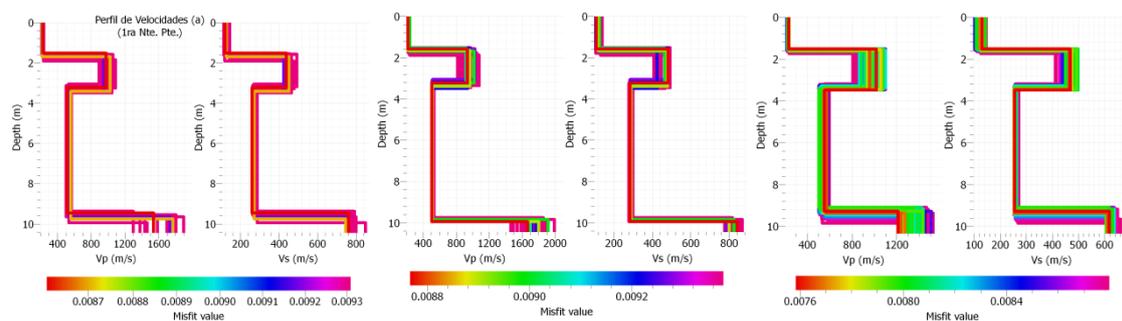


Figura 67. Perfil de velocidades para cada uno de los arreglos de las calicatas, las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha).

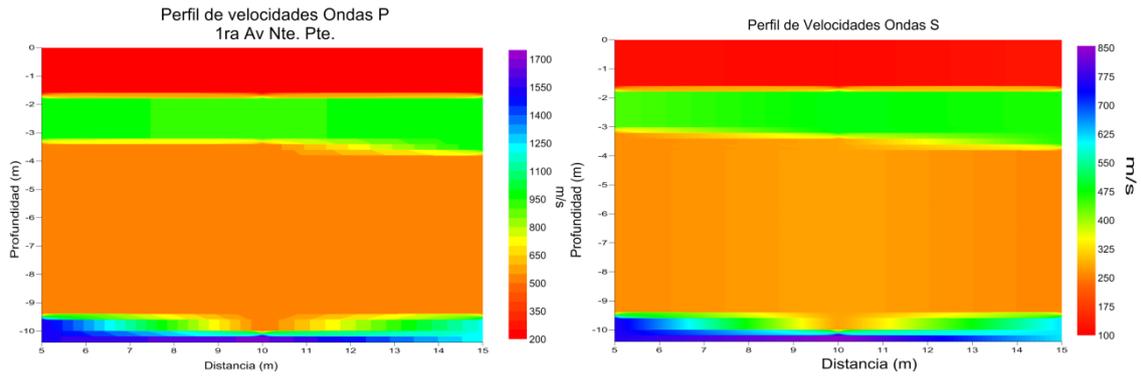


Figura 68. Tomografía para el perfil de velocidades para todos los arreglos de las calicatas, las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha).

En la figura 69 se muestran fotografías del arreglo de las calicatas SPAC en el centro de la ciudad en la avenida 1ra Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente.



Figura 69. Fotografías que muestran el arreglo de calicatas SPAC en el centro de la ciudad en la avenida 1ra Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente.

Arreglos de calicatas SPAC en la 6ta Oriente entre 12 y 13 Norte

El proceso fue similar que en los arreglos realizados en la avenida 1ra Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente, donde se usaron sólo las componentes verticales del movimiento de los microtremores para extraer las ondas Rayleigh; en cada triángulo equilátero de 10 m de lado, formándose dos triángulos, por consiguiente cuatro registros que se midieron simultáneamente en las estaciones ubicadas en los vértices.

En la figura 70, donde se muestra el promedio de las correlaciones de las 90 ventanas de cada triángulo conduce al coeficiente de autocorrelación y el primer cruce por cero de esta función es la frecuencia de interés para cada triángulo.

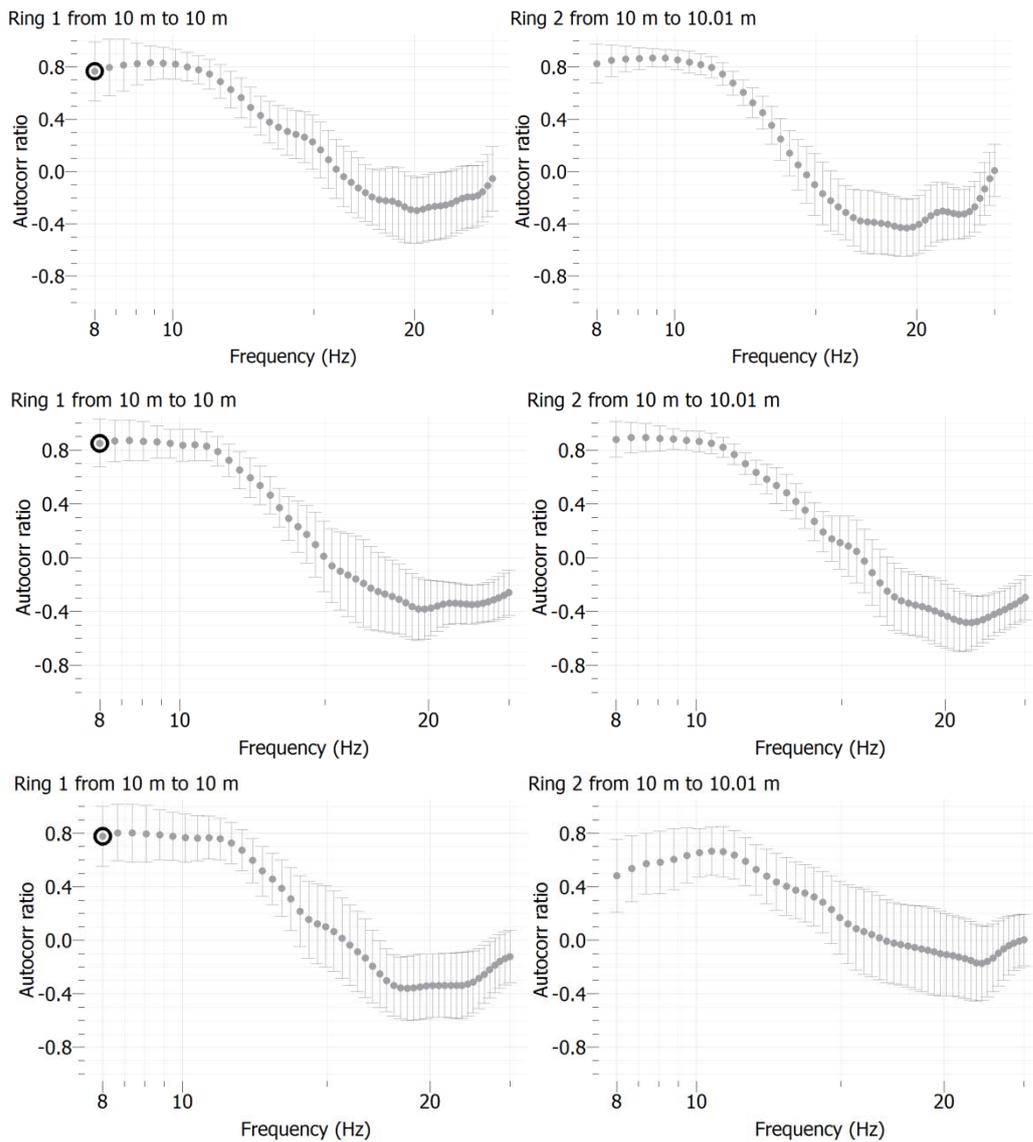


Figura 70. Ejemplo del coeficiente de autocorrelación obtenido para tres arreglos de 5 m.

En la figura 71 se muestra el mejor ajuste de la curva de autocorrelación, en la figura 72 se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de compresión de cizalla de los puntos estudiados y en la figura 73 se muestra una tomografía de velocidades considerando todos los puntos analizados.

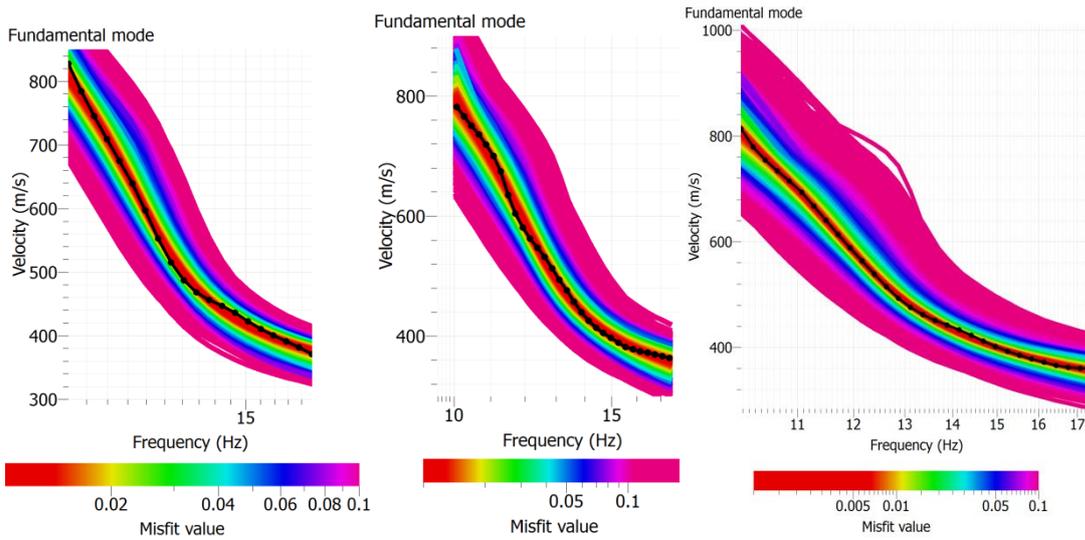


Figura 71. Curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión.

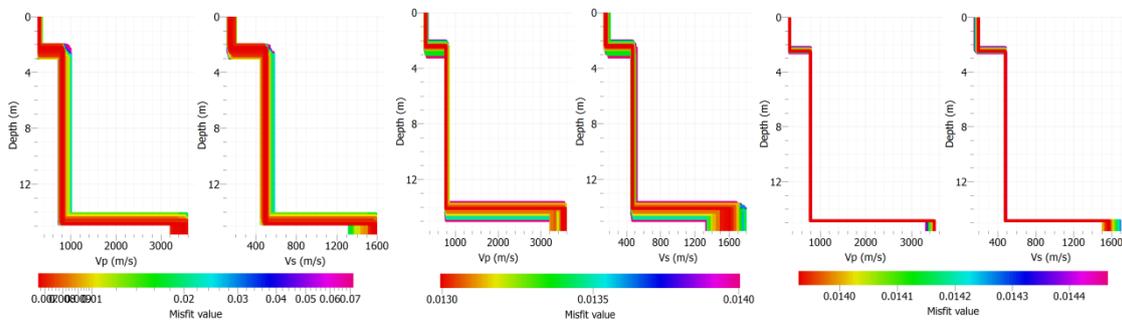


Figura 72. Perfil de velocidades para cada uno de los arreglos de las calicatas, las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha).

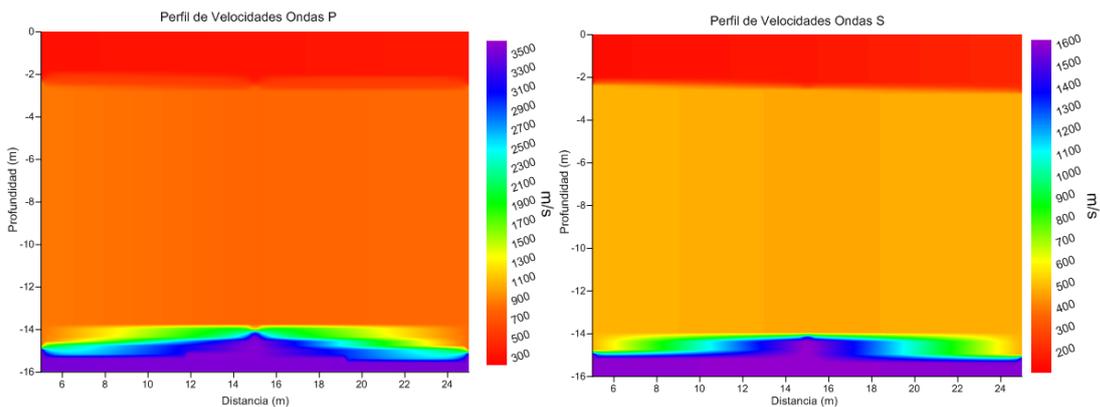


Figura 73. Tomografía para el perfil de velocidades para todos los arreglos de las calicatas, las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha).

Arreglos SPAC en el estacionamiento del estadio de fútbol Víctor Manuel Reyna

Se realizaron grabaciones de 120 minutos en las estaciones con correlación lineal, se colocó la registradora al centro y los sensores a distancias de 25 m a cada lado de la registradora. Se hizo lo mismo en una calle paralela, por lo que

se formó una figura rectangular con los sensores de 50 por 70 m, todas las mediciones a 100 muestras por segundo en todos los arreglos, se utilizaron cuatro sensores triaxiales de velocidad de un segundo de periodo y como registradoras se colocaron dos grabadoras “Makalu de Kinematics”.

Se usaron sólo las componentes verticales del movimiento de los microtremores para extraer las ondas Rayleigh. Para un tiempo de grabación de 120 minutos se tomaron ventanas de 30 segundos, por lo tanto se cuenta con 360 espectros de potencia en cada vértice. La primera parte del análisis consistió en obtener las correlaciones entre pares del rectángulo, donde se verificó que la forma de las funciones de correlación observadas se asemejara a las funciones Bessel de primera especie y orden cero, condición que debe cumplirse puesto que esto es lo que predice la teoría para obtener resultados confiables (Campillo, 2006), como se puede observar en la figura 74.

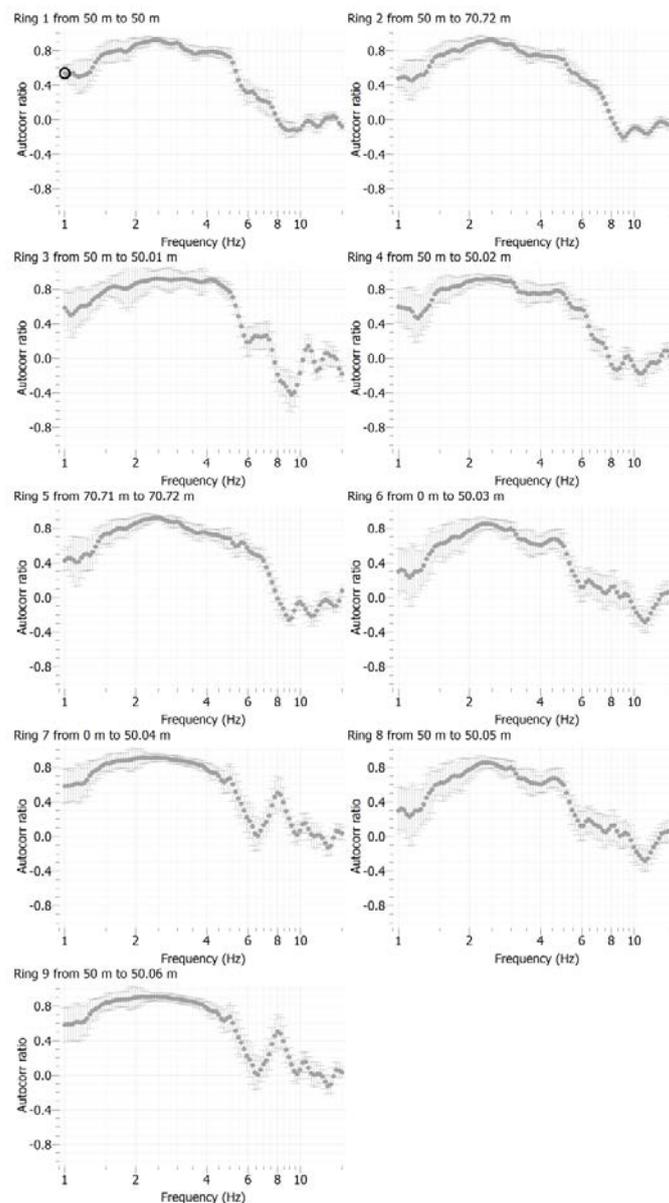


Figura 74. Coeficiente de autocorrelación obtenido para los 9 anillos del arreglo en el estacionamiento del estadio.

En la figura 75 se muestra el mejor ajuste de la curva de autocorrelación teniendo como desajuste (*Misfit*) del 5% y la curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión de la curva de autocorrelación y en la figura 76 se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de compresión y de cizalla.

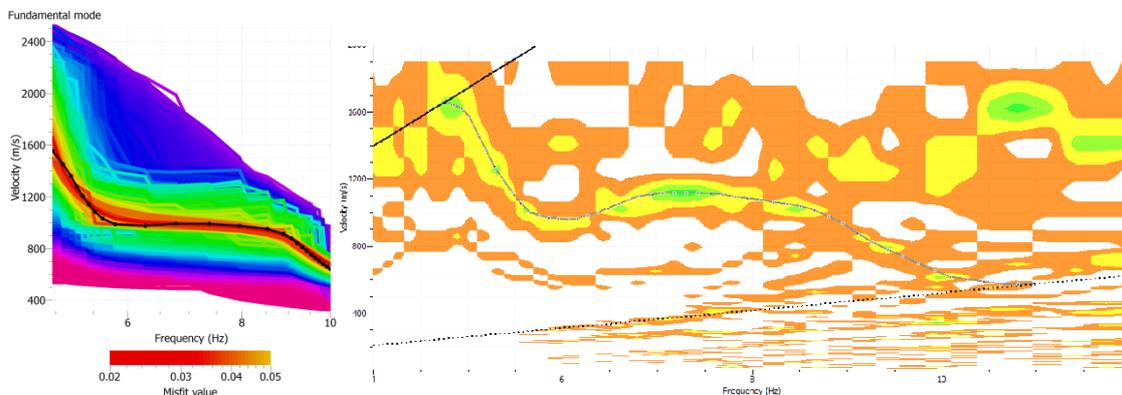


Figura 75. Ajuste de la curva de autocorrelación y dispersión en el estadio Víctor Manuel Reyna.

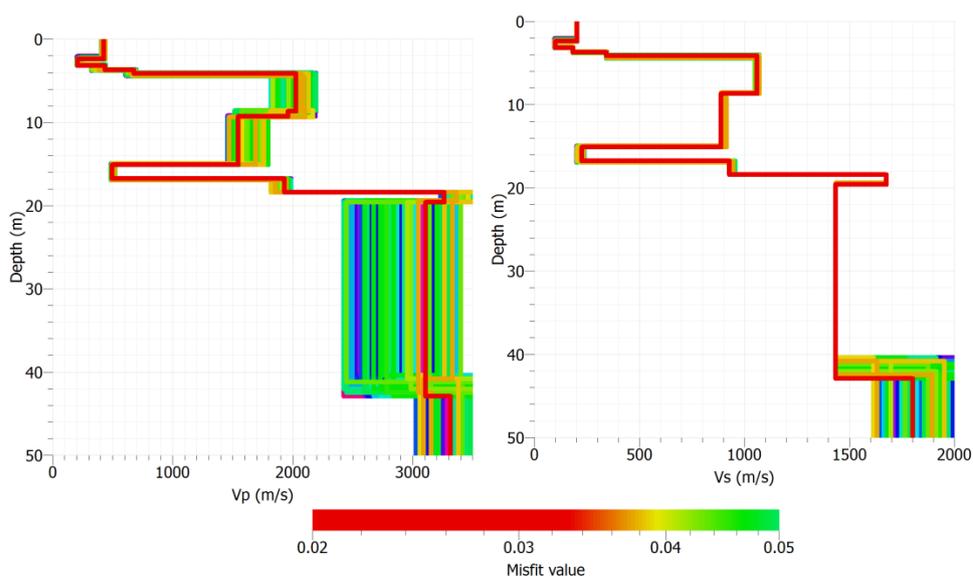


Figura 76. Perfil de velocidades para las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha) en el estadio de fútbol Víctor Manuel Reyna.

Arreglos SPAC en el campo de fútbol de la facultad de Ingeniería de la UNACH

Se realizaron grabaciones de 60 minutos en las estaciones con triángulos de lado igual a 5, 15, 30, 50 y 75 m, colocando un sensor como pivote y los otros dos se movieron según la distancia del triángulo realizando en total cinco triángulos, todas las mediciones a 100 muestras por segundo en todos los arreglos, se utilizaron sensores triaxiales de velocidad de un segundo de periodo y como registrador se colocaron dos grabadoras "Makalu de Kinematics" realizando cinco disparos en total.

En todos los sitios estudiados se obtuvieron registros de 3,600 segundos de grabación en cada una de las aperturas usadas. En la figura 77 se muestra un ejemplo de registros en los vértices del triángulo de registrado de 75 m. A pesar de la larga duración de los registros, se puede observar la ocurrencia de varios transitorios que no son comunes a los tres registros. Por lo que las ventanas son seleccionadas cuidadosamente evitando estos transitorios (vibraciones producidas por autos, paso de personas, etc.).

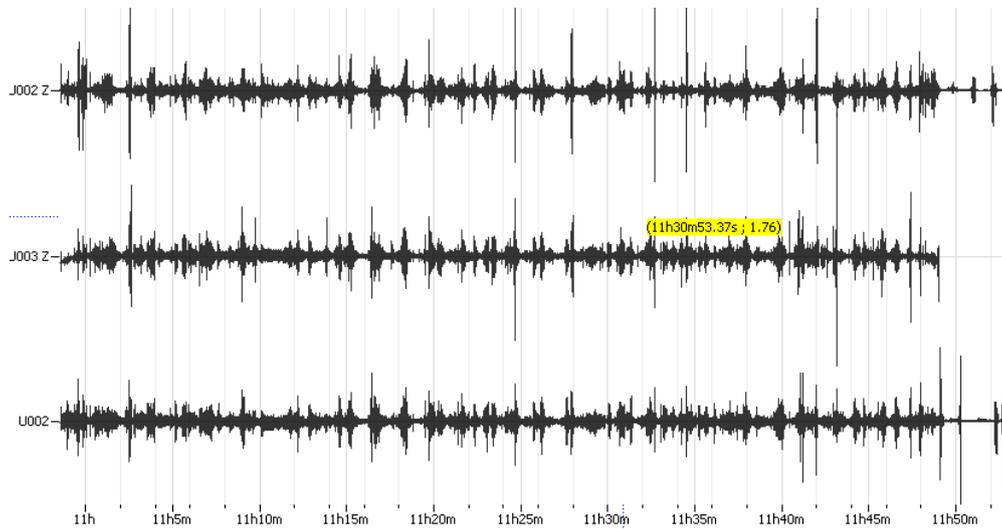


Figura 77. Gráfica de los registros de microtremores registrados en la UNACH, en Tuxtla Gutiérrez, para el arreglo triangular de 75 m. Las unidades en el eje horizontal están en segundos y en el eje vertical están en volts.

Se usaron sólo las componentes verticales del movimiento de los microtremores para extraer las ondas Rayleigh. Para un tiempo de grabación de 30 minutos se tomaron ventanas de 30 segundos, por lo tanto se cuenta con 90 espectros de potencia en cada vértice del triángulo equilátero. La primera parte del análisis consistió en obtener las correlaciones entre pares de estaciones de cada triángulo equilátero, donde se verificó que la forma de las funciones de correlación observadas se asemejara a las funciones Bessel de primera especie y orden cero, condición que debe cumplirse puesto que esto es lo que predice la teoría para obtener resultados confiables (Campillo, 2006), como se puede observar en la figura 78.

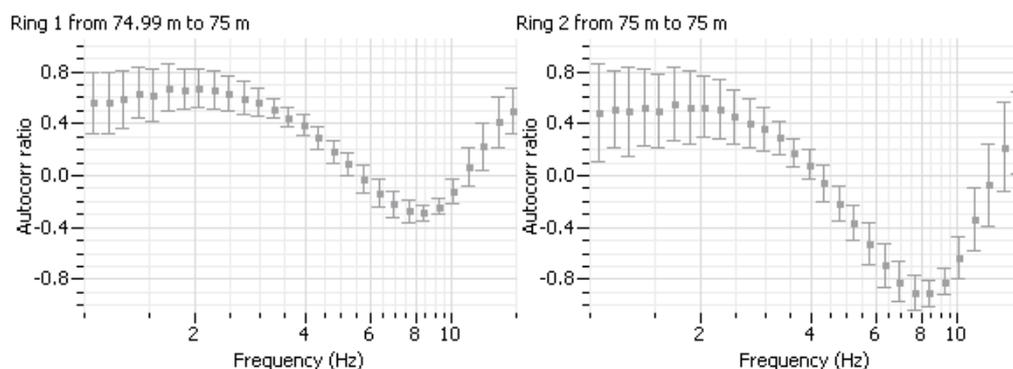


Figura 78. Ejemplo del coeficiente de autocorrelación obtenido para el arreglo de 75 m de la UNACH.

En la figura 79 se muestra el mejor ajuste de la curva de autocorrelación teniendo como desajuste (*Misfit*) del 5%, se tiene la curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión de la curva de autocorrelación y en las figuras 80 y 81 se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de compresión y de cizalla.

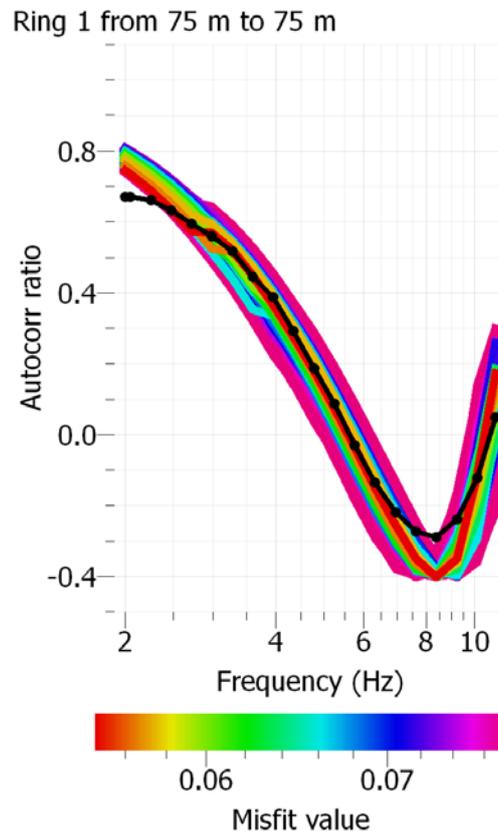


Figura 79. Ajuste de la curva de autocorrelación en la UNACH.

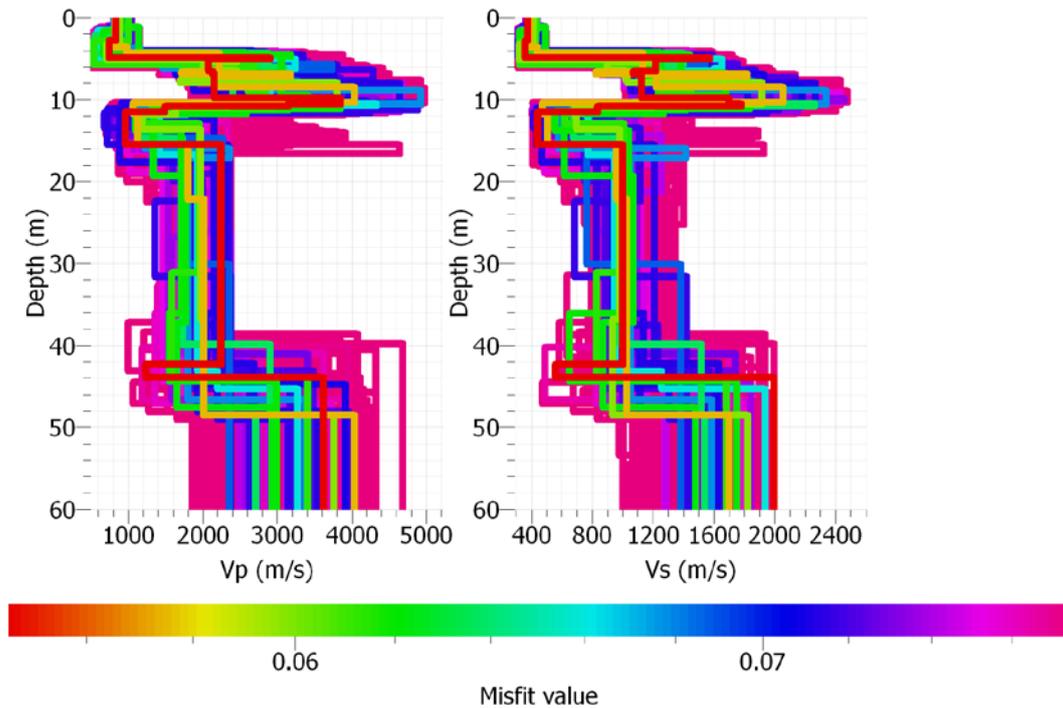


Figura 80. Perfil de velocidades para las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha) en la facultad de Ingeniería de la UNACH.

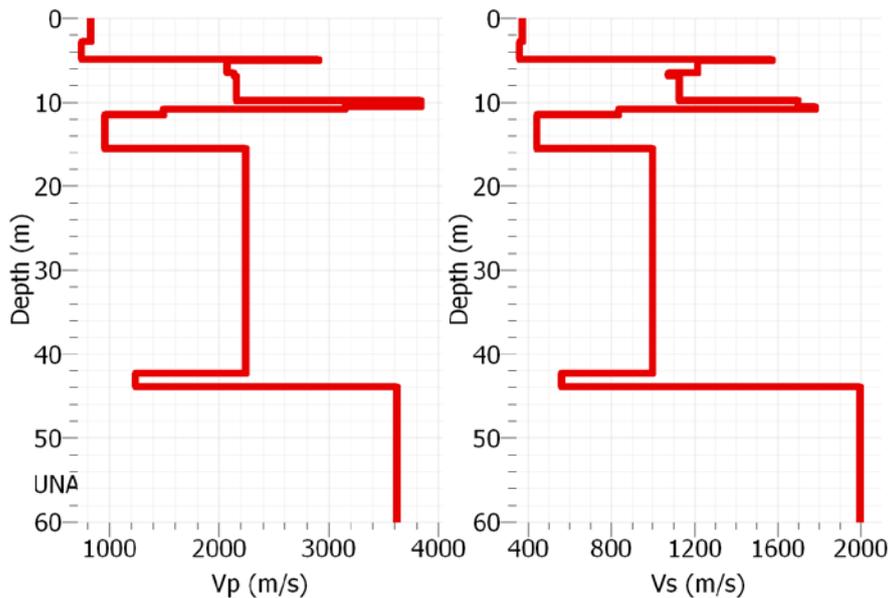


Figura 81. Perfil de velocidades con ajuste del 95% para las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha), en la UNACH.

El perfil de velocidades presentado se correlacionó con el estudio de mecánica de suelos elaborado para una estructura cercana (aproximadamente a 1,500 m de la UNACH), realizando un perfil estratigráfico de sondeo, mediante el cual representan un corte del suelo en estudio hasta la profundidad alcanzada en los sondeos, en dicho perfil se indican las características geotécnicas del subsuelo, los resultados de las pruebas de campo y los del laboratorio, así

como el nivel de aguas freáticas, el cual en este caso específico, se localizó a 5.50 m, dentro de la profundidad explorada en los sondeos.

En total se localizaron tres estratos de suelo, mismos que se clasifican como arcillas. La primera, una arcilla expansiva de color negro de 0 a 4.50 m, el segundo estrato un caliche arcilloso de color café claro de 4.50 a 7.50 m. El espesor de este segundo estrato fue definido por la profundidad de exploración. A partir de los 7.50 m, se localizó una arcilla de color café claro, mismas que por sus características plásticas es la misma hasta los 30 m, con muy pequeñas variaciones, lo que si varía es el contenido de las arenas. El número de golpes registrados en la prueba de penetración estándar en este sondeo, se presenta en el cuadro 3.

Para el cálculo de la capacidad de carga, este suelo es considerado como un suelo cohesivo-friccionante y se aplica la teoría del Dr. Karl von Terzaghi, para el cálculo de la capacidad de carga. El límite líquido tuvo variaciones del 51% al 55.5% de los 7.50 a los 15.00 m de los 15.00 m, hasta los 22.50 m, el límite líquido varió de un 48% a un 45%; y el límite líquido cambió de un 51.7% a un 42.8% de los 22.50 m hasta los 30.00 m, el índice plástico varió de un 26.2% hasta un 39.8% en este intervalo de 7.50 m a los 30.00 m. el cálculo de la capacidad de carga. El límite líquido tuvo variaciones del 51% al 55.5% de los 7.50 a los 15.00 m; de los 15.00 m, hasta los 22.50 m, el límite líquido varió de un 48% a un 45% y el límite líquido cambió de un 51.7% a un 42.8% de los 22.50 m hasta los 30.00 m.

Cuadro 3. Propiedades físicas geotécnicas considerando el estudio del centro de la ciudad.

Espesor del estrato (m)	Estrato número	Número de golpes promedio	Características geotécnicas
De 0.00 a 4.50	1	5	Arcilla expansiva de color negro de consistencia blanda y compresibilidad alta
De 4.50 a 7.50	2	25	Caliche arcilloso de color café claro de consistencia media a dura y compresibilidad baja
De 7.50 a 30.00	3	4	Arcilla con arena de color café claro de consistencia media a blanda y compresibilidad alta

En la figura 82 se muestran fotografías que ilustran el arreglo de tradicional SPAC en el campo de fútbol de la facultad de Ingeniería de la UNACH.



Figura 82. Fotografías que muestran el arreglo SPAC en el campo de fútbol de la facultad de Ingeniería de la UNACH.

Arreglos SPAC en ciudad Universitaria de la UNICACH

Se realizaron grabaciones de 30 minutos en las estaciones con triángulos con lados de 5, 15, 30, 50 y 75 m, colocando un sensor como pivote y los otros dos se movieron según la distancia del triángulo realizando en total cinco triángulos. Todas las mediciones se realizaron a 100 muestras por segundo en todos los arreglos, se utilizaron sensores triaxiales de velocidad de un segundo de periodo y se uso como registrador se colocaron dos grabadoras “Makalu de Kinematics” realizando cinco disparos en total.

La primera parte del análisis consistió en obtener las correlaciones de cada triángulo equilátero, donde se verificó que la forma de las funciones de correlación observadas se asemejara a las funciones Bessel de primera especie y orden cero, como se puede observar en la Figura 83.

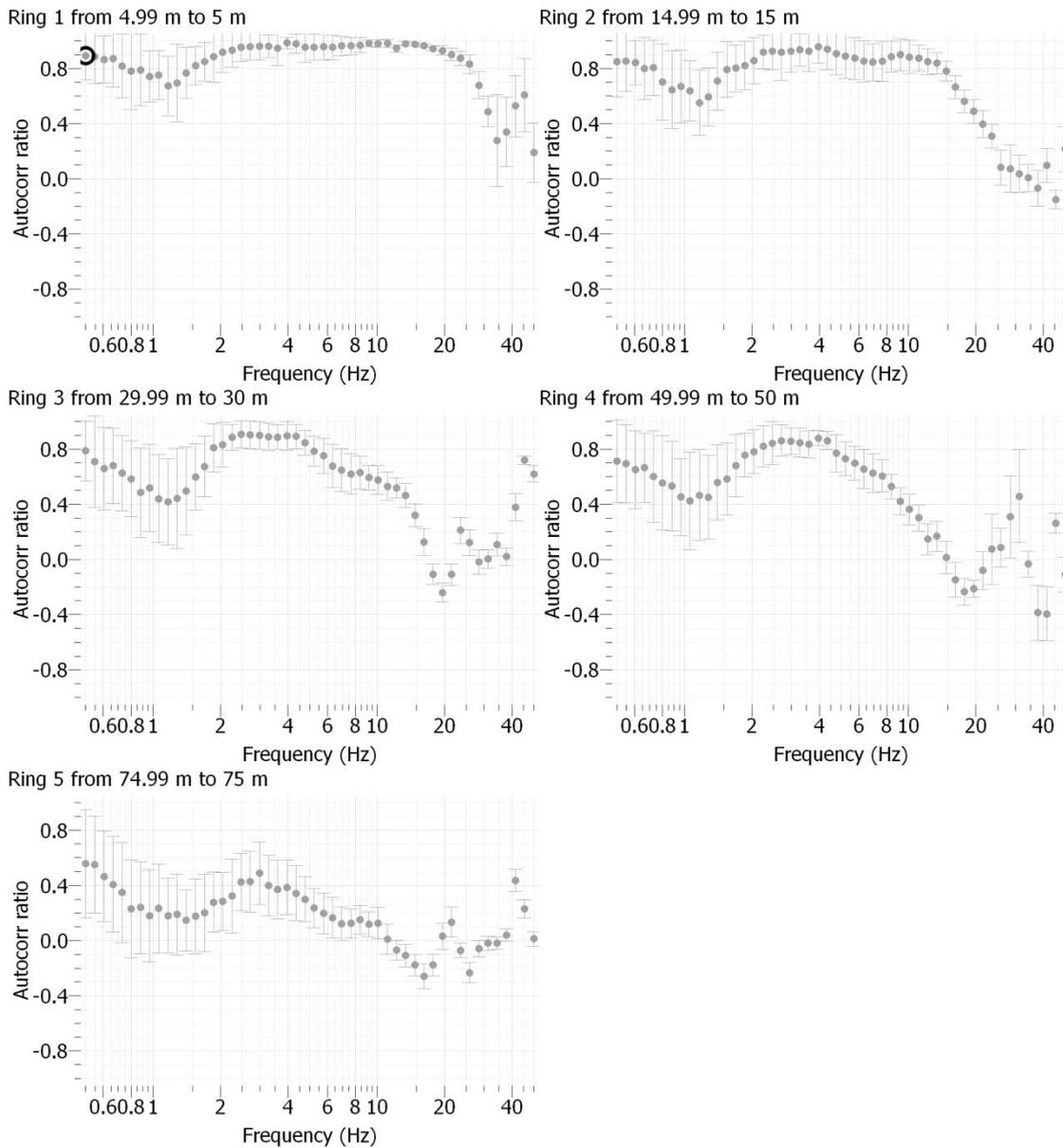


Figura 83. Ejemplo del coeficiente de autocorrelación obtenido los distintos anillos de 5, 15, 30, 50 y 75 m de la UNICACH.

En la figura 84 se muestra el mejor ajuste de la curva de autocorrelación teniendo como desajuste (*Misfit*) del 5% y en la figura 85 se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de compresión y de cizalla.

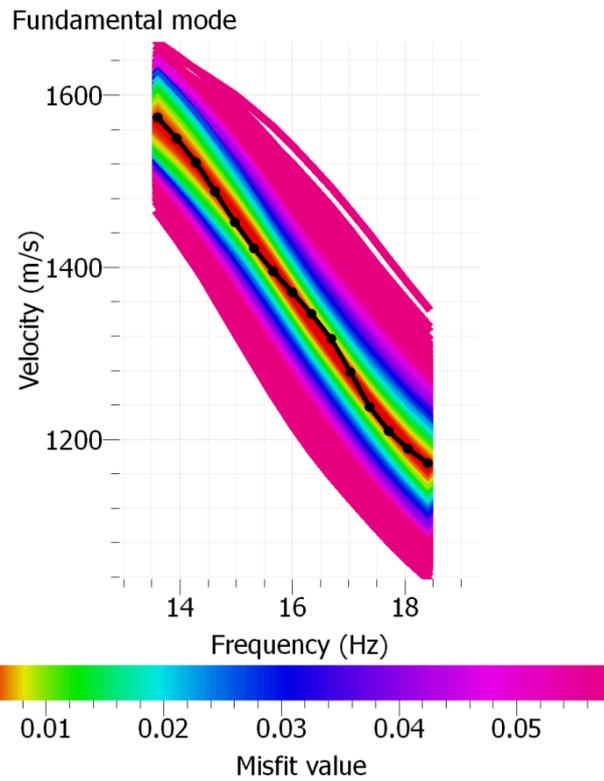


Figura 84. Ajuste de la curva de autocorrelación en la UNICACH.

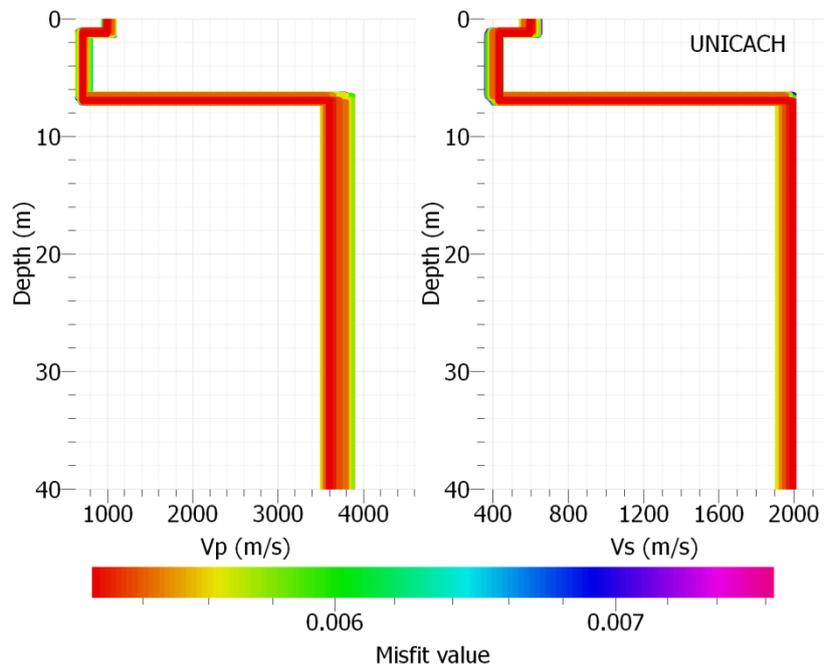


Figura 85. Perfil de velocidades con ajuste del 95% para las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha), en la UNICACH.

En la figura 86 se muestran con fotografías el arreglo de tradicional SPAC en ciudad universitaria de la UNICACH en el libramiento poniente de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.



Figura 86. Fotografías que ilustran el arreglo SPAC en ciudad universitaria de la UNICACH.

Arreglos SPAC en la preparatoria CETIS 138

Se realizaron grabaciones de 30 minutos en las estaciones con triángulos de lado igual a 5, 15, 30, 50, 75 y 100 m, colocando un sensor como pivote y los otros dos se movieron según la distancia del triángulo realizando en total cinco triángulos, todas las mediciones a 100 muestras por segundo en todos los arreglos, se utilizaron sensores triaxiales de velocidad de un segundo de periodo y como registrador se colocaron dos grabadoras “Makalu de Kinematics” realizando cinco disparos en total.

La primera parte del análisis consistió en obtener las correlaciones de cada triángulo equilátero, donde se verificó que la forma de las funciones de correlación observadas se asemejara a las funciones Bessel de primera especie y orden cero, como se puede observar en la figura 87.

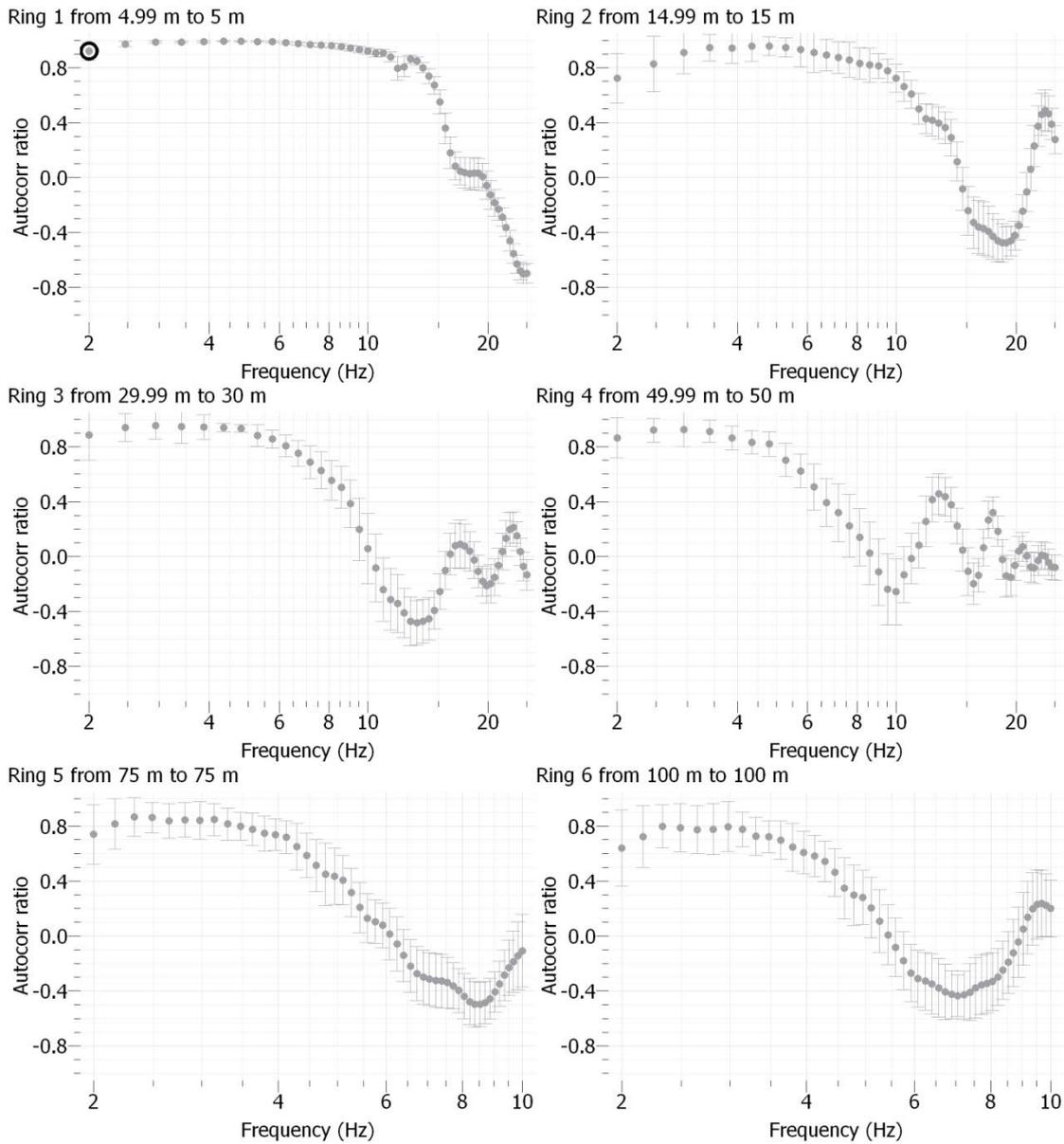


Figura 87. Ejemplo del coeficiente de autocorrelación obtenido los distintos anillos de 5, 15, 30, 50, 75 y 100 m en preparatoria.

En la figura 88 se muestra el mejor ajuste de la curva de autocorrelación teniendo como desajuste (*Misfit*) del 3% y en la figura 89 se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de compresión y de cizalla.

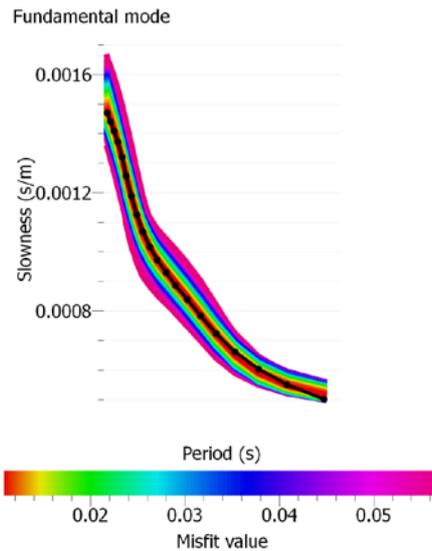


Figura 88. Ajuste de la curva de autocorrelación en preparatoria.

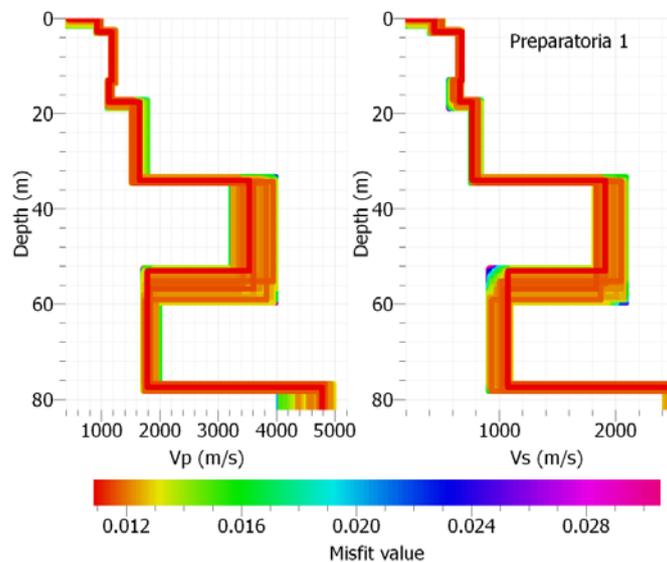


Figura 89. Perfil de velocidades con ajuste del 95% para las ondas de compresión (izquierda) y de cizalla (derecha), en la preparatoria.

Arreglos de correlación en pares SPAC en el exterior de la Catedral de San Marcos

Se realizó una prueba de la técnica de SPAC en la catedral de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, con algunas modificaciones de la técnica. Flores (2004), afirma que la posibilidad de realizar las mediciones sólo con dos estaciones es algo en lo que se tiene que seguir trabajando, ya que implica mucho más cuidado y tiempo en el análisis de los datos. Sin embargo, la gran ventaja es que sólo se requieren de dos instrumentos para encontrar un modelo de velocidades a partir de registros de microtemores.

A partir de lo anterior, se realizaron las mediciones en la explanada de la catedral con sólo dos equipos, estos equipos consisten en un acelerógrafo Makalu con un sensor externo "Episensor" con una sensibilidad de un $\frac{1}{4}$ de g

(cm/s^2), los registros se tomaron con una longitud de 720 s con un muestreo de 200 muestras/seg.

Se realizaron 6 registros con un arreglo lineal ortogonal, esto es, se hicieron tres pares de registros, para alinearlos y tomar la distancia se utilizó un teodolito, para el primer par (registro 1 y registro 2) se tomó una distancia de 30 m entre sí, el segundo de 60 m (registro 4 y registro 3), y el tercer par se tomó ortogonal a los dos anteriores con una distancia de 40 m (registro 33 y registro 44) cabe señalar que cada par de registros se disparó al mismo tiempo (ver figura 90).

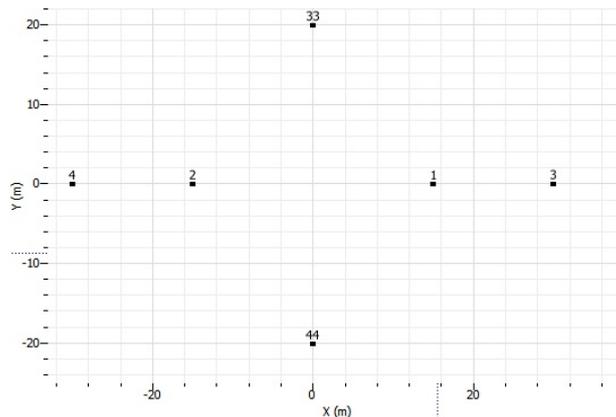


Figura 90. Arreglo geométrico de los registros en la plazoleta de catedral.

Una vez obtenidos los registros, sólo se tomó la componente vertical y se trataron las 6 señales con el software Matlab, esto es para filtrarlas, utilizando un filtro ventana Von Hann pasa bajas de 200 muestras con frecuencia de corte de 60 Hz, en la figura 91, se muestra el filtrado de las señales 1 y 2.

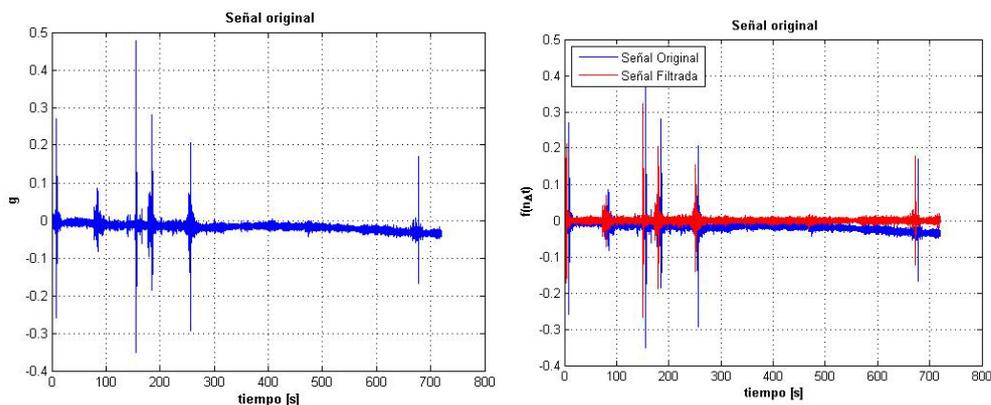


Figura 91. Señal filtrada (rojo) del registro 1 con la señal en crudo (azul).

Una vez filtradas las señales, se trabaja en el software libre Geopsy, el cual tiene una herramienta para procesar técnica de SPAC, en este software se introducen los parámetros de la señal, como frecuencia de muestreo, componente y coordenadas espaciales, una vez reconocida la señal, se procede a realizar anillos, con los cuales toma esas señales dentro de los anillos y obtiene su respectiva correlación, en la figura 92 se observa la

configuración de los anillos, con el cual se trabajó con tres anillos, cada anillo encerrando el par de registros, ya que fueron registrados al mismo tiempo.

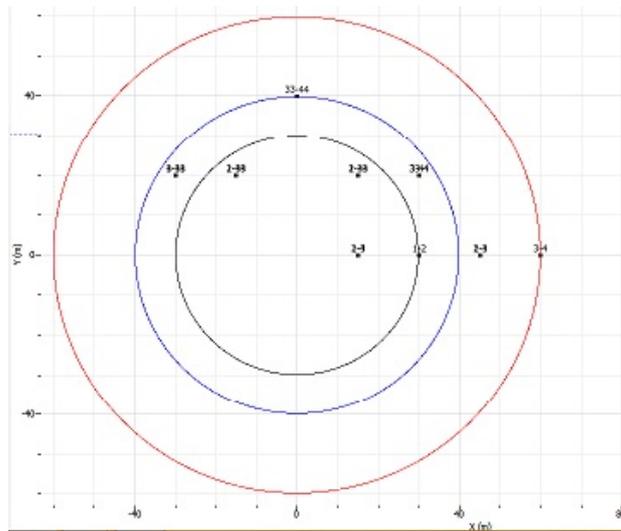


Figura 92. Configuraciones de los anillos.

Una vez configurado los anillos se comienza la autocorrelación, las señales fueron ventaneadas cada 20 s, cabe señalar que se ventaneo con diferentes longitudes, esto para observar que la curva s en frecuencias bajas se aproximara a 1 y que el comportamiento fuera similar. En la figura 93, se observan las curvas de dispersión.

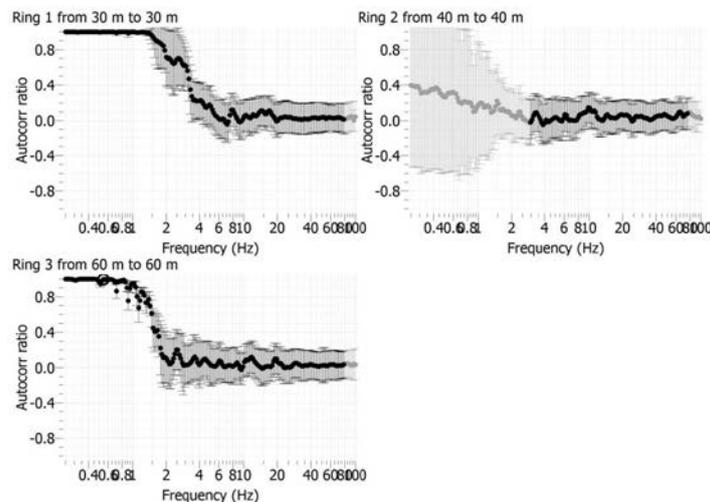


Figura 93. Curvas de correlación para los diferentes anillos.

Como se observa en la figura 93, para la curva de correlación para el anillo 2, no se mejoró, por lo cual fue rechazada en el análisis. Con la herramienta Spac2disp que viene en la paquetería de Geopsy, se realiza la creación de la curva de dispersión. Ver figura 94, en este paso se necesita experiencia para obtener dicha curva.

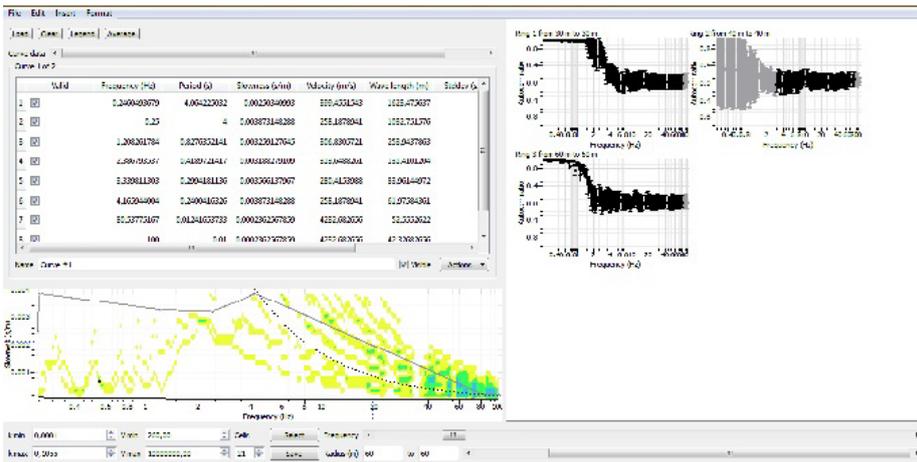


Figura 94. Obtención de la curva de dispersión en Spac2disp.

Al obtener la curva de dispersión se utiliza otra herramienta de Geopsy llamada Dinver que sirve para la inversión de la curva de dispersión y obtener un perfil de velocidades así como la dispersión de las ondas Rayleigh. En la figura 95 se observan las curvas de dispersión, obtenidas a partir de Spac2disp.

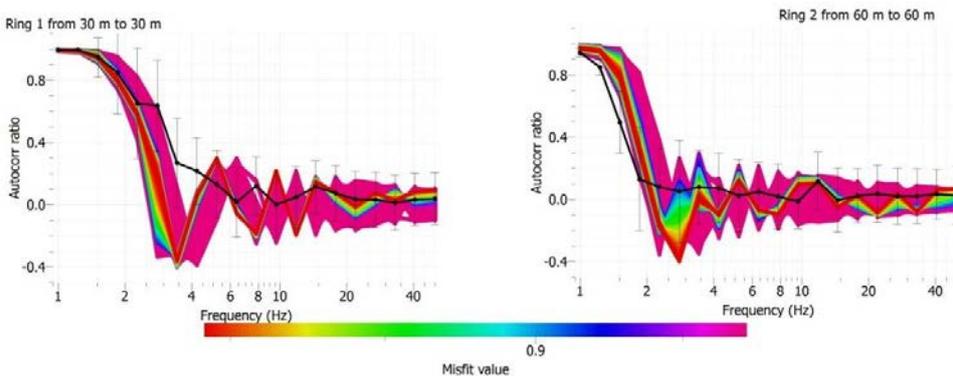


Figura 95. Curvas de dispersión.

Una vez obtenidas las curvas se invierten para obtener un perfil de velocidades, en la figura 96 se observa el resultado de la inversión de los dos anillos.

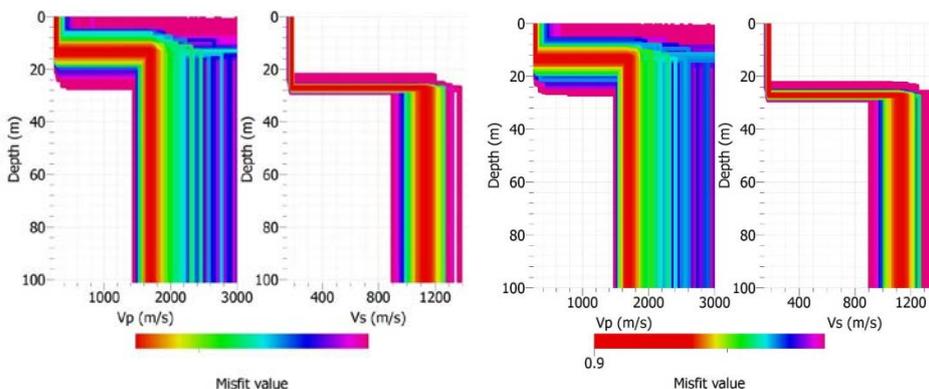


Figura 96. Perfil de velocidades para el anillo 1 y 3 respectivamente.

En los dos perfiles de velocidades podemos observar dos cambios que se asocian a cambios litológicos, para el primer perfil de la onda p se tiene un cambio a una profundidad de aproximadamente 15 m y se aprecia otro cambio a 28 m, para los primeros 15 m se tiene una velocidad de 290 m/s y después de los 15 m se tiene una velocidad de 1,950 m/s, para el primer perfil de la onda s se observa el cambio de velocidad a 28 m de profundidad, para los primeros 28 m se tiene una velocidad de 180 m/s y después de los 28 m se tiene una velocidad de 1,250 m/s.

Para el perfil 2 de la onda p se observa un cambio de velocidades entre 12 m y 17 m de profundidad, para los primeros 12 m se tiene una velocidad de 230 m/s y después de los 17 m se tiene una velocidad de 2,000 m/s aproximadamente. Para el perfil de velocidades de la onda s se tiene un cambio a los 25-28 m de profundidad, para los primeros 25 m se tiene una velocidad de 150 m/s y después de los 28 m se tiene una velocidad promedio de 1,300 m/s.

6.4.5. Análisis de los resultados

En las gráficas mostradas en la figura 97 se presenta la superposición de los perfiles de velocidades realizados para las ondas p en la 97a y para las s en la 97b, en ellas se observa de manera global en cuántos tipos de perfiles se puede clasificar la ciudad para evaluar con ellos el espectro de diseño que se emplearía considerando el software PRODISIS de MOC-CFE-2008.

Para la construcción de las gráficas se emplearon los perfiles de los ocho arreglos SPAC no importando las profundidades alcanzadas, las cuales dependían de las características de las longitudes propias del arreglo, así como de las propiedades de los sensores. Adicionalmente se incluyeron dos perfiles de velocidad de dos zonas que no se tenían datos, los cuales fueron obtenidos de dos estudios de efecto de sitio desarrollados en la ciudad.

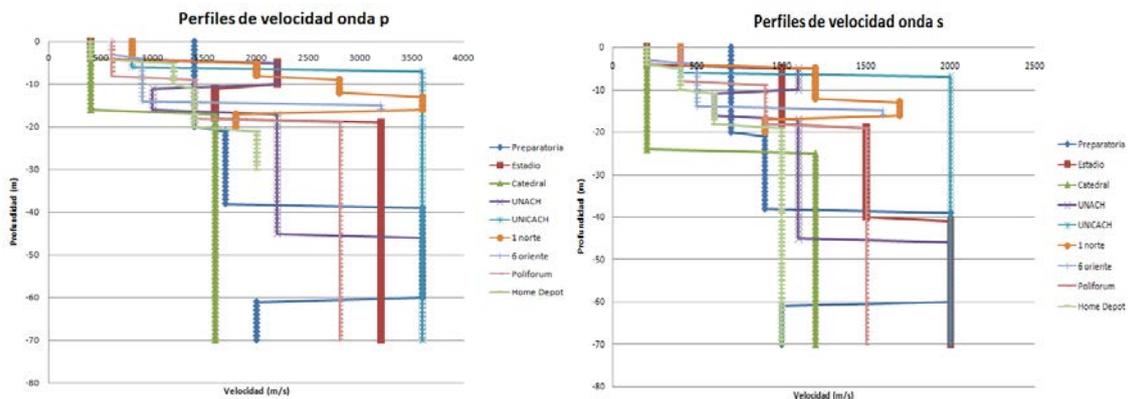


Figura 97. (a) Perfiles de velocidades realizados para las ondas p, (b) para las s.

En el mapa mostrado en la figura 98 se sintetizan la ubicación y los perfiles de velocidad de las ondas p (parte superior) y las ondas s (parte inferior) de los trabajos SPAC realizados en la mancha urbana de Tuxtla Gutiérrez entre los meses de junio y julio de 2011.

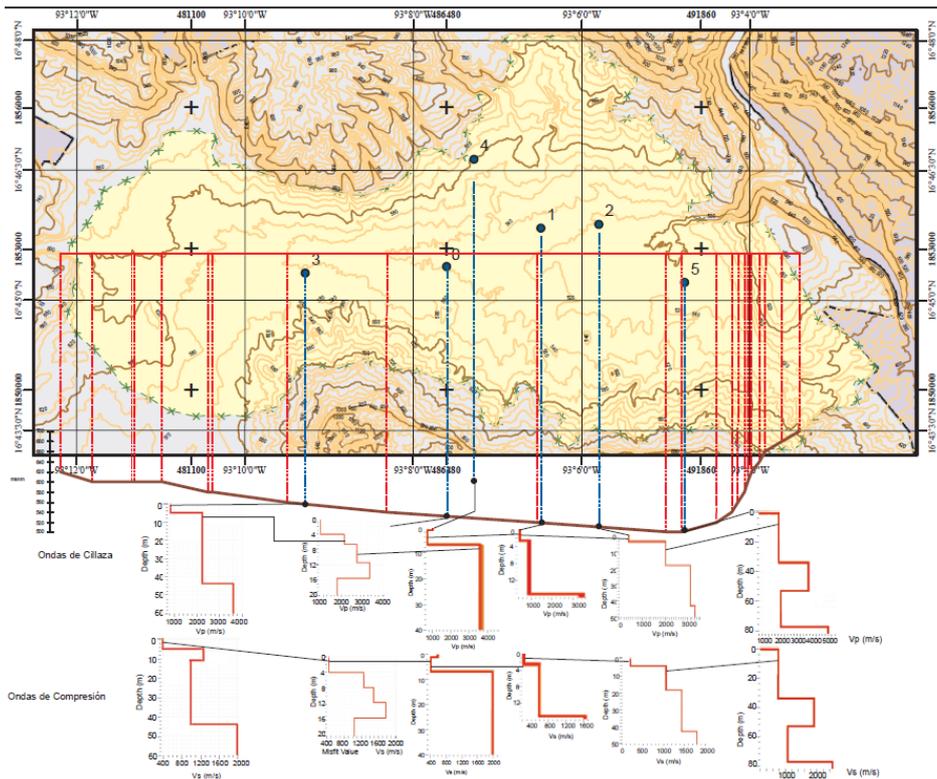


Figura 98. Perfiles de velocidad para ondas s y p, obtenidos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Considerando el programa PRODISIS versión 2.0 del MOC-CFE-2008, podemos obtener el espectro de diseño para las construcciones de ciudades donde no se cuente con normas técnicas como Tuxtla Gutiérrez. Mediante esta metodología se proponen los espectros de roca y espectros de peligro uniforme para tres grupos de construcciones considerando la importancia. En la figura 99 se observa que para el grupo de importancia A y el grupo A+ no es considerable la diferencia del espectro para roca y es el mismo espectro para peligro uniforme.

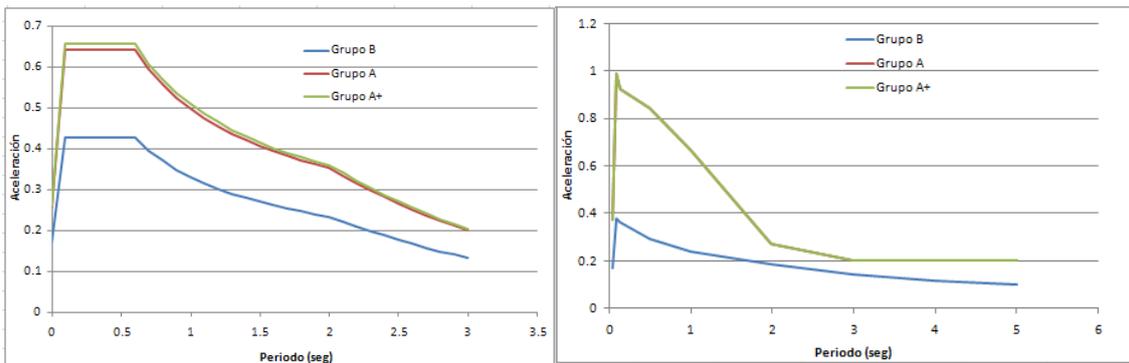


Figura 99. Espectros de respuesta en roca y de peligro uniforme, respectivamente, obtenidos con datos del programa PRODISIS ver. 2.0 del MOC-CFE-2008.

Introduciendo el perfil de velocidades mostrado en la figura 100 que corresponde a un “perfil promedio de velocidades” solo para ver el resultado de incluir el efecto de sitio en el software PRODISIS.

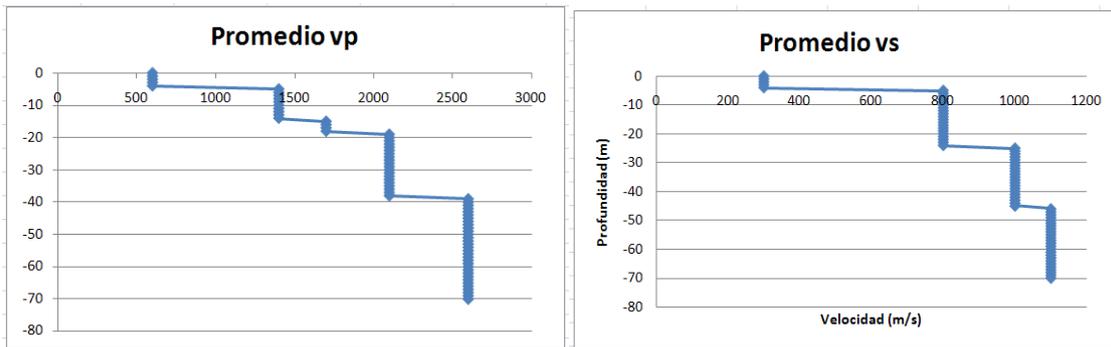


Figura 100. Perfiles de velocidades promedio para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

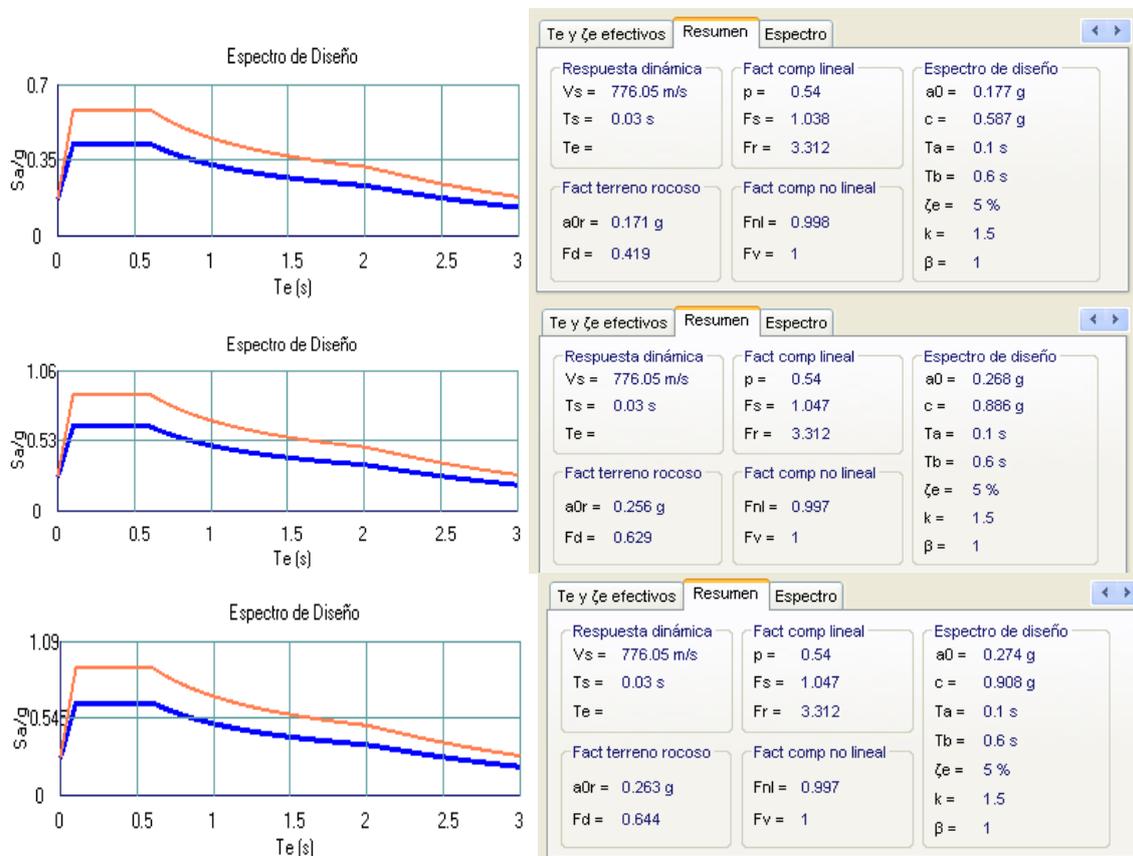


Figura 101. Espectros de respuesta en roca y considerando el efecto de sitio, y la importancia estructural B, A y A+, respectivamente, con el programa PRODISIS ver. 2.0 del MOC-CFE-2008.

En la figura 101 se puede observar que al incluir el efecto de sitio los espectros presentan amplificaciones muy importantes (del orden del 45%), no obstante que el basamento ingenieril o suficientemente rígido se encuentra en los puntos que rebasan las velocidades de 720 m/s, los cuales corresponden a velocidades que se relacionan con profundidades de 6 m en promedio en los sitios donde se realizaron los estudios (salvo en 6ta Oriente y catedral, en el centro, y Home Depot, en la ladera sur), asimismo, estas regiones han presentado daños importantes en los sismos históricos en la ciudad.

7. Peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez

7.1. Análisis del peligro sísmico considerando la metodología del MOC-CFE versiones (1993 y 2008)

Según la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en su Manual de Obras Civiles, capítulo "Diseño por Sismo" de 1993, la República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas (figura 102). Para esta macrozonificación sísmica se utilizaron catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios del siglo pasado, considerando los registros históricos de daños y la aceleración probable del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en nuestro país.

El municipio de Tuxtla Gutiérrez se encuentra localizado en la zona C, de peligro intermedio alto, con aceleraciones de alrededor del 36% de la gravedad. Las distintas zonas son un reflejo de la frecuencia de los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo esperada durante un siglo (periodo de retorno del sismo máximo probable).

La zona A es una zona donde no se tienen registros, ni reportes históricos de sismos en los últimos 80 años y no se espera que las aceleraciones del suelo sean mayores a 10% de la aceleración de la gravedad, mientras que la zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos con bastante frecuencia y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias baja y alta, donde se registran sismos no tan frecuentemente como la zona D, o son afectadas por aceleraciones que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo (CENAPRED, 2006b).

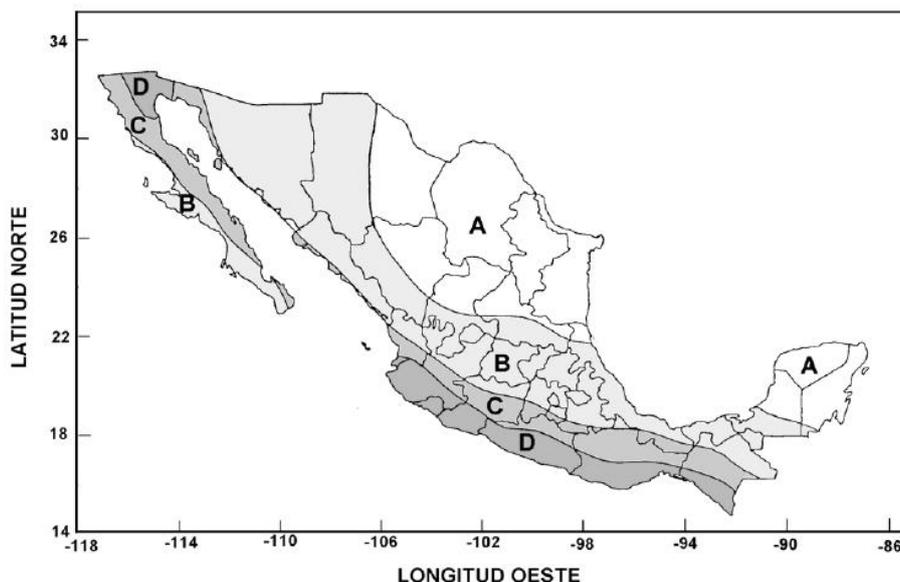


Figura 102. Regionalización sísmica de México del MOC-CFE-1993, (CENAPRED, 2006b).

En la figura 103 el municipio de Tuxtla Gutiérrez se ubica en el mapa de regionalización sísmica del MOC-CFE-1993; encontrándose que todo el municipio es altamente afectado por sismos cuyas intensidades pueden llegar a valores del 36% de aceleración para el periodo de retorno de 100 años. Sin embargo, la localización en el mapa de regionalización sísmica no es suficiente para conocer el peligro local, ya que todo el municipio no está expuesto al mismo peligro, pero nos da una idea clara de la frecuencia y magnitud de los sismos esperados en la ciudad.

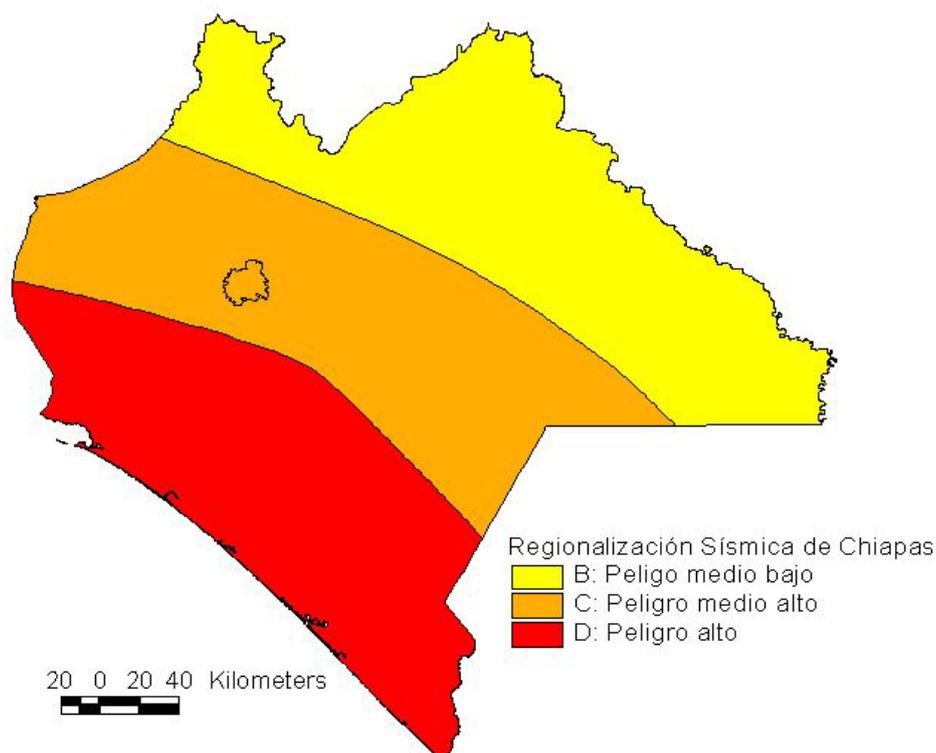


Figura 103. Regionalización sísmica de Chiapas y del municipio de Tuxtla Gutiérrez considerando el MOC-CFE-1993.

Los mapas de peligro sísmico, en términos de intensidades de aceleración de terrenos asociados a periodos de retorno de vida útil de edificaciones, son necesarios para que los especialistas en el diseño realicen nuevas construcciones más seguras, así como aportar espectros para tener elementos firmes que permitan la modificación o refuerzo de las construcciones e infraestructura existente. Estos mapas son, por lo tanto, instrumentos claves en la reducción de la vulnerabilidad y por consiguiente del riesgo sísmico, ya que permiten diseñar las estructuras con demandas más realistas durante el periodo de vida útil.

En su versión reciente del año 2008 el MOC-CFE modificó su metodología para evaluar el peligro sísmico, eliminando la macrozonificación sísmica y sustituyéndola por un mapa de aceleraciones esperadas, considerando la zona geográfica y la importancia del sistema constructivo, aportando espectros de peligro uniforme (espectros que son más realistas ya que llegan a la aceleración del terreno natural) y aceleraciones esperadas para un periodo de

retorno. En el cuadro 4 se ubican los aceleraciones esperadas por tipos de estructura para periodos de retorno superadas a 500 años.

Cuadro 4. Aceleraciones esperadas en Tuxtla Gutiérrez considerando el software PRODISIS ver 2.0 del MOC-CFE-2008.

Tipo de estructura	Aceleración esperada (gals)	Periodo de retorno (años)
B	168	>500
A	252	>500
A+	258	>500

El MOC-CFE-2008 incluye un software llamado PRODISIS versión 2.0, del cual se desprende la imagen de la figura 104, donde se observa el espectro de peligro uniforme en roca, lo cual, se refiere a aceleraciones que no incluyen el efecto de sitio.

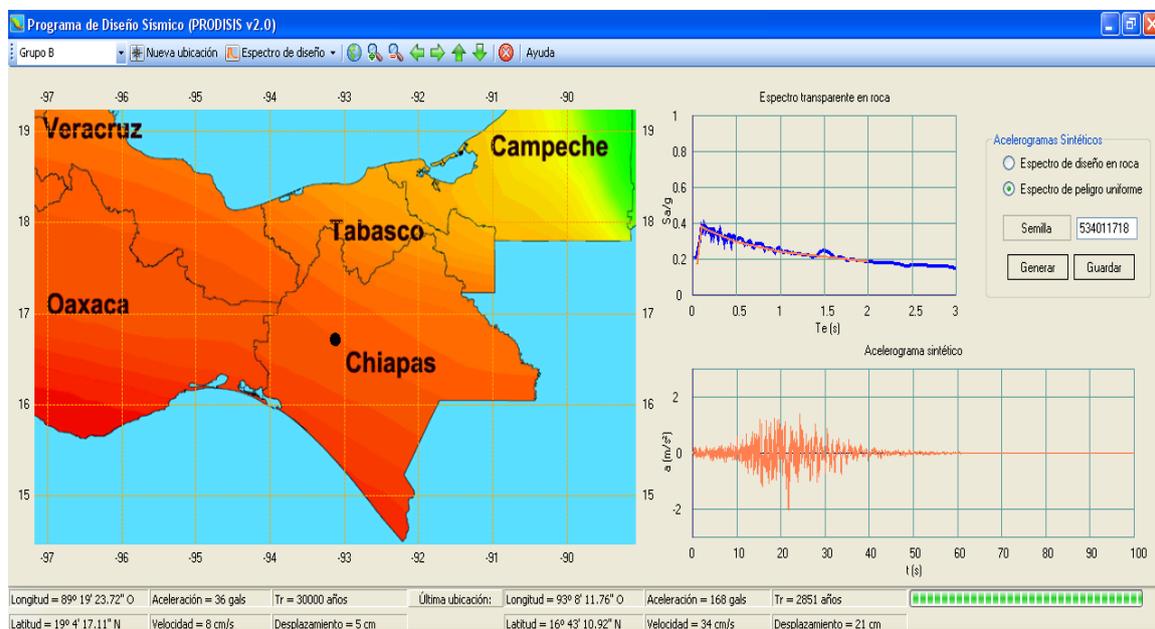


Figura 104. Análisis del peligro sísmico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, empleando el software PRODISIS ver 2.0 del MOC-CFE-2008.

El software tiene la posibilidad de establecer el peligro con el empleo de perfiles de velocidad, para lo cual se pueden considerar los obtenidos mediante SPAC.

7.2. Análisis del peligro sísmico considerando la metodología PSM (2004) y Crisis (2007)

La definición de niveles de peligro en términos de periodo de retorno de aceleraciones (tiempo medio, medido en años, que tarda en repetirse un sismo con el que se exceda una aceleración dada) para el municipio de Tuxtla Gutiérrez son obtenidos a partir de los mapas de valores de intensidad sísmica asociados a un periodo de retorno dado (10, 100 y 500 años), (figura 105, 106

y 107) generadas por el programa PSM 2004 (Peligro Sísmico en México del Instituto de Ingeniería de la UNAM).



Figura 105. Mapa de valores de aceleración máxima asociados a un periodo de retorno de 10 años (34 gals).



Figura 106. Mapa de valores de aceleración máxima asociados a un periodo de retorno de 100 años (81 gals), PSM, 2004.

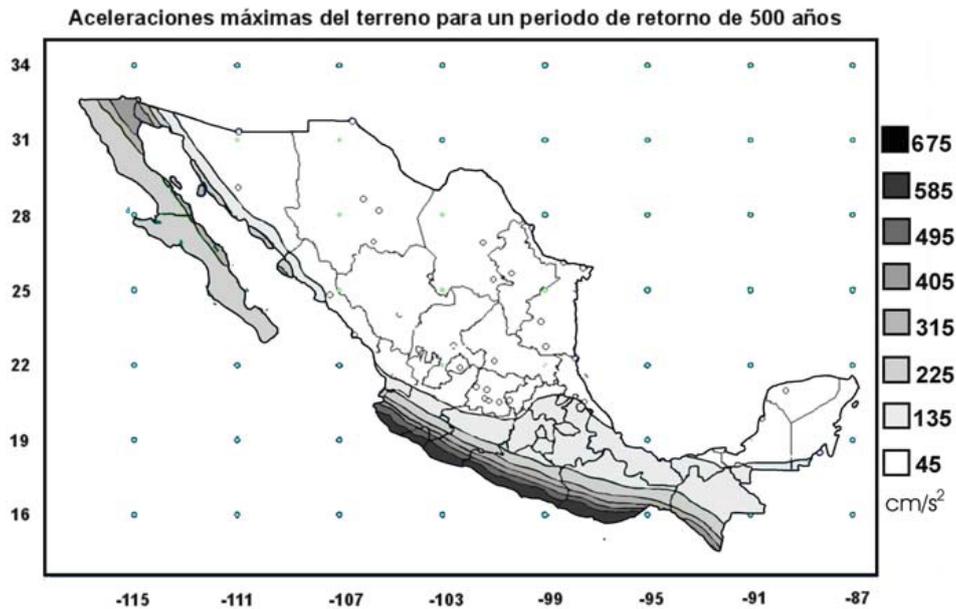


Figura 107. Mapa de valores de aceleración máxima asociados a un periodo de retorno de 500 años (135 gals), PSM, 2004.

Para el municipio de Tuxtla Gutiérrez se procedió a la digitalización de los diferentes mapas de valores de aceleraciones sísmicas esperadas para los distintos periodos de retorno obtenidos mediante los programas PSM, 2004, y Crisis, 2007, y se representó el municipio; siempre considerando que los mapas elaborados por medio de estos programas están definidos para un suelo rocoso con impedancia acústica (sísmica) favorable, es decir, sin amplificación de efecto de sitio. Los mapas obtenidos se presentan mediante las figuras 108, 109 y 110.

Estos mapas son esenciales para la comprensión de las aceleraciones máximas esperadas en un período de retorno dado, el cual se asocia a la probabilidad de falla en el periodo de la vida útil de la construcción; 10 años corresponden a construcciones eventuales; 50 años son viviendas; 100 años estructuras importantes, hospitales, escuelas, bomberos; y 500 años estructuras muy importantes como puentes, museos, etc. La importancia de una edificación está definida por la necesidad de esa edificación después de un siniestro, o el daño secundario que causaría a la ciudad o a otras construcciones el que no estuviera esa estructura operando después del sismo.

En el caso del municipio en estudio, las aceleraciones esperadas parecieran no exceder el umbral del 15% de g , utilizado para instituir un reglamento de construcción. Sin embargo, el cálculo de la aceleración espectral elástica, definido como la aceleración máxima que sufriría un sistema de un grado de libertad, dado su periodo natural de vibrar, al ser sometido a un movimiento sísmico, es una herramienta útil para evaluar el efecto sísmico sobre las estructuras. Con él se pueden obtener los espectros de respuesta, que representan el conjunto de valores máximos de aceleración para un conjunto de sistemas de un grado de libertad de distintos periodos de vibración y obtenidos para un registro sísmico dado (CENAPRED, 2006).

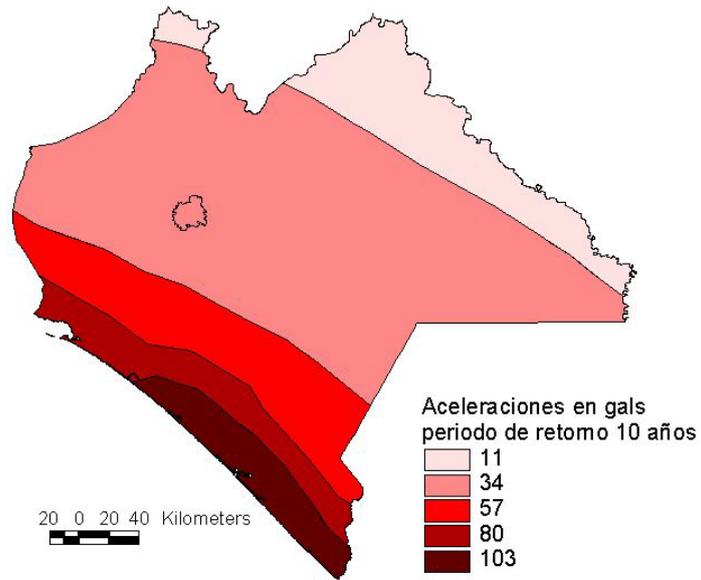


Figura 108. Mapa de aceleración sísmica asociados a un periodo de retorno de 10 años para Tuxtla Gutiérrez, (Crisis, 2007).

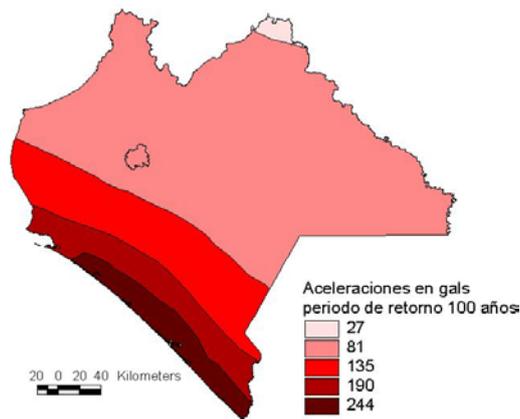


Figura 109. Mapa de aceleración sísmica asociados a un periodo de retorno de 100 años para Tuxtla Gutiérrez, (Crisis, 2007).

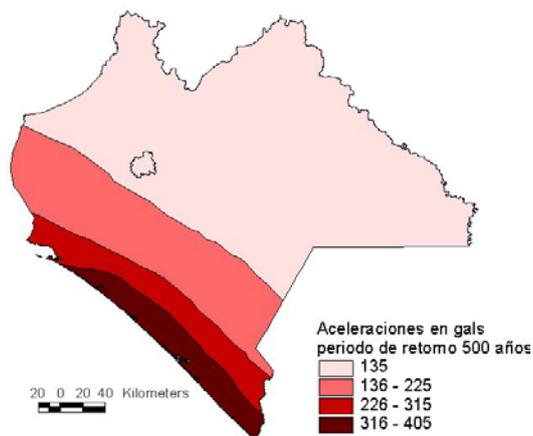


Figura 110. Mapa de aceleración sísmica asociados a un periodo de retorno de 500 años para Tuxtla Gutiérrez, (Crisis, 2007).

Es de vital importancia conocer los periodos de retorno para eventos sísmicos con valores de aceleración de 15% de la gravedad o superior ($1g=980 \text{ gals}$, $\text{gal}=\text{cm/s}^2$); es este valor límite inferior de aceleración que provoca afectaciones a los sistemas constructivos, estructuras de mampostería, que predominan en el país y en la ciudad. Por tal motivo, la Comisión Federal de Electricidad generó el mapa actualizado de Periodos de Retorno para aceleraciones de 0.15 ó de la gravedad utilizando información de la actualización del MOC-CFE-2008 (figura 111).

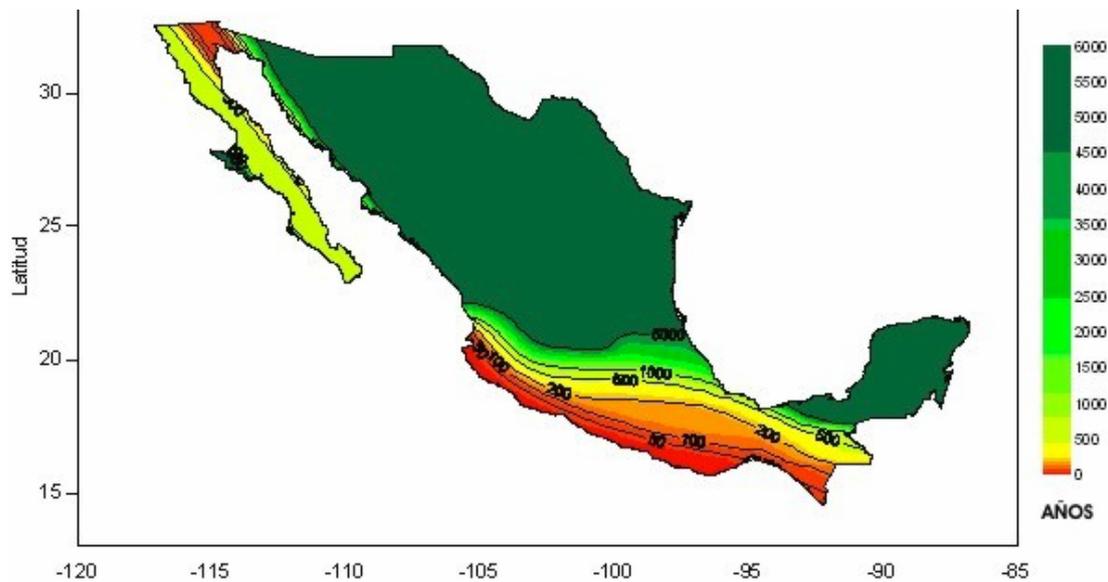


Figura 111. Mapa de periodos de retorno para aceleraciones de 0.15% de gravedad o mayores (MOC-CFE-2008).

Con base en este mapa, a cada estado se le han asignado las prioridades para la evaluación de la seguridad de las construcciones ante un sismo, adicionalmente contar con parámetros ingenieriles básicos para el diseño (espectros de diseño). Se han catalogado, mediante un algoritmo de interpolación, las 752 poblaciones con más de 10,000 habitantes de acuerdo a las cifras oficiales más recientes, proporcionadas por INEGI (CENAPRED, 2006).

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, según el mapa digitalizado de aceleraciones (figura 112), se localiza en la región frontera con periodos de repetición entre 200 y 500 años para un evento sísmico que produzca aceleraciones del orden de 15% o mayores de la gravedad, lo anterior es para fuentes de subducción y considerando aceleraciones en roca sin efecto de sitio.

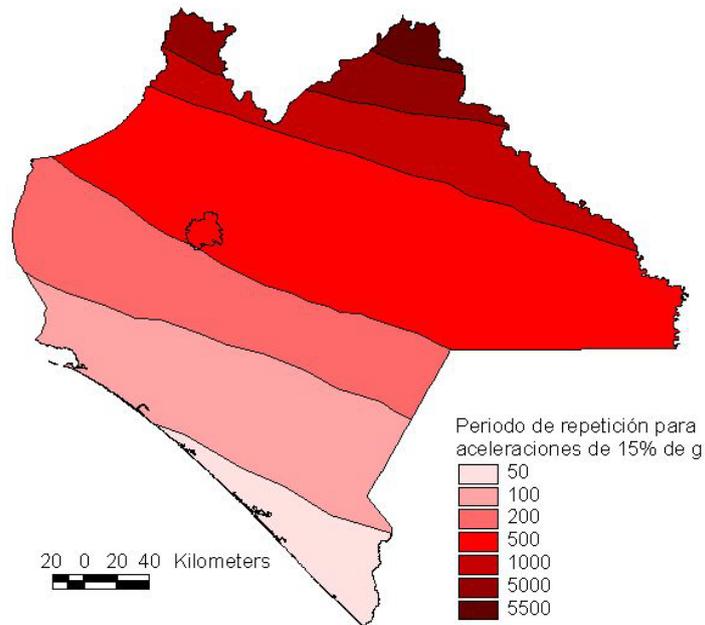


Figura 112. Mapa de periodos de repetición para aceleraciones de 0.15% de gravedad o mayores en Chiapas.

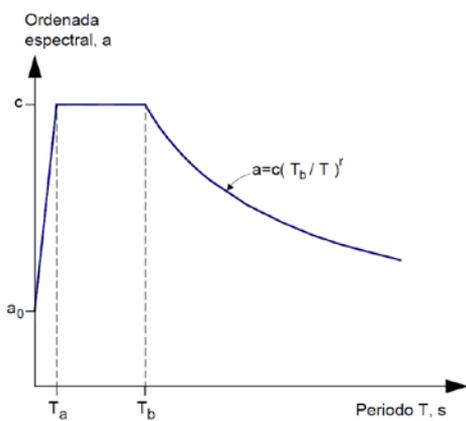
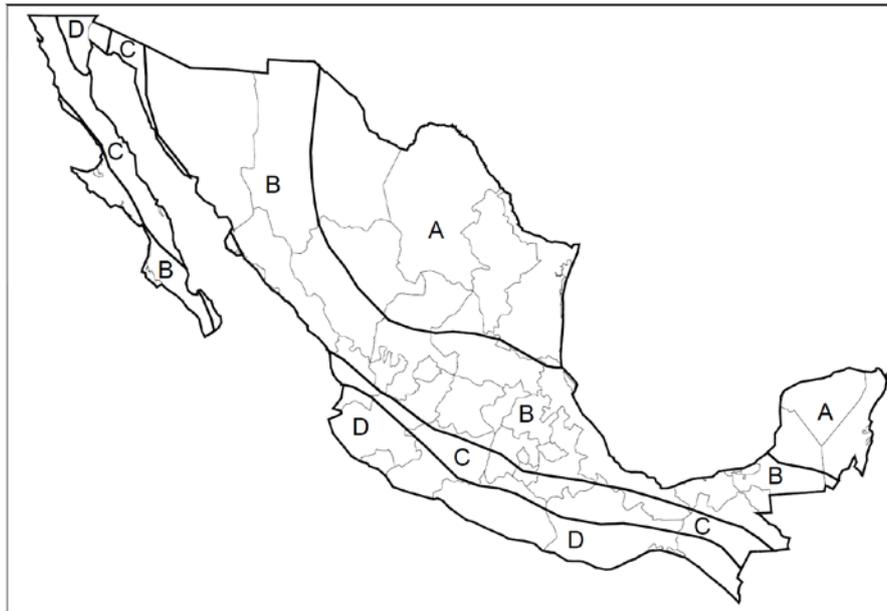
En el cuadro 5 puede consultarse el periodo promedio de repetición de una aceleración mínima que puede ocasionar daños a construcciones y cuyo periodo de retorno es de 0.42 eventos por siglo, una cifra engañadora si pensamos en los daños históricos reportados, esto se debe a que este estudio no considera las amplificaciones locales por el tipo de suelos y la topografía.

Cuadro 5. Periodos de retorno (TR) para aceleraciones de 0.15 g o mayores, modificado de CENAPRED, 2006.

Municipio	Long °N	Lat °W	Alt (m)	Población	TR (años)
Tuxtla Gutiérrez	-93.1167	16.7528	600	424 579	235

Espectros de respuesta para Tuxtla Gutiérrez

Los espectros de respuesta se pueden obtener a partir de manuales, normas o reglamentos de construcción, leyes de atenuación espectral o espectros de sitio; y se representan graficando los periodos de vibrar en las abscisas en segundos y las aceleraciones en las ordenadas. En Tuxtla Gutiérrez, tradicionalmente los espectros de respuesta se han tomado del MOC-CFE-1993, la cual corresponde a la información mostrada en la figura 113, lo anterior debido a la falta de estudios y por la sencillez de aplicación de la propuesta de Comisión Federal de Electricidad.



Zona sísmica	Tipo de suelo	a_0	c	T_a	T_b	r
A	I	0.02	0.08	0.2	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	0.04	0.16	0.3	1.5	$\frac{2}{3}$
	III	0.05	0.20	0.6	2.9	1
B	I	0.04	0.14	0.2	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	0.08	0.30	0.3	1.5	$\frac{2}{3}$
	III	0.10	0.36	0.6	2.9	1
C	I	0.36	0.36	0	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	0.64	0.64	0	1.4	$\frac{2}{3}$
	III	0.64	0.64	0	1.9	1
D	I	0.50	0.50	0	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	0.86	0.86	0	1.2	$\frac{2}{3}$
	III	0.86	0.86	0	1.7	1

Figura 113. Regionalización sísmica de la República Mexicana y parámetros para el espectro de diseño para estructuras del grupo B, (MOC-CFE-1993).

Los tipos de suelo, identificados como I, II y III corresponden a terreno firme, de transición y blando, respectivamente, tal como se explica en la referencia citada, y que para el área en estudio corresponden a lo mostrado en la figura 114:

- Zona I – Estrato firme compuesto por rocas calizas;
- Zona II – Depósitos de suelos constituidos por estratos de limos y arcillas de consistencia firme;
- Zona III – Depósitos de suelos arcillosos muy plásticos.

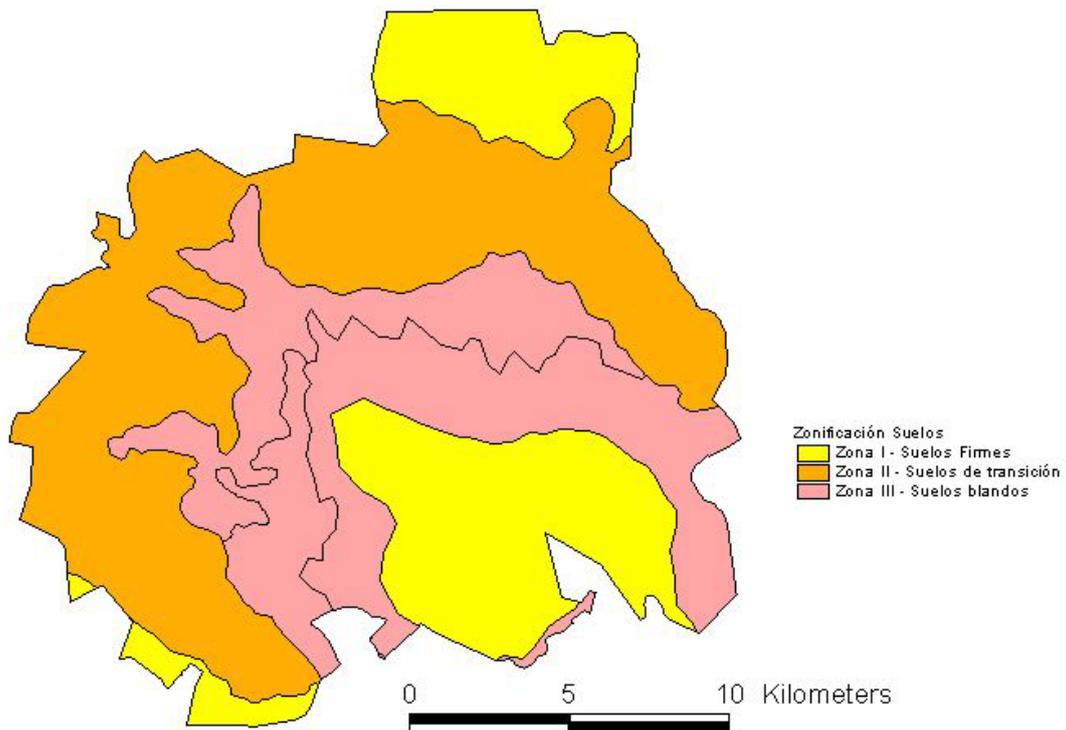


Figura 114. Zonificación de suelos propuesta para Tuxtla Gutiérrez.

Con respecto a esta información se obtienen los tres espectros de respuesta para cada una de las zonas en las que se divide el municipio en estudio (figura 115).

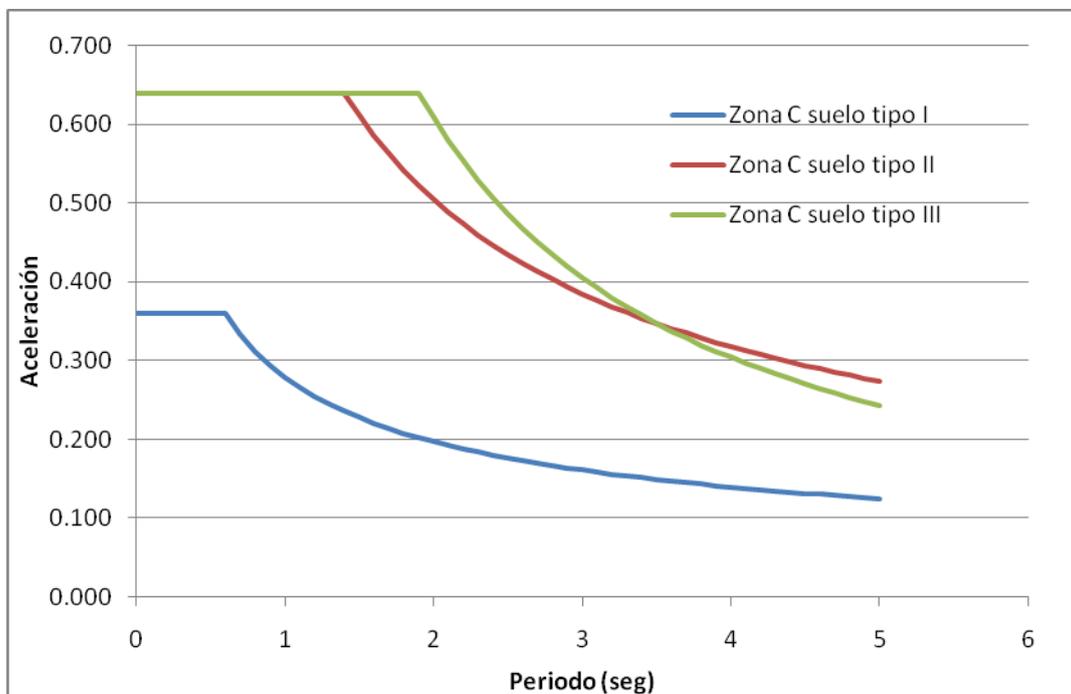


Figura 115. Espectros de diseño en el rango del periodo para el municipio de Tuxtla Gutiérrez, MOC-CFE-1993.

El trabajo desarrollado para obtener la microzonación sísmica de 1995 por Alonso *et al*, (1999), produjo un solo espectro para suelo firme con amortiguamiento del 5.0% y con un coeficiente sísmico de 0.60, el cual difiere un poco de las propuestas desarrolladas por Trigos (1998) de un coeficiente sísmico de 0.72; Esteva y Ordaz (1988) de un coeficiente sísmico de 0.44, CFE (1993) de un coeficiente sísmico de 0.36, del valor 0.42 en MOC-CFE (2008) y la del Reglamento de Construcciones de Tuxtla Gutiérrez (1995) de un coeficiente sísmico de 0.30, que es el valor que actualmente se emplea. En la figura 116 se presenta una comparación de los espectros obtenidos en cada uno de los estudios.

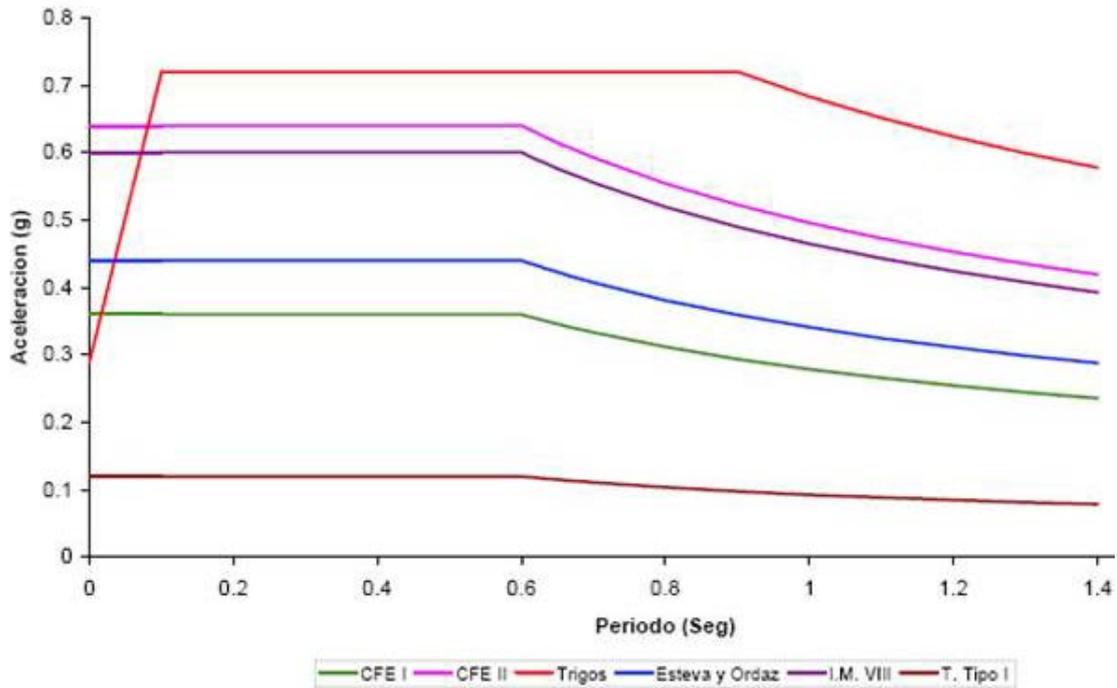


Figura 116. Espectros de respuesta propuestos en distintos estudios para el municipio de Tuxtla Gutiérrez, González *et al*, 2011b.

El MOC-CFE-2008 propone los espectros de roca y espectros de peligro uniforme para tres grupos de construcciones considerando la importancia. Dichos espectros son mostrados en la figura 117, en éstos se observa que para el grupo de importancia A y el grupo A+ no es considerable la diferencia del espectro para roca y es el mismo espectro para peligro uniforme. Estos espectros son procesados a partir de lo obtenido con el programa PRODISIS versión 2.0.

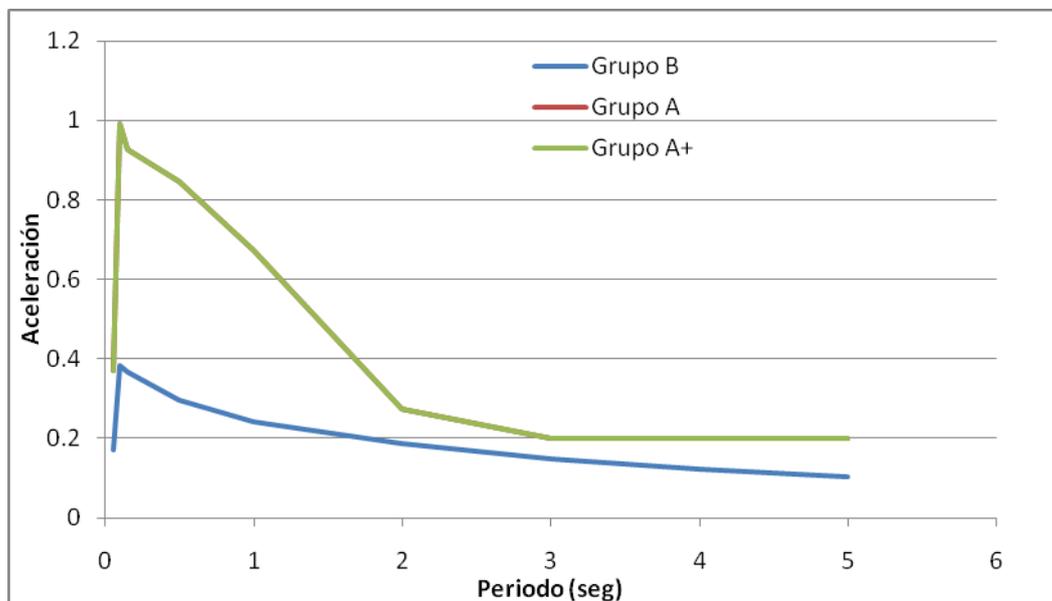
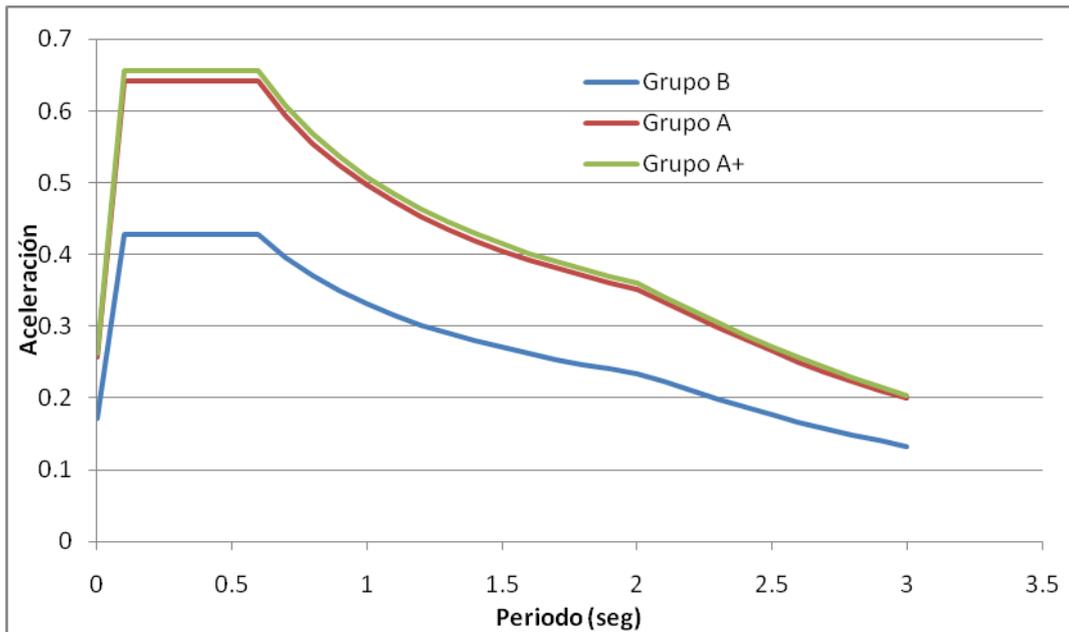


Figura 117. Espectros de respuesta en roca y de peligro uniforme, respectivamente, obtenidos con datos del programa PRODISIS ver. 2.0 del MOC-CFE-2008.

8. Construcción Histórica de la Vulnerabilidad Sísmica en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez presenta un crecimiento poblacional muy importante en los últimos 40 años sin un desarrollo urbano planificado y adecuado (figuras 118 y 119). Esto es debido a la migración del campo a la ciudad, la construcción del sistema de las presas (fenómeno que produjo la mayor migración a la ciudad en los años setenta y ochenta), el efecto del Ejército Zapatista de Liberación Nacional en el año 1994, la llegada de empresas con oportunidades laborales, la presencia de las universidades más grandes del estado y los programas sociales que se han dado en la capital.

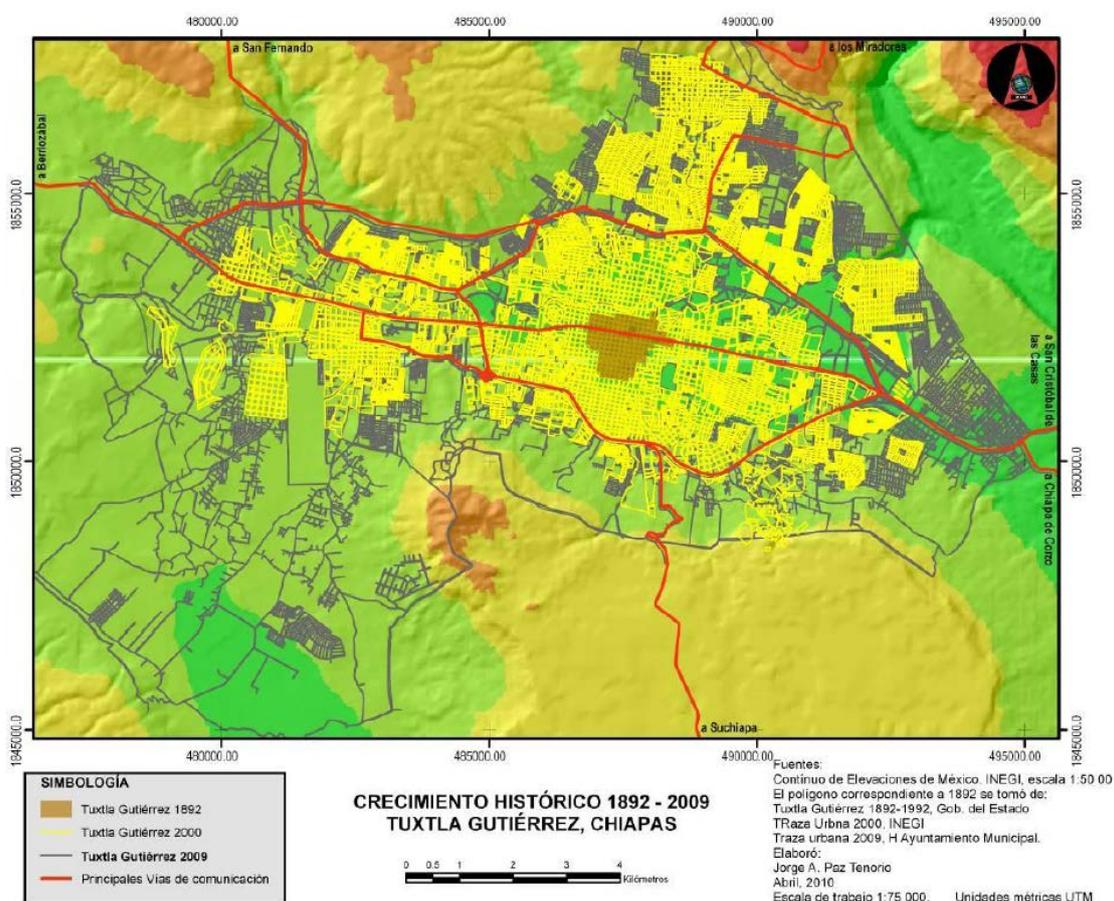


Figura 118. Plano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, donde se observa el crecimiento de 1892 a 2009 (amarillo mostaza 1892, amarillo 2000 y gris 2009), (Paz, 2010).

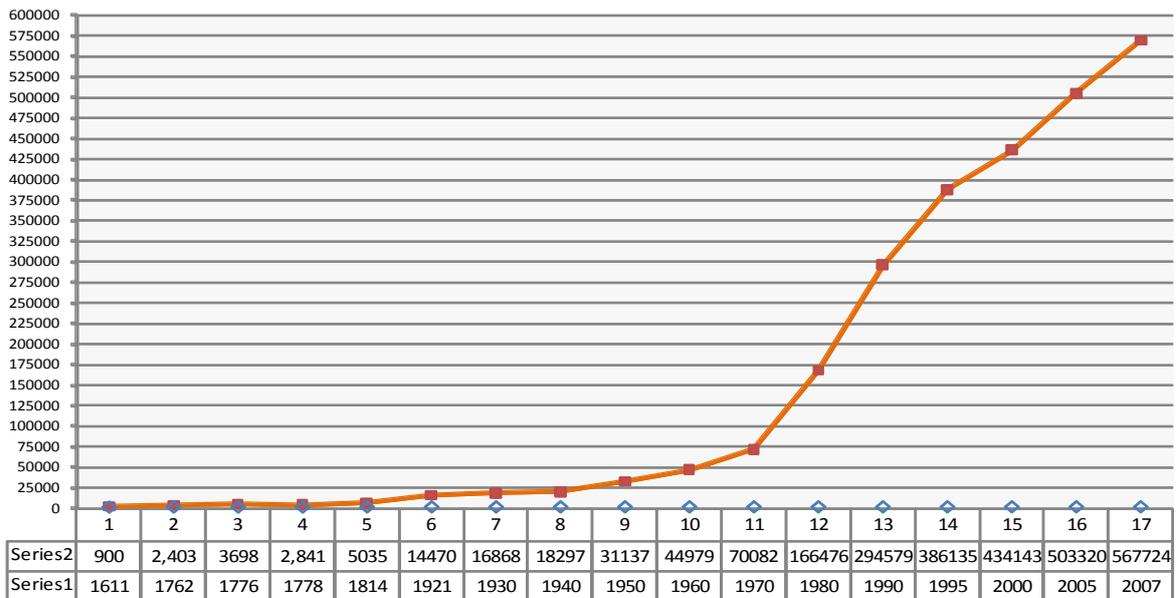


Figura 119. Crecimiento poblacional de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez desde 1611-2007, construcción propia basada en datos del INEGI, (González *et al.*, 2010)

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez está ubicada en la depresión central de Chiapas, el valle de Tuxtla, que está compuesta principalmente por terrenos planos con algunas suaves ondulaciones y ligeros declives hacia el río Sabinal. Este río recorre la parte más baja del valle, la parte norte de la ciudad forma parte del altiplano central por sus características cronológicas, pero se encuentra separada de él por el Cañón del Sumidero que corta abruptamente por el noroeste los terrenos semiplanos de la parte alta a los relativamente accidentados de sus faldas (figura 120). El valle de Tuxtla Gutiérrez está limitado por las paredes casi verticales de la meseta de Copoya, la cual se encuentra rodeada por completo de terrenos bajos. Esta meseta la conforman terrenos semiplanos y planos a una altitud promedio de 800 m y por terrenos más o menos accidentados que forman en el borde poniente el cerro Mactumatzá. El sureste del municipio se conforma en partes por terrenos planos que son una continuación de los del valle de Tuxtla y terrenos relativamente accidentados que se elevan formando una meseta de casi 1,200 m de altitud (De la Madrid, 1987).

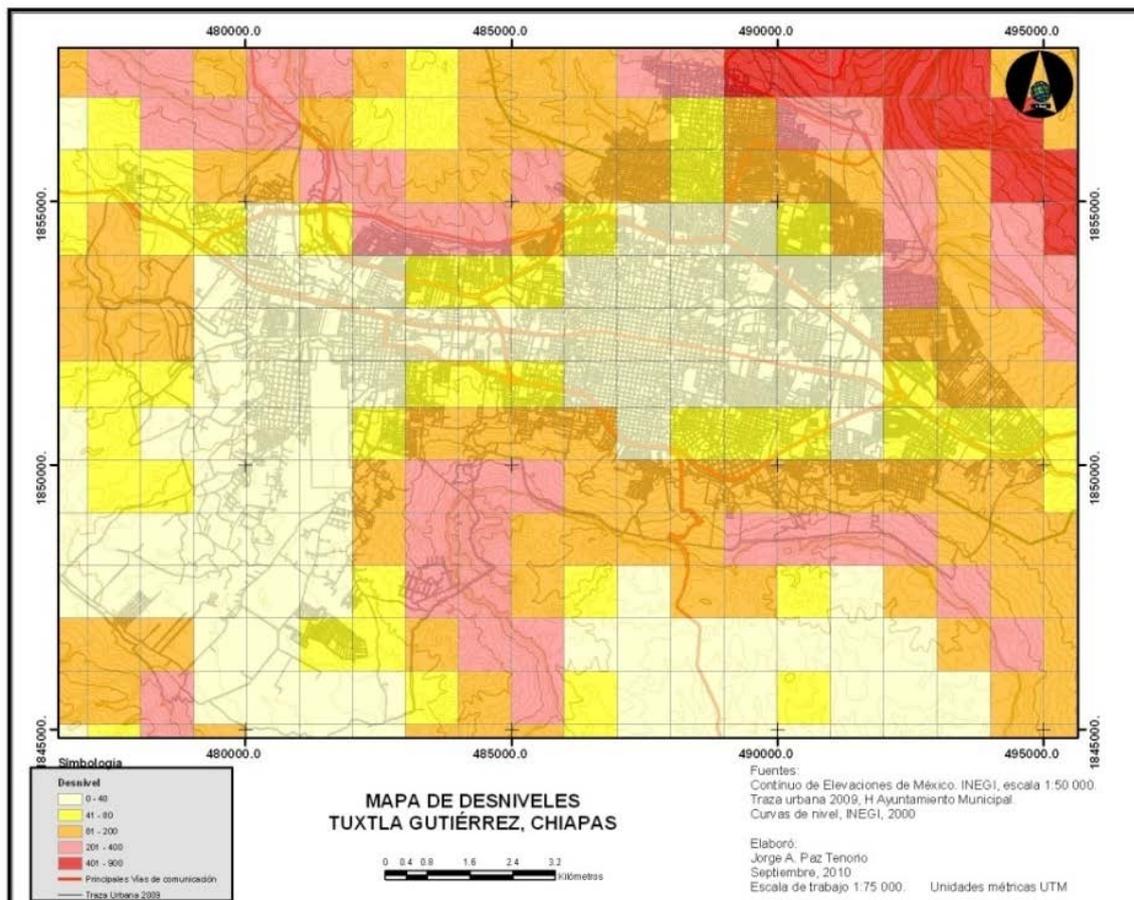


Figura 120. Plano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se observa la mancha urbana y los niveles de altimetría donde se desarrolla y su crecimiento reciente en sitios con mayor pendiente (Paz, 2010).

8.1. Antecedentes históricos de la vivienda en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Los primeros asentamientos que dieron lugar a la formación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez fueron alrededor del año 7,000 (antes de nuestra era). El sitio arqueológico más antiguo se localiza en la cueva del rancho Santa Martha cerca de Ocozocautla, Chiapas. Durante el siglo que va del año 1,000 al inicio de nuestra era, se desarrolló la cultura maya, la cual dejó casi nulos vestigios constructivos en la ciudad y a la llegada de los españoles se encontraban tan solo asentamientos zoques (Cedillo y López, 1995).

Entre los años 1,500 y 1,000 antes de nuestra era, en el estado de Chiapas existieron grupos que vivían del cultivo del maíz y complementaban la alimentación con productos de la caza y la recolección, agrupados en pequeños asentamientos comenzaron a desarrollar técnicas nuevas que les permitieron la construcción de chozas y jacales, las cuales estaban hechas a base de troncos de árboles y palmas.

Los zoques, habitantes del actual Tuxtla Gutiérrez, tenían una vivienda tradicional construida con techo de paja, paredes de bajareque y piso de tierra.

Actualmente ésta sólo se encuentra en las zonas rurales del municipio o en los cinturones de miseria del área periurbana (figura 121), ya que ha sido sustituida por construcciones de lámina, cemento, block, tabique y piedra.



Figura 121. Muestra las fotografías de construcciones de bajareque en las áreas periurbanas y rurales de Tuxtla Gutiérrez.

Las viviendas desde esta época siguieron desarrollándose a base de madera o bajareque para muros y paja para la cubierta. Con la llegada de los españoles se empleó la piedra y el adobe, aunque se mantenían el bajareque y la madera en las construcciones más humildes, que correspondían a los indígenas. López (2003) señala que hasta principios de los años cuarenta del siglo pasado Tuxtla Gutiérrez conservaba una fisonomía uniforme en cuanto a construcción de viviendas y demás edificaciones, ya que las construcciones eran de adobe para muros, cimentación de piedra, las cubiertas a dos aguas, techadas con teja de barro y armaduras de madera.

En el siglo XVI los Dominicos fundan las capillas de San Roque, Santo Domingo, San Miguel y San Jacinto. Los Jesuitas erigen el templo de San Marcos, donde se utilizó teja de barro para los techos de los templos, en esos tiempos no existían grandes construcciones (Paula, 2008).

De aquí en adelante la teja se utilizó para la construcción de lugares importantes en el centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, como la catedral de San Marcos o el Palacio de Gobierno (figura 122).



Figura 122. Fotografías casas administrativas (izquierda) y parque central (derecha) en 1926 con techos de teja de barro (Montiel, 1975).

Entre los siglos XVII, XVIII y XIX se construyeron muchas casas para comercio, gubernamentales o templos, las construcciones más apreciadas, que se caracterizaban por sus tejados uniformes de una o dos aguas, construidas a base de piedra braza para muros y cimentación, madera y teja para cubierta.

En el resto del siglo XIX y hasta mediados del siglo XX las construcciones fueron de adobe con características técnicas homogéneas, de estas construcciones quedan pocos vestigios en la ciudad capital. Las viviendas de la ciudad en la actualidad tienen un promedio de menos de 50 años de edad, ya que gran parte de las viviendas fueron destruidas por el sismo subductivo de magnitud 7.7 e intensidades de X del 23 de septiembre de 1902 (Figueroa, 1973). Las restantes construcciones de adobe, madera, piedra o bajareque han sido demolidas en el primer cuadro de la ciudad para la ampliación de la avenida central a finales de los setenta y para la modernización del centro, debido al alto costo del suelo, considerándose la necesidad de construcciones verticales.

8.2. Antecedentes de la normativa de construcción en Chiapas

El primer Reglamento de Construcciones para el estado de Chiapas fue presentado el 24 de marzo de 1971. Compuesto por 271 artículos, fue validado para ser empleado en ocho municipios. La selección de los municipios fue con base en su número de habitantes, más allá de similitudes, de condiciones geológicas, geotécnicas, sísmicas, constructivas o técnicas. Los municipios eran Tuxtla Gutiérrez, Tapachula de Córdova y Ordoñez, Comitán de Domínguez, San Cristóbal de Las Casas, Tonalá, Arriaga, Huixtla y Villaflores.

En 1997 se actualizó el Reglamento de Construcción de Tuxtla Gutiérrez, tras el sismo de octubre de 1995. Este reglamento se ha modificado al menos dos ocasiones de acuerdo a decisiones de los presidentes del colegio de arquitectos o ingenieros de la ciudad, su última versión es la del año de 2005 y consta de 454 artículos, así como una guía normativa para la preservación de la imagen urbana de Tuxtla Gutiérrez, el Jobo y Copoya.

Actualmente en la Secretaría de Infraestructura del Estado de Chiapas existen 16 Reglamentos de Construcción aprobados y tres en proceso de elaboración. Adicionalmente el Instituto de Protección Civil, la UNICACH y la UNAM, a través de recursos del fondo FOMIX (Fondos Mixtos Gobierno del Estado de Chiapas y CONACYT), trabajan en la elaboración de Normas Técnicas para los reglamentos de Tuxtla Gutiérrez y Tapachula, los cuales deben concluirse en marzo de 2012.

Es importante recalcar que los reglamentos de construcciones y sus normas técnicas deben ser elaborados a nivel municipal, actualmente son estatales. En la mayoría de las ciudades y en algunos estados se toma como base el reglamento y las normas técnicas del Distrito Federal, lo cual no siempre es recomendable, debido a que los materiales del subsuelo, los procesos constructivos, los peligros por viento y sismo y las técnicas que se emplean en cada región son diferentes.

La mejor manera de hacer frente a los fenómenos sísmicos es que cada municipio o cada ciudad de los diferentes estados tengan sus propias Normas Técnicas de Construcción sismoresistente. Aguilar *et al.*, (2004), denominan a estas normas mínimas de seguridad estructural, las cuales marcan los lineamientos para construir de forma segura, de acuerdo con las condiciones locales tomando en cuenta el comportamiento de los suelos ante la actividad sísmica y los materiales utilizados en los procesos constructivos locales. Las normas técnicas no son una solución absoluta de seguridad, ya que una vez establecidas deben de ir acompañadas por:

- Difusión mediante cursos de capacitación para su mejor entendimiento y aplicación.
- Un sistema de supervisión, el cual debe estar constituido por un grupo de supervisores externos certificados.
- Laboratorios de materiales especializados que realicen los estudios sobre la calidad de los materiales.
- El establecimiento de las normas técnicas de construcción debe ser proceso integral y tender a volverse virtuoso.

La falta de normativa técnica de diseño tiene varias líneas de influencia en una región: el impedimento no escrito, pero sí funcional de la implementación e introducción de sistemas constructivos, la dificultad para el uso de los llamados nuevos materiales y más allá de todo lo que podemos considerar como innovador; la imposibilidad de llevar un control normado por parte de las autoridades de los incumplimientos de una normativa que aun no estando escrita es de uso nacional y que pueda ocasionar perjuicios a terceros y desvirtuando el trabajo de los ingenieros como profesionales. Resumiendo: al no contar con una normativa técnica de diseño, no podemos precisar qué debemos hacer y si no lo hacemos qué responsabilidad tendremos.

Esta desvinculación del hacer relacionado con la responsabilidad de cómo hacerlo para tener certeza, compromiso y respeto profesional, tiende a ser muy acentuada entre menor sea la presencia de normativa técnica de diseño amplia y aceptada en una región, lo que como podemos imaginarnos agrava los efectos patológicos de las construcciones (González *et al.*, 2008).

El papel de las universidades, centros de investigación y asociación de profesionistas es el marco idóneo para el tratamiento de este problema tan complejo, que viene aparejado con la carencia de investigadores y recursos para desarrollar proyectos. Estos problemas coyunturales se agravan en zonas donde la marginación es grande.

8.3. Características mecánicas de los materiales constructivos empleados en Tuxtla Gutiérrez

En el estado de Chiapas se presentan cambios importantes en las características de los materiales de construcción que surgen del subsuelo (principalmente piezas para mampostería –bloques, tabicones y tabiques– y

agregados –gravas y arenas–), por lo cual, deben hacerse investigaciones para identificar las condiciones de cada región haciendo muestreos en distintos bancos de material y plantas de fabricación.

Ruíz y Aguilar (2006), González *et al.*, (2009) y González *et al.*, (2010b) realizaron una investigación estadística en la capital del estado, donde se ejecutaron pruebas en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNACH (en los años 2005, 2008 y 2009) a las piezas, morteros y mamposterías, adobes y piezas especiales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, tanto en tabiques de arcilla y bloques de concreto, colocados en pilas verticales de cinco piezas para tabique y dos piezas para los bloques, para pruebas de compresión pura en muretes. Las pruebas se realizaron de acuerdo con lo solicitado en el protocolo de pruebas del apéndice A de las NTCM-RCDF-2004 (Normas Técnicas Complementarias de Mampostería del Reglamento de Construcción del Distrito Federal) y la NMX-C-404-ONNCCE-1997 (Normas Mexicanas y el Organismo Nacional de Normalización de Materiales Componentes y Sistemas Estructurales).

De los resultados de las pruebas se puede afirmar que en Tuxtla Gutiérrez se presentan piezas con capacidades a la compresión en rangos desde 1.5 y hasta 4 MPa (desde 15 y hasta 40 kg/cm²), lo cual es muy pobre considerando que el RCDF en sus NTCM-2004 permite emplear piezas con resistencias superiores a los 6 MPa (60 kg/cm²), lo que algunas piezas elaboradas por materiales reciclados superan (González *et al.*, 2010b). Los resultados obtenidos por los estudios anteriores son consistentes con lo que se han registrado en estudios encontrados en la literatura, donde se enfatiza la variación y poca resistencia de las piezas en el estado, siendo mayor este fenómeno en la zona norte y en la región central, donde se ubica la capital del estado Tuxtla Gutiérrez y las piezas con mayor resistencia se ubicaron en el Soconusco (González y Aguilar, 2008).

En la figura 123, se observan elementos orgánicos contaminantes de la pieza, los cuales están dispersos en la estructura interna del mismo bloque. Este tipo de patologías en las piezas suele ser recurrente y determina la resistencia final, el tiempo de vida de la construcción e incluso la propensión de la pieza a ser atacada por hongos y bacterias. En este aspecto la supervisión es vital para mejorar la calidad rechazando materiales que no cumplen con especificaciones.



Figura 123. Fragmento de bloque de concreto contaminado con materia orgánica.

Analizando los requisitos para el desarrollo de mampostería estructural dados por las NTCM-RCDF-2004 y retomados por el reglamento de Chiapas, el cual considera ocho de los municipios del estado, entre ellos el de Tuxtla Gutiérrez, se realizó un estudio que muestra el efecto de considerar las resistencias reglamentarias del mortero estructural que van desde los 4 MPa para mortero tipo N y hasta 12.5 MPa para mortero tipo M (desde 40 y hasta 125 kg/cm²) con la combinación de resistencias para piezas encontradas por Ruiz y Aguilar (2006) y así obtener las resistencias de los muros que se construyen en Chiapas y las consecuencias de tener resistencias muy bajas en las piezas.

Cuadro 6. Comparativa de resistencias de piezas, morteros y mampostería para el Distrito Federal y la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Resistencia a la compresión de piezas (f _p), con base en área neta, (kg/cm ²) RCDF	Resistencia a la compresión de la mampostería (f _m), con base en el área neta, (kg/cm ²)			Resistencia a la compresión de piezas (f _p), con base en área neta, (kg/cm ²) encontradas en Tuxtla Gutiérrez	Resistencia a la compresión de la mampostería (f _m), con base en el área neta, (kg/cm ²)		
	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>N</i>		<i>M</i>	<i>S</i>	<i>N</i>
<i>Tabiques</i>				<i>Tabiques</i>			
500	160	130	110	50	48	39	33
400	140	110	90	40	42	33	27
300	120	90	70	30	36	27	21
200	80	70	50	20	24	21	15
150	60	60	40	15	18	18	12
100	40	40	30	10	12	12	9
0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Bloques</i>				<i>Bloques</i>			
200	100	90	80	20	30	27	24
150	75	60	60	15	22.5	18	18
100	50	45	40	10	15	13.5	12
0	0	0	0	0	0	0	0

En cuadro 6 se muestran los rangos de resistencias de tabiques y bloques avaladas por los reglamentos de construcción del Distrito Federal y los valores de resistencias encontrados por Ruiz y Aguilar (2006) y González *et al.*, (2010b) para Tuxtla Gutiérrez. También se consideran los tres tipos de morteros estructurales solicitados por los reglamentos de construcción. Con la

combinación analítica de estos parámetros se obtienen resistencias del conjunto piezas y mortero, el cual técnicamente se denomina mampostería.

En las gráficas de la figura 124 se muestra la debilidad estructural de los muros construidos con piezas débiles, lo que permite prever que las construcciones presentaran un comportamiento más frágil del deseable (propenso a fallas súbitas) y que el proyecto arquitectónico demandará mayores longitudes de muros o espesores de éstos en ambas direcciones de análisis (longitudinal y transversal), lo cual generalmente no se hace, como puede verse en las plantas arquitectónicas de proyectos tipo arquitectónicos de viviendas de interés social.

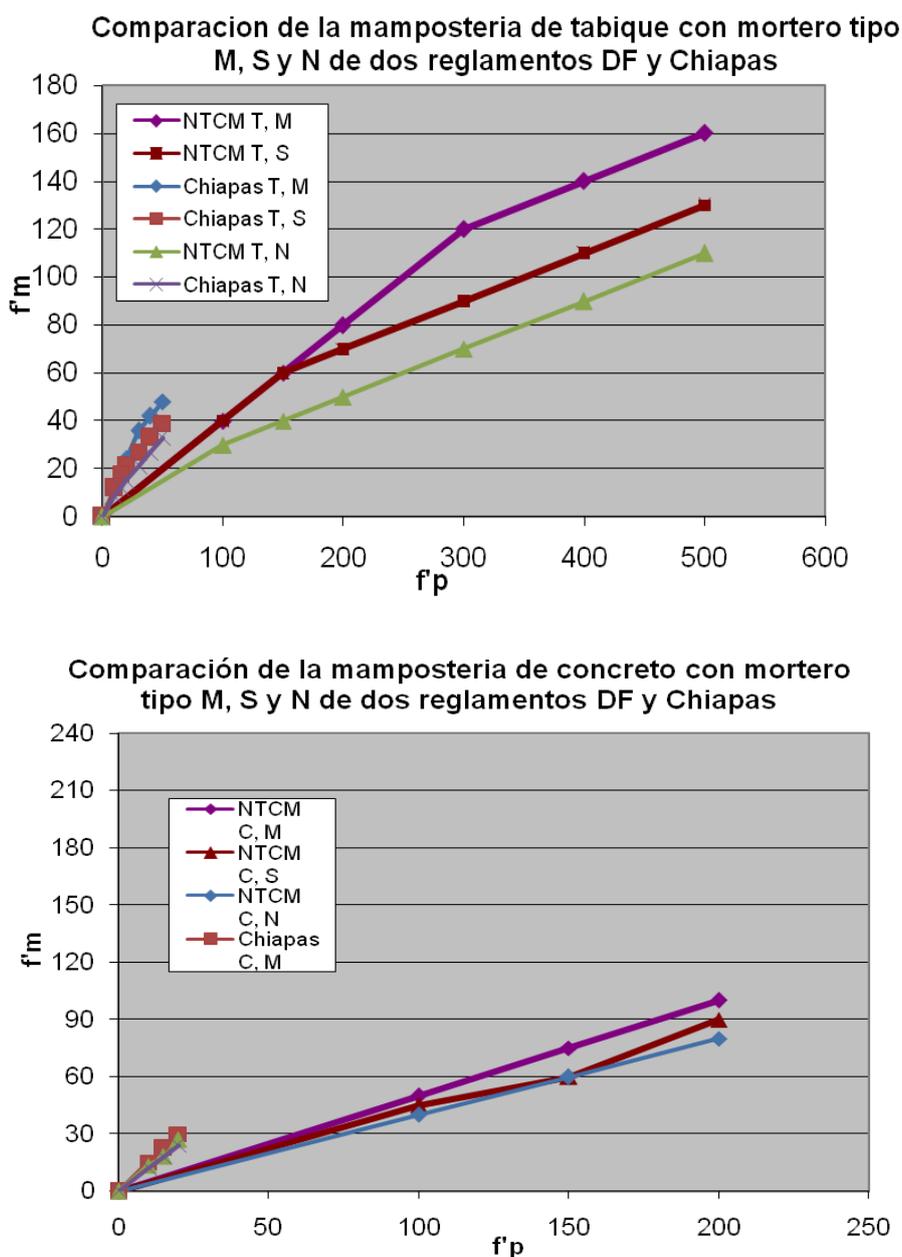


Figura 124. Comparación de las resistencias de mampostería de piezas de tabique y bloques de concreto de acuerdo con RCDF-2004 y RCTGZ-2005.

En la figura 125 se observa con una fotografía el proceso patológico que es muy común en la elaboración de los morteros y concretos en obra, error que tiende a repetirse en la mayor parte de las construcciones. Observamos morteros elaborados con una cantidad excesiva de agua, que disminuye la resistencia del producto e incrementa el agrietamiento y la contracción de la muestra. Esto provoca que al usar relaciones agua cemento muy altas, el agua al evaporarse deja vacíos que posteriormente son la dirección por donde los esfuerzos dañan al material. Estas patologías son bastante controlables y dependen en gran medida del nivel de supervisión que se presenta en la obra y la conciencia del supervisor de cuidar este proceso.



Figura 125. Fotografía que muestra la elaboración de mortero cemento arena con exceso de agua, lo que le provocará fisuraciones y pérdida de resistencia

Cada vez es más frecuente que empresas nacionales desarrollen piezas de mampostería tecnificadas, las cuales por el momento son “costosas” para los usuarios de los procesos de autoconstrucción, sin embargo tienen la ventaja de garantizar resistencias y durabilidad. Por lo que una alternativa que debería retomar el gobierno estatal por medio de la Secretaría de Infraestructura y la de Medio Ambiente y Vivienda es la capacitación de los fabricantes regionales a fin de mejorar la calidad del producto y poder otorgar garantías de éstos. Los sistemas monolíticos de concreto son usados en el estado desde el año 2002 y en la actualidad un porcentaje importante de las construcciones de vivienda son de concreto.

8.4. Identificación de los sistemas constructivos empleados en Tuxtla Gutiérrez

Con la información obtenida al levantar 5,000 encuestas seleccionadas al azar por inferencia estadística de las distintas estructuras existentes en la ciudad se encontró que en ella existe una gran gama de materiales con los que están construidas, desde los materiales tradicionales hasta los más modernos. Durante la investigación se hallaron en el entorno de la ciudad de Tuxtla

Gutiérrez, la cantidad de 21 combinaciones de muros y losas (sistemas constructivos).

En los cuadros 7 y 8 se presentan los distintos tipos de construcciones que emplean diversos materiales para techos y muros. En la figura 126 se presenta un mapa conteniendo los diversos sistemas constructivos que se encontraron en la ciudad.

Cuadro 7. Sistemas constructivos encontrados en Tuxtla Gutiérrez (González *et al*, 2010).

Material de muro	Material de losa
Adobe	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Bajareque	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Block o tabicón de concreto	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja, losa maciza.
Ladrillo de barro o tabique	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja, losa maciza.
Madera	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Piedra	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Concreto	Losa maciza.

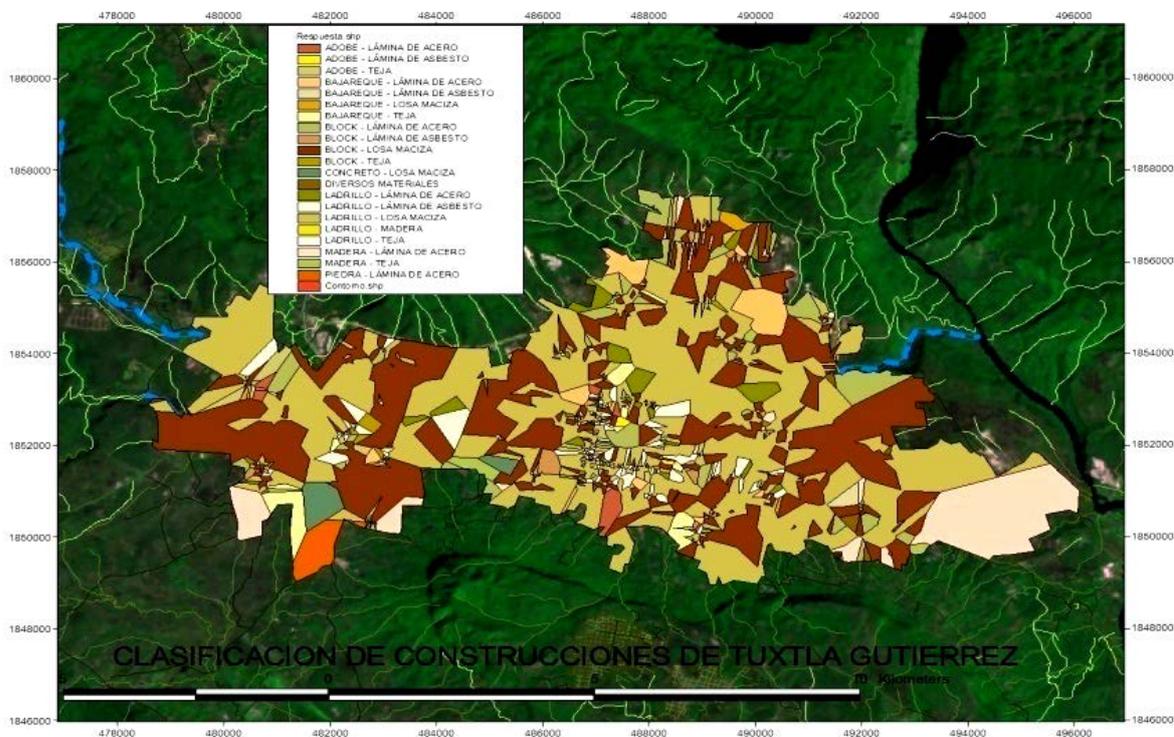
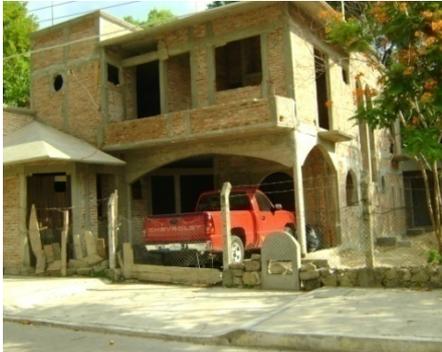


Figura 126. Clasificación de construcciones de Tuxtla Gutiérrez, según sistemas constructivos para cubiertas y para muros (González *et al*, 2010).

Cuadro 8. Descripción de los sistemas constructivos encontrados en Tuxtla Gutiérrez (González et al, 2010)

TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

Número	Fotografía	Código	Nombre	Descripción
1		M1	Mampostería sin refuerzo	Muros a corte de mampostería sólida sin refuerzo ni elementos de confinamiento. Las fuerzas laterales son resistidas por los muros. Diafragmas rígidos en pisos, con losas aligeradas o macizas. Cimentación de concreto ciclópeo o zapatas aisladas.
2		M2R	Mampostería armada o confinada con diafragmas rígidos	Muros a corte de mampostería, con unidades sólidas, de arcilla, concreto o sílico calcáreas. Refuerzo distribuido o castillos de confinamiento de concreto armado. Las fuerzas laterales son resistidas por los muros. Diafragmas rígidos en pisos, con losas aligeradas o macizas. Losa de cimentación, zapatas corridas.
3		M2F	Mampostería armada o confinada con diafragmas flexibles	Similar a M2R excepto por tener diafragmas de piso o techo flexible, con viguetas de madera o de acero. No deben incluirse en este grupo las construcciones de dos o más niveles en las que sólo el último nivel tenga un diafragma flexible; éstas deben ser clasificadas como M2R.
4		M3	Construcción informal (mampostería mal confinada o reforzada)	Similar a M2, pero con unidades inadecuadas de mampostería, o con insuficiente confinamiento.

5		AQ	<p>Adobe, quincha o bajareque</p>	<p>Construcción de uno o dos niveles. Típicamente muros de adobe de gran espesor en el primer nivel y estructura de quincha en el segundo. Techos y entrepisos de madera, en algunos casos con cielo rasos de yeso. Fuerzas laterales resistidas por los muros. Diafragmas flexibles, constituidos por viguetas de madera y entablados. Cimentación corrida de concreto ciclópeo.</p>
6		C1	<p>Marcos de concreto</p>	<p>Estructura con marcos de concreto armado. Los pisos y techos son por lo general losas aligeradas, que pueden ser con viguetas prefabricadas. Con menos frecuencia se emplean losas macizas. Las cargas de gravedad son resistidas por las vigas y columnas que conforman los marcos. Las cargas laterales son también resistidas por los marcos, en los que puede tenerse un pequeño número de placas, tales como las de cajas de escaleras y de ascensores. Puede suponerse que los diafragmas son rígidos. Cimentación con zapatas aisladas ligadas.</p>
7		C2	<p>Estructura de concreto armado con placas</p>	<p>Similar a C1 excepto porque la mayor parte de la fuerza lateral es resistida por muros de concreto armado de gran rigidez.</p>

8		C3	Marcos de concreto con vanos rigidizados con mampostería	Similar a C1 excepto porque algunos vanos han sido rellenos con muros de albañilería. Los muros de relleno pueden resistir una fracción importante de la carga lateral.
9		C4	Estructura celular de concreto	Estructura de uno o más pisos con losas y muros de concreto armado, usada como vivienda. Las luces son cortas. Las losas son macizas, de poco espesor. Las cargas laterales y verticales son resistidas por los muros. La cimentación se basa en losa de cimentación o cimientos corridos.
10		A1	Marcos de acero resistentes a momento	Edificio compuesto por marcos con vigas y columnas de acero ensambladas con uniones capaces de desarrollar momento. Los diafragmas son losas de concreto vaciado in situ o sistemas de placa colaborante (steel deck). Fuerzas verticales y laterales resistidas por los marcos. Cimentación con zapatas aisladas ligadas.
11		A2	Marcos de acero arriostrado con diagonales	Similar a A1 excepto porque la rigidez lateral es proporcionada por marcos arriostrados con diagonales de acero.

12		A3	Estructura de perfiles livianos	Estructura metálica de poco peso compuesta por entramados de perfiles doblados u otros perfiles livianos, generalmente con cubiertas de lámina o paneles.
13		EM	Entramados de madera	Construcciones de uno o dos pisos, con cargas moderadas y luces relativamente cortas. Los pisos y techos están contruidos a base de viguetas, que se apoyan sobre pie derechos. Excepcionalmente pueden tenerse algunas columnas aisladas. Las acciones de sismo son soportadas por los muros, cuya rigidez depende del revestimiento. Los diafragmas son flexibles, frecuentemente con entablados de madera.

En el mapa de clasificación de construcciones (figura 127) encontramos que los sistemas constructivos se han movido durante el paso de los años del centro de la ciudad y algunas de las construcciones como adobe aún existen como monumentos o viviendas que han quedado atrapados por las modernas construcciones del centro de la ciudad. Por lo general la mayoría de las construcciones que existen actualmente están elaboradas con los sistemas ladrillo-losa maciza y block-losa maciza, ambos sistemas ocupan tres cuartas partes de la mancha urbana.

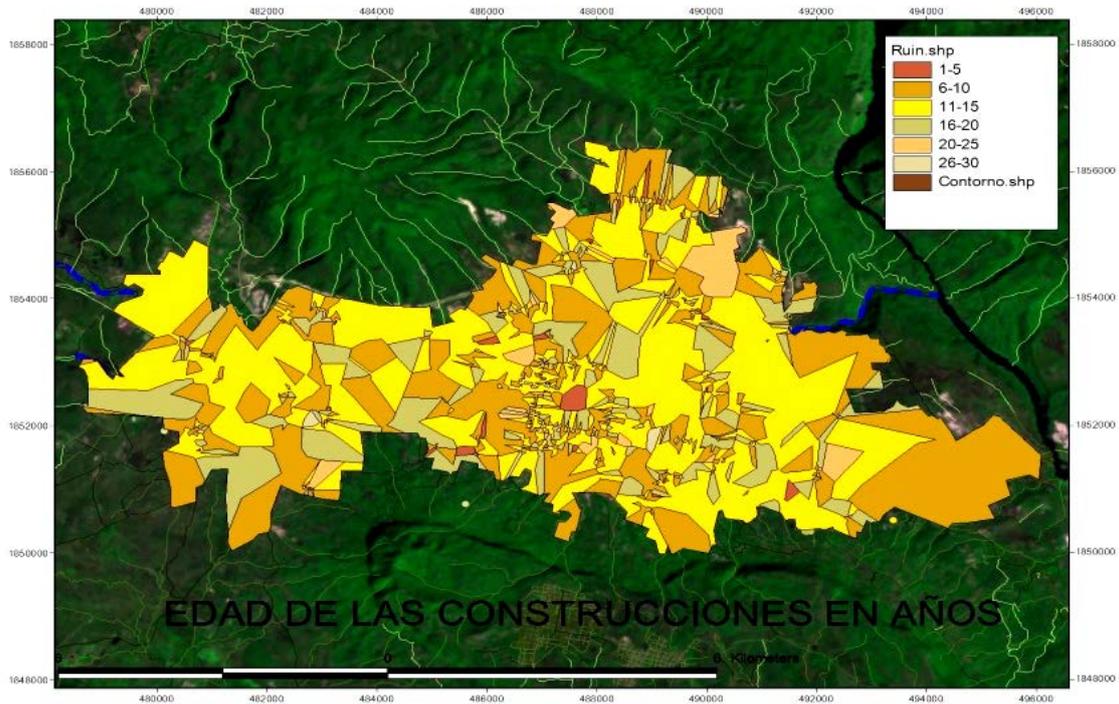


Figura 127. Clasificación de construcciones de Tuxtla Gutiérrez, según la edad en que se desarrollaron.

Las construcciones como las de bajareque, tradicionales desde los zoques en la ciudad, aún existen, se ubican en los barrios más antiguos y son una especie de reliquia, muchas de ellas se encuentran en mal estado por la falta de mantenimiento estando más propensas a sufrir daño cuando se presente algún fenómeno como sismo. Se observa en la periferia de la ciudad construcciones con mampostería confinada (block o tabique), pero con otro tipo de cubierta (lámina o madera), además de estructuras de madera improvisadas, las que son vulnerables a las ráfagas de viento y a los incendios.

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez ha presentado cambios en sus sistemas constructivos, lo anterior se debe a una dinámica de costo del terreno, modas constructivas y economía de mercado. En la figura 127 se muestra el mapa de las edades de las estructuras, en él se observa que en la parte central existen construcciones mayores de 30 años de edad, así como en regiones tradicionales de la ciudad. No obstante la media de las construcciones está entre 10 y 20 años.

En las figuras 128 y 129 se muestran mapas conteniendo colonias que han presentado daños a partir de lo observado en el recorrido de campo y considerando la información del Instituto de Protección Civil del Estado de Chiapas. En el anexo 6 se muestra el detalle de cada colonia dañada, lo cual incrementa su vulnerabilidad.

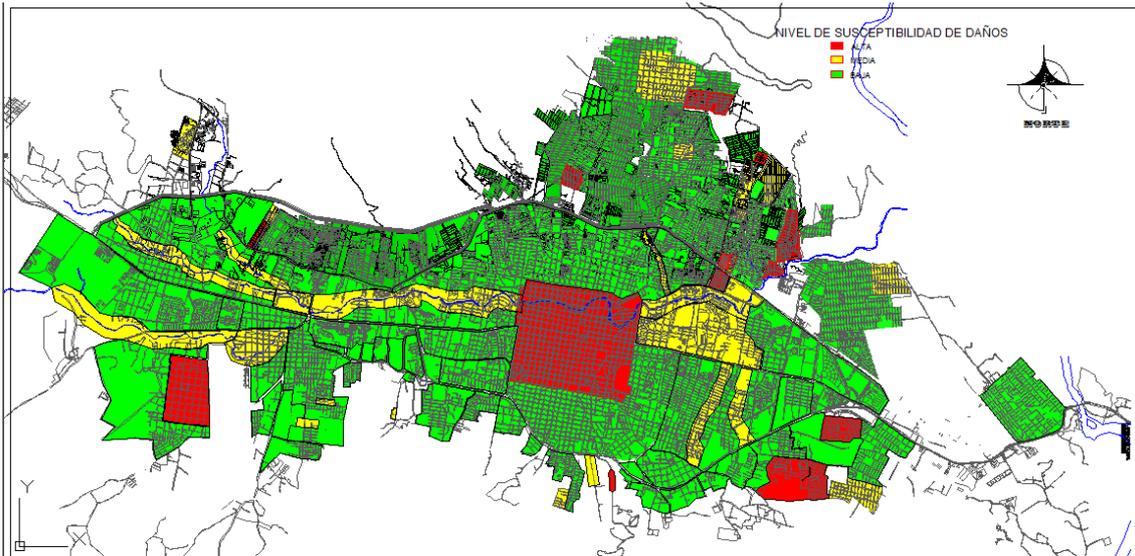


Figura 128. Mapa daños observados por colonia.

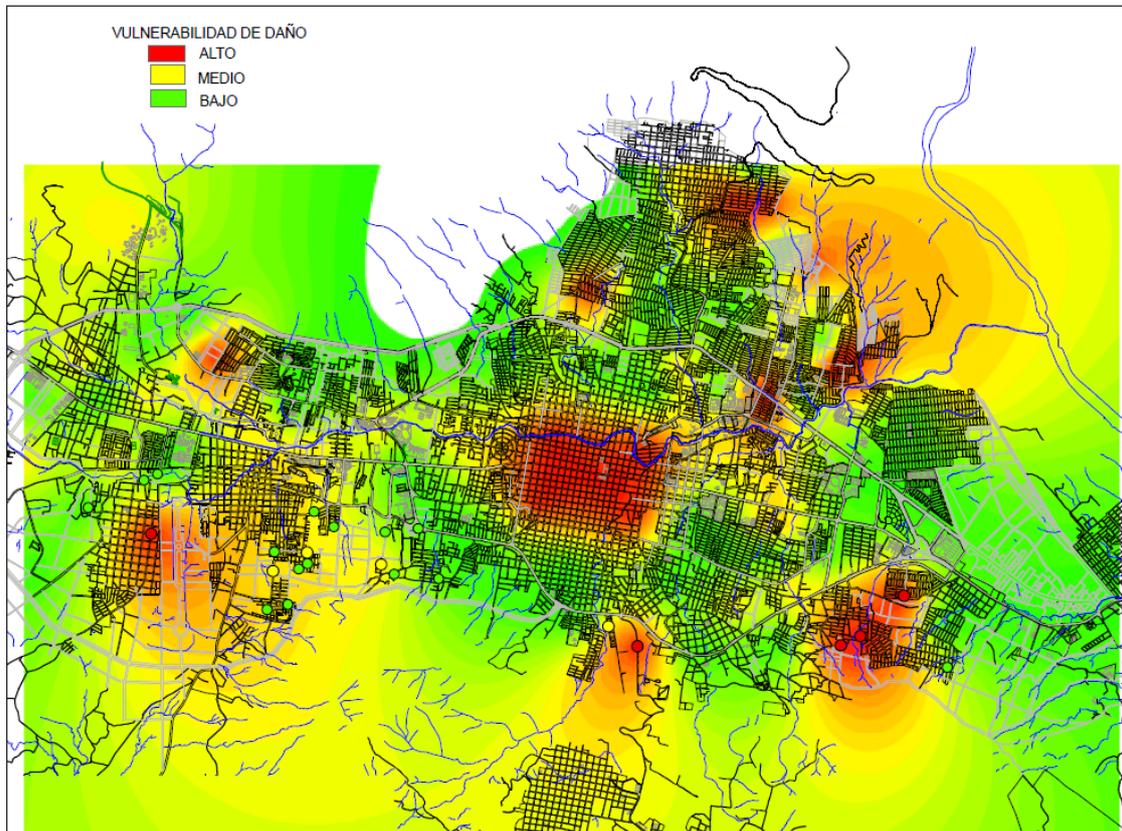


Figura 129. Mapa daños observados en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

8.5. Propuesta de red acelerográfica en tuxtla gutiérrez

Finalmente y derivado de los estudios realizados se presenta una propuesta de red acelerográfica para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Wilson et al., (2007), la cual debe interactuar con la Red Interuniversitaria de Ingeniería Sísmica (RIIS) y la Red del Servicio Sismológico Nacional de la UNAM (SSN). La coordinación de esta red local debe estar a cargo del Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastre del Estado de Chiapas.

Al contar con una red Acelerográfica se puede evaluar con mayor precisión el peligro sísmico, así como los efectos de sitio (a través de los factores de transferencia), factores de amplificación, leyes de atenuación, identificación de fallamiento cortical activo, definir espectros más específicos para diversas regiones, planear el crecimiento de las ciudades, entre otros. Además de temas de actualidad, tales como evaluar el riesgo complejo (sismo + remoción de masas, sismo + riesgo volcánico, entre otros), etcétera.

Un elemento clave para valorar la importancia de la microzonificación sísmica, es determinar el efecto de sitio y los niveles de amplificación en cada parte de la ciudad, esto queda de manifiesto al evaluar mediante sismos y no solo con ruido ambiental las amplificaciones relativas en diversas partes de la ciudad. Para ejemplificar esta circunstancia se desarrolla el análisis del sismo sucedido el 7 abril del 2011 con una magnitud 6.7 a 83 km de distancia de las Choapas, Veracruz, a una profundidad 167 km (datos tomados de la página web de Servicio sismológico nacional <http://www.ssn.unam.mx/>). Este movimiento fue captado en Tuxtla Gutiérrez en dos sitios: Las instalaciones de la escuela de ingeniería ambiental de la UNICACH (libramiento norte poniente) y en la Facultad de Ingeniería de la UNACH (en la zona del valle en el poniente de la ciudad), en la Figura 130 se muestra el lugar de estas dos estaciones acelerográficas.

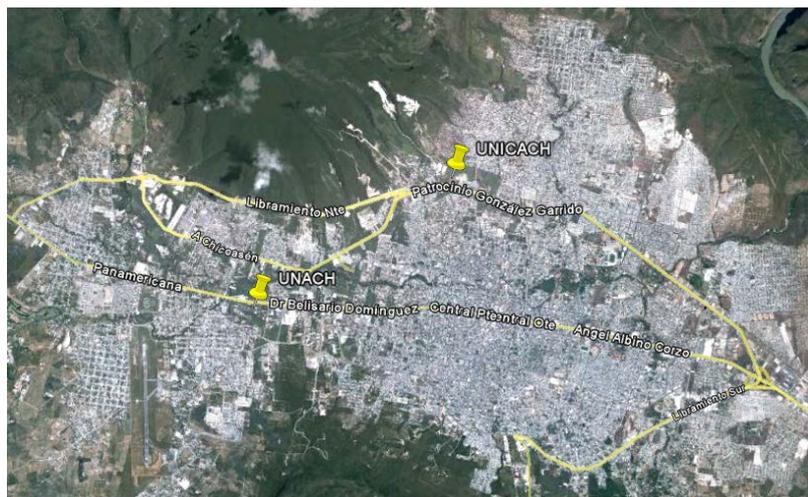


Figura 130. Ubicación de los acelerógrafos fijos de la escuela de Ingeniería ambiental de la UNICACH y la facultad de Ingeniería de la UNACH.

La Figura 131 muestra los acelerogramas de dichos lugares, que al estar a la misma escala muestran claramente que existe una amplificación del

movimiento en la estación acelerográfica de la UNACH con respecto a la UNICACH.

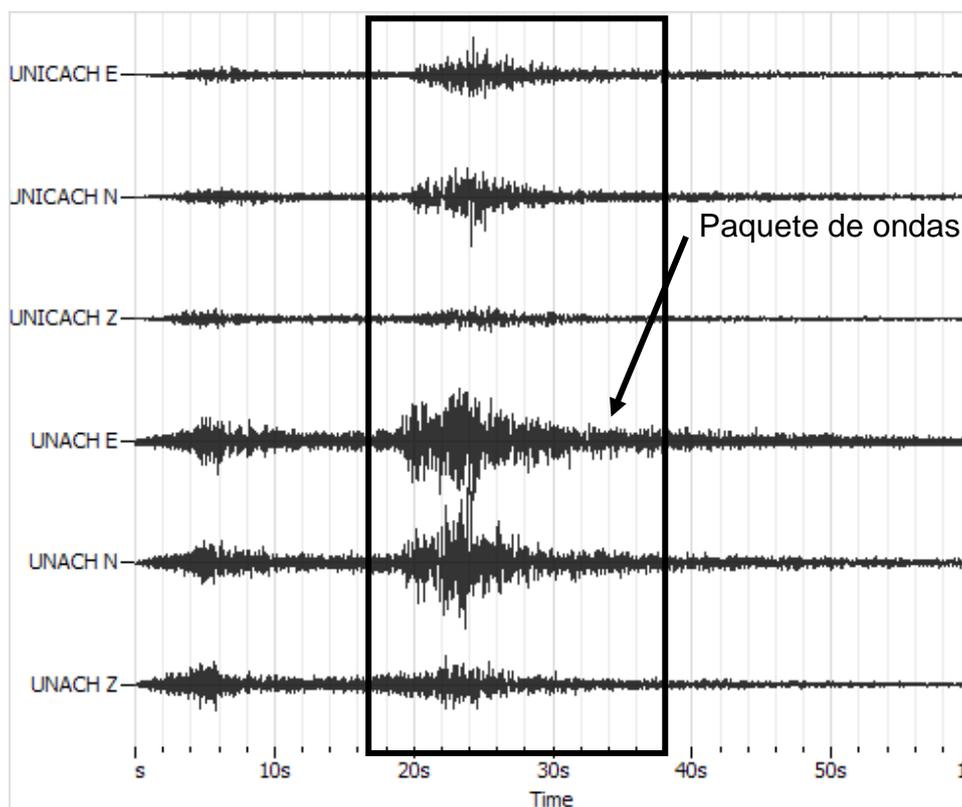


Figura 131. Acelerogramas del sismo del 7 de abril de 2011 se encuentran en la misma escala, los tres primeros registros corresponden a la UNICACH y las tres siguientes a la UNACH (Piña 2012).

El cuadro 9 muestra las aceleraciones máximas en cada dirección de los acelerogramas y las amplificaciones relativas normalizando en torno a la señal correspondiente de la UNICACH, en la cual se resume que la aceleración máxima presentada en la estación de la UNICACH es de 48 gal en dirección N-S y para la estación UNACH en la misma dirección N-S tiene una aceleración máxima registrada de 115 gal. Al realizar un comparativo entre estas aceleraciones, indica que para la estación de la UNACH la aceleración es aproximadamente 2.4 veces con respecto a la UNICACH para esa componente y 4.23 para la vertical.

Cuadro 9. Datos de los acelerogramas del sismo registrado el 7 de abril de 2011.

Lugar	Dirección	Aceleración Máxima (gal)	Nivel de amplificación relativa
UNICACH	E-O	38	1
	N-S	48	1
	V	13	1
UNACH	E-O	102	2.68
	N-S	115	2.40
	V	55	4.23

Los acelerogramas obtenidos en dos diferentes puntos del mismo evento sísmico, tras realizar el cociente espectral H/V, en el de la UNICACH se

observa un pico predominante en las frecuencias de 8.5 Hz con una amplitud relativa de 4, para la relación H/V de la UNACH el pico predominante lo observamos en la frecuencia de 3.5 Hz con una amplificación relativa de 7, en la Figura 132 se muestra las dos curvas de cocientes espectrales H/V, este procesamiento es similar al procesamiento de los microtremores, con la variante de que en estos cocientes espectrales H/V solo se analizó paquete de ondas S.

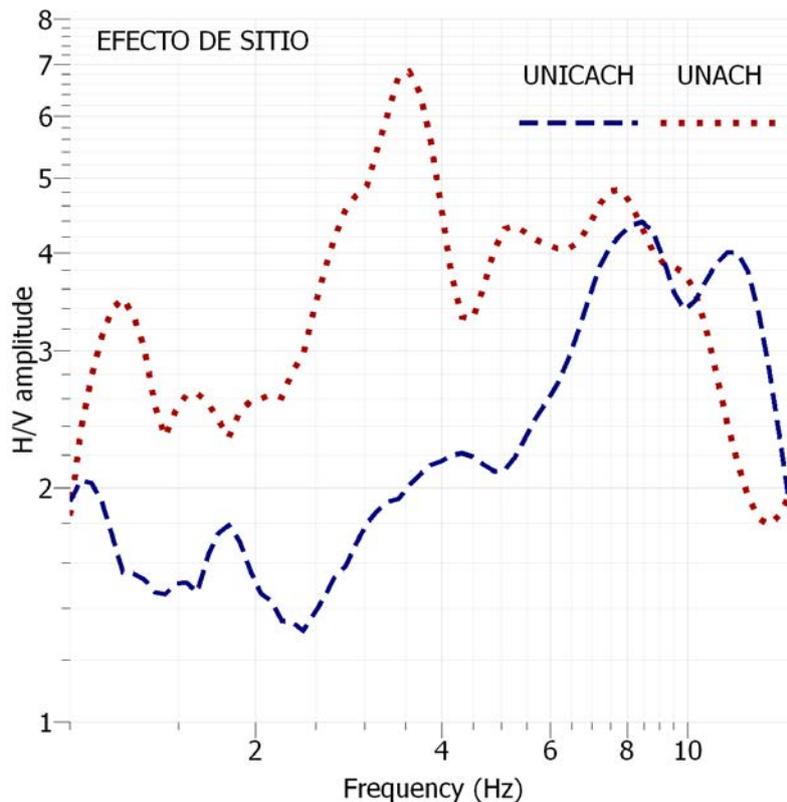


Figura 132. Gráfica de cocientes espectrales H/V en dos sitios de la ciudad a partir del sismo del 7 de abril de 2011. La azul corresponde a la UNICACH, la línea roja muestra el cociente espectral en la UNACH (Piña, 2012).

Comparando los cocientes espectrales H/V del sismo con respecto a los cocientes espectrales H/V obtenidos de registro de microtremores, como se muestra en la Figura 133 no varían el comportamiento de los cocientes espectrales H/V e indican aproximadamente el periodo fundamental de vibración del suelo, con respecto a las amplificaciones, los microtremores presentan mayor amplificación relativa que las obtenidas con movimientos fuertes, esto puede ser debido a muchos factores, al nivel de ruido expuesto el sensor, la hora de tomar las mediciones, el lugar de posicionamiento del sensor, que en el caso de los microtremores fue en pavimento, y las condiciones y características del suelo donde se registraron los eventos, el registro del sismo y los microtremores, no obstante esta situación demanda la implementación de una red de acelerógrafos que permita fortalecer los valores de los cocientes espectrales en diversos sitios de la ciudad con sismos y no solo con microtremores.

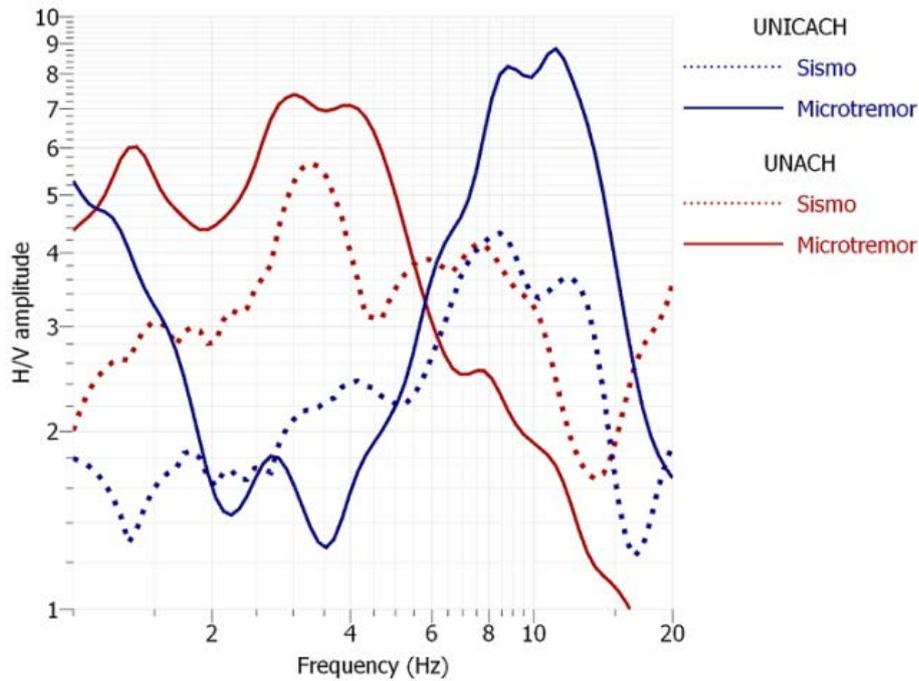


Figura 133. Gráficas de H/V de Microtremores (línea continua) vs sismo (línea discontinúa) (Piña, 2012).

En la figura 134 se muestra de manera esquemática la ubicación de una red acelerográfica mínima que se complementa con los dos equipos actuales de la UNACH y UNICACH, mismos que fueron empleados para el análisis del sismo del 7 de abril de 2011. Las coordenadas de la ubicación final de los equipos no se presentan, ya que debe haber un convenio con las instituciones que se presentan para hacerse responsables de los equipos.



Figura 134. Ubicación de los acelerógrafos propuestos para la red acelerográfica fija para Tuxtla Gutiérrez.

9. Comentarios finales

Derivado de los análisis de los puntos registrados en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, con sensores de aceleración y sensores de velocidad, se estimó el efecto de sitio, para lo cual en el documento se presenta un mapa con la distribución espacial de este efecto mediante la propuesta de zonificación.

En ese mapa la ciudad se ha dividido en dos zonas donde el periodo dominante (T_0) del suelo presenta valores de 0.06 y 1 segundos (15 y 1 Hz, respectivamente), se ubica una zona de transición y una de lomas; como se puede constatar en las gráficas H/V obtenidas en dos familias, las cuales se encuentran en los anexos 3 y 4. La primera familia de curvas tiene un máximo hacia los 15 Hz y corresponde a un área denominada “zona de lomas”, para referirnos a suelos originales sin modificación. La segunda familia, que se refiere a las gráficas H/V, presenta un máximo espectral hacia los 2 Hz y pertenece a un área denominada “zona de transición”, para referirnos a suelos modificados o que se hayan sustituido las arcillas por otro tipo de suelos.

Considerando los datos obtenidos con la metodología descrita anteriormente, los periodos del suelo varían desde 0.06 y hasta 1 segundo, siendo los periodos de 0.06 hasta 0.5 segundos los que predominan en la ciudad, se presentaron principalmente en el centro de la ciudad los periodos de 0.51 hasta 1 segundo que afectan a las colonias Barrio Niño de Atocha, Fracc. La llave, Penipak Norte, Las Asturias, Las Delicias, Fracc. Monte Bello, Brasilia, Fracc. Miramar, La Pimienta, Parque Madero, Barrio Santo Domingo, San Marcos, El Calvario, San Roque, El Sabinito, Santa Cruz, Fracc. Las Canteras, Fracc. Ladera de la Loma, Fracc. Paraíso Ojo de Agua, Fracc. 1ro de Mayo, El Calichal, San Francisco Sabinito, Fracc. San Francisco Sabinal, Magdalena, Unidad Hab. La Joya, Fracc. Aramoni, Bugambilias, Villas Montes Azules, Los Tucanes, Fracc. Bugambilias, Ampliación Arroyo Blanco, Paulino Aguilar Paniagua, Arroyo Blanco y parte de las colonias Nuevo Mirador, Pedregal San Antoni, Fracc. Loma Real, Quetzalcóatl, Rincón de la Florida, Bosques del Parque, Tzocotumbak, Santa Cecilia, Obrera, San Jorge, Fracc. Monte Real, Fracc. Monte Azul, Fracc. SAHOP, Plan de Ayala y San Pedro Progresivo, estos resultados principalmente se encuentran afectados por el río El Sabinal.

La amplificación relativa asociada varía desde 2 hasta 25 veces y existe una distribución dispersa en toda la ciudad, pero se hallan tendencias, debidas a características del suelo, a una mayor amplificación en el centro y la parte más baja de la ciudad, cercanas al río Sabinal.

Las señales procesadas de las laderas permiten observar que en la zona centro y parte del norte se encuentran mayores periodos (0.51 - 1 segundos promedio) que en el resto de la ciudad (0.06 - 0.50 segundos promedio), lo cual, se debe posiblemente a mayor espesor de sedimentos deformables, material constitutivo menos denso, entre otros factores.

El mapa obtenido en este trabajo aporta una idea más clara de las zonas en particular con una respuesta de amplificación de las ondas sísmicas, aunque estos mapas se modifican con el desarrollo de una ciudad y se deben calibrar

con una red acelerográfica permanente. Para este estudio calibramos respecto a la respuesta del sismo del 7 de abril de 2011 y lo obtenido en las estaciones de la UNACH y la UNICACH.

Estos estudios permiten hacer consideraciones relevantes con respecto a edificaciones y estructuras en construcción para así tomar las mejores decisiones en reducción del riesgo sísmico, y ofrecer mayor seguridad a la población y a la inversión.

10. Referencias

- Aguilar, J., Cruz, R., González, R., Narcía, C., Figueroa, J.A. y H., San Sebastián. (2004). Normas mínimas de seguridad estructural para el estado de Chiapas. Memoria en extenso del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural "Retos de la Ingeniería Estructural". Acapulco, Guerrero, 29, 30 y 31 de octubre y 1 de noviembre.
- Alonso, G., Cruz, R., Cruz, F., Ramírez, M., Ruiz, M. y J. Iglesias. (1999). Resultados de la zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México, D.F.
- Alonso, G., Cruz, R., Cruz, F., Ramírez, M., Ruiz, M. y J. Iglesias. (1995). Zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Universidad Autónoma de Chiapas, Universidad Metropolitana, México, D.F.
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Japan*, Vol. 35, pp. 415-456.
- Aki, K. (1965). A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the Earth's crust, *Geophysics*, Vol. 30, pp. 665-666.
- Arai, H. y K., Tokimatsu. (2004). S-Wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 1, pp. 53-63.
- Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?, *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani editors, *Balkema*, V. 3, pp 1251-1279.
- Barrier, E., Velasquillo, L., Chávez, M. y R., Gaulon. (1998). Neotectonic evolution of Isthmus of Tehuantepec (Southern Mexico). *Elsevier Science Tectonophysics*. 287, 77-96.
- Benito, B., Molina, E. y L., Laín. (2001). Metodología para estudio de amenaza sísmica en Guatemala, aplicación al diseño sismoresistente, Reporte de investigación, Guatemala.
- Campillo, M. (2006). Phase and correlation in random seismic fields and the reconstruction of the Green function, *Pageoph*, Vol. 163, pp. 475-501.
- Castro, A. (2001). Cronología histórica sobre los desastres naturales y sociales en Tuxtla Gutiérrez. *Páginas históricas de Chiapas*, 48, 1-2.
- Castro-Mora J., Almazán-Esqueda, S., Morales-García, R., Bustamante-Yáñez, M.A., Flores-Galicia, E., Gómez-Caballero, J.A., Mora-Rivera, C., Martínez-Hernández, P., Arango-Quiroz, G., Velázquez-Pérez, F.G., Chavarín-Antonio, O., López-Oropeza, R.S., Ortiz-Hernández, L.E., Praga-Pérez, J.J., Sánchez-

Ramírez, D., Sabanero-Sosa, H., Mérida-Cruz, A. y A., González-Ramos. (1999). Monografía Geológico-Minera del estado de Chiapas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Coordinación General de Minería. Editadas por el Consejo de Recursos Minerales Centro Minero. 178p.

Centro Estatal de Información Estadística y Geográfica (CEIEG). (2011). Para consulta en línea página <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/home/>.

CENAPRED, Sistema Nacional de Protección Civil. (2006b). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: fenómenos geológicos. Sistema Nacional de Protección Civil, México, D.F.

CRISIS. (2007). Software de Peligro Sísmico Mundial, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.

De la Madrid, M. (1987). Los municipios de Chiapas, colección México: Enciclopedia de los municipios de México, 549 p.

De la Rosa, J. (1989). Geología del Estado de Chiapas. Comisión Federal de Electricidad INDE-Guatemala, C.A; Gobierno del Estado de Chiapas. México D.F. 192 p.

Espinosa, L. (1976). Propuesta de zonificación geotécnica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.

Esteva, L. y M., Ordaz. (1988). Riesgo sísmico y espectros de diseño en la República Mexicana. Memorias del III Simposio Nacional sobre Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco, 420-458.

Fernández, E. y R., Piero. (1999). Introducción a la Geología karstica. Federación Española de Espeleología. España.

Figuroa, J., Lomnitz, C., Dawson, A., Meli, R. y J., Prince. (1975). Los sismos de julio a octubre de 1975, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.

Figuroa, J. (1986). Isosistas de grandes temblores ocurridos en la República Mexicana, Series del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, 57 p.

Figuroa, J. (1973). Sismicidad en Chiapas, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.

Flores-Estrella, H. (2004). "Método SPAC: Una alternativa para la estimación de modelos de velocidades en el Valle de México", Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

García, V. y G., Suárez. (1996). Los sismos en la historia de México, Edición Científica Universitaria, Fondo de Cultura Económica, UNAM, México, D.F.

González, R., Tena, A., Mora, J.C., Borraz, M.A., Aguilar, J.A., Cruz, R., Figueroa, J.A., Chan, J.A., Ramírez, M.S., Vera, R. y C., Narcía. (2011a). El sismo de Villaflores, Chiapas, su realidad y consecuencias. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Colección Jaguar, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 400 p.

González, R., Mora, J.C., Aguirre, J., Novelo, D., Piña, J. y J.A., Aguilar. (2011b). Evaluation of the Site effect in the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas, according with the analysis of the earthquake damage. En revisión.

González, R., Mora, J.C., Borraz, M.A., Aguilar, J.A. y J.A., Figueroa. (2011c). Peligro sísmico en el norte del estado de Chiapas. En revisión.

González, A. (2010). Análisis de la peligrosidad sísmica en el sureste de México con base en el catálogo del Servicio Sismológico Nacional de 1974 a 2009. Tesis de licenciatura de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, en revisión.

González, R., Borraz, M.A., Sánchez, P.A., De la Cruz, Y., Aguilar, J.A. y J.A., Ruiz, J.A. (2010). Construcción histórica de la vulnerabilidad sísmica en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Memoria en extenso del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, 3 al 6 de noviembre.

González, R., Alegría, J.N., Borraz, M.A., Aguilar, J.A., Ruiz J.A., Vera, P. y C.M., García. (2010b). Empleo de blocks elaborados con residuos de construcción en Chiapas. Memoria en extenso del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, 3 al 6 de noviembre.

González, R., Borraz, M.A., Aguilar, J.A., Narcía, C. y J.A., Ruiz. (2009). Caracterización mecánica del adobe de Tuxtla Gutiérrez y su relación con la vulnerabilidad. Memoria en extenso del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla, 11 al 14 de noviembre.

González, R., Aguilar, J.A. y C., Gómez. (2008). Nuevas tecnologías constructivas de vivienda en Chiapas. Lacandonia revista de ciencias de la UNICACH, 62-74p.

Guzmán, M. y J.J., Meneses. (2000). The North America-Caribbean plate boundary west of the Motagua-Polochic fault system: a fault jog in Southeastern Mexico. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 13, pp. 459-468.

H. Ayuntamiento. (1988). Monografía del municipio de Tuxtla Gutiérrez. México.

Horike, M., Zhao, B. y H., Kawase. (2001). Comparison of site response characteristics inferred from microtremors and earthquake shear waves, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91, No. 6, pp. 1526-1536.

INEGI. (2010). Censo de población y vivienda 2010. Chiapas.

INEGI. (2006). Carta de Uso del Suelo y Vegetación serie III. E15-11 Tuxtla Gutiérrez. Escala 1:250 000. Formato digital.

IPCMIRD. (2010). Sistema Estatal de Protección Civil del Estado de Chiapas. Plan Operativo de Protección Civil por Riesgo Sísmico, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Kanai, K. y T., Tanaka. (1961). On microtremors. VIII, Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 39, 97-114.

Lermo, J. y F.J., Chávez-García. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am., 83,1350-1364.

López, C. (2003). Antier cuando eras menos, el centro de Tuxtla Gutiérrez en 1925. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, 9 p.

Lozano, L., Herraiz, M. y S.K., Singh. (2009). Site effect study in central Mexico using H/V and SSR techniques: Independence of seismic site effects on source characteristics, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol 29, pp. 504-516.

Lugo, J. (1988). Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos). Instituto de Geografía. UNAM. México D.F. 128 p.

McGuire, R.K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis. Second Monograph Series MNO-10. EERI, Oakland, California.

Membrillo, H. (2006). Aportaciones a la geología de Tuxtla y Copoya. Reporte de recorrido geológico 2005-2006. Tuxtla Gutiérrez. Mimeog.

MOC-CFE (2008). Manual de obras civiles de Comisión Federal de Electricidad diseño por sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México.

MOC-CFE (1993). Manual de obras civiles de Comisión Federal de Electricidad diseño por sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México.

Montiel, G. (1975). Las viejas calles de la antigua Tuxtla. Tuxtla Gutiérrez, México.

Mullerried, F. (1957). Geología de Chiapas. Editorial Cultura. México D.F. 179 p.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR of RTRI 30, no. 1, February, 25-33.

Narcía, C., Aguilar, J.A., Ramírez, M.S., Cruz, R. y R., González. (2006). El periodo natural de vibración del suelo en la ciudad de Tuxtla, Gutiérrez,

Chiapas. Revista Quehacer científico en Chiapas. Volumen 1, número 1, segunda época, págs. 22 a 38, enero junio, editada por la Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Narcía, C. (2002). Espesor de la corteza en Chiapas mediante ondas directas y convertidas. Tesis de Maestría, División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología, CICESE. Ensenada, Baja California, México. pág. 91.

Ordoñez, J. (2008). Zonificación geotécnica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Universidad Autónoma de Chiapas, México.

Ordóñez, J. (1994). Estabilización de arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con caliche y arena. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L.M., Alaniz-Álvarez, S., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J.J., Nieto-Samaniego, Á.F. y D.J., Morán-Zenteno. (1991). Geologic provinces of Mexico a new proposal and bases for their definition: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; Universidad Autónoma de Hidalgo. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; Sociedad Mexicana de Mineralogía y Secretaría de Educación Pública. Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica, Convención sobre la evolución geológica de México y Primer Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca, Hidalgo, Memoria.

Pardo, M. y G., Suárez. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implication: Journal of Geophysical Research, 100, 12357-12373.

Paula, F. (2008). Transformación del centro histórico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez: Rodríguez Núñez editor.

Paz, J.A., González, R. y J., Aguilar. (2011). Caracterización de las Laderas Habitadas en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Revista Pakbal de la Facultad de Ingeniería de la UNACH (aceptado).

Paz, J. (2010). Caracterización de las laderas habitadas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Tesis de Maestría en Ciencias en Desarrollo Sustentable, UNICACH (en desarrollo).

Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y A., Garrido. (2008). Fundamentos para la generación semi automatizada de Unidades de Paisaje. Fundamentos y Método. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. México D.F. 73-79 pp.

Ponce, L., Gaulon, R., Suarez, G. y E., Lomas. (1992). Geometry and state of stress of the downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico, Geophysical Research Letters, Vol. 19, No 8, page 773-776.

PRODISIS. (2008). Software Peligro Sísmico, Instituto de Investigaciones Eléctricas de CFE, Cuernavaca, Morelos.

PSM. (2004). Software Peligro Sísmico en México, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.

Rebollar, C., Quintanar, L., Yamamoto, J. y A., Uribe. (1999). Source process of the Chiapas, Mexico, Intermediate-Depth Earthquake of 21 October 1995, Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 2 pp. 348-358, April 1999.

Reglamento de Construcción. (2004). Para Tuxtla Gutiérrez. Periódico oficial. Gobierno del Estado de Chiapas.

Reglamento de Construcciones y Servicios Urbanos. (1995). Para los Municipios de Tuxtla Gutiérrez, Tapachula, San Cristóbal de las Casas, Comitán, Tonalá, Huixtla, Arriaga y Villaflores. Periódico oficial. Gobierno del Estado de Chiapas.

Rodríguez, J. (2005). Bases y desarrollo de sistemas de control sísmico para el ferrocarril: Aplicación a la Alta Velocidad Española (AVE). Tesis Doctoral. Facultad de C.C. Físicas (U.C.M.) Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología).

Rodríguez, M., Nava, E., Domínguez, T. y J., Havskov. (1985). Informe de los sismos ocasionados durante la construcción de la presa Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.

Rodríguez, Q. (2007). Estructura tridimensional de velocidades para el sureste de México, mediante el análisis de trazado de rayos sísmicos de sismos regionales. Tesis de Maestría posgrado de Ciencias de la Tierra, Sismología y Física del Interior de la Tierra. Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F. 83 pp.

Ruiz, J.A. y J.A., Aguilar. (2006). Caracterización geométrica y mecánica de piezas de ladrillo de barro rojo recocido de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, 1 al 4 de noviembre.

Salas, G.P. (1975). Carta y provincias metalogenéticas de la República Mexicana: México, D.F., Consejo de Recursos Minerales, Publicación 21-E, 242 p.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). Carta geológica-minera Tuxtla Gutiérrez E15-11 Chiapas y Oaxaca. Servicio Geológico Mexicano, INEGI, SE.

Suárez, G. y K., Singh. (1986). Tectonic interpretation of the Trans Mexican Volcanic Belt Discussion: Tectonophysics, 127, 155-160.

Trigos, J. (1998). Riesgo sísmico, construcciones y reglamentos en México. Memorias del III Simposio Nacional sobre Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco, 323-345.

Tupak, O. (2009). Microzonificación sísmica, Universidad Internacional de Andalucía. UNÍA Huelva, España.

<http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/home/>

<http://www.geopsy.org/>

<http://www.proteccioncivil.chiapas.gob.mx/>

<http://ssn.unam.mx>

11. Anexos

Anexo 1. Sismos ocurridos en el estado de Chiapas con magnitud superior a 6.5

Cuadro A1. Sismos ocurridos en el estado de Chiapas con magnitud superior a 6.5,³ (SSN, 2008)

Año	Mes	Día	Tiempo	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud	Zona
1816	07	22					7.5	Chiapas-Guatemala
1858	05	02					7.0	Chiapas-Oaxaca
1870	05	11					7.0	Chiapas
1897	06	05					7.0	Chiapas
1902	04	18					7.0	Tapachula
1902	09	23	20:18:00	16.583	-92.583	25	7.7	Tuxtla Gutiérrez
1903	01	14	01:47:36	15.000	-93.000	33	7.6	Costa de Chiapas
1908	03	26					7.5	Costa de Chiapas
1912	12	09	08:32:24	15.500	-93.000	0	7.0	Costa de Chiapas
1914	03	30	04:41:18	16.767	-92.150	150	7.2	Tabasco-Chiapas
1919	04	17	11:23:30	14.533	-92.317	100	7.0	Tapachula
1921	12	10		15.500	-92.500		7.0	Chiapas
1925	12	10	14:14:42	15.500	-92.500	0	7.0	Costa de Chiapas
1926	03	24	10:57:14	15.633	-92.100	100	6.5	Chiapas
1927	05	09	20:07:44	16.667	-93.517	100	7.0	Tuxtla Gutiérrez
1928	03	22					7.5	Oeste de Chiapas
1928	04	17					7.7	Oeste de Chiapas
1929	03	21	02:39:33	14.000	-92.467	100	6.5	Costa de Chiapas
1931	09	26	19:52:28	15.000	-92.000		6.5	Costa de Chiapas
1934	12	24	14:37:50	16.033	-92.467		6.5	Chiapas
1935	12	14	22:07:18	14.717	-93.083		7.3	Tuxtla Gutiérrez
1937	05	28	15:37:21	16.717	-93.083		6.5	Chiapas
1941	02	11		15.200	-94.400		7.0	Costa de Chiapas
1942	11	20	04:05:47	16.467	-94.433	100	7.2	Chiapas
1943	06	15		14.600	93.000		7.0	Costa de Chiapas
1943	09	23	15:02:46	15.500	92.183	100	6.7	Costa de Chiapas
1944	06	28	07:58:54	15.000	-92.500		7.1	Costa de Tapachula
1945	10	27	11:24:49	14.150	-93.383	100	6.7	Costa de Chiapas
1946	06	26	07:53:49	14.717	-91.300	200	7.2	Costa de Chiapas
1946	07	11	04:46:46	17.235	-94.617	70	7.1	Chiapas, Oaxaca y Veracruz
1948	07	16	07:19:37	14.633	-91.177		6.8	Costa de Chiapas
1949	12	22	09:30:49	15.900	-93.000	100	6.5	Cerca de Tuxtla Gutiérrez
1950	10	23	16:13:24	13.800	-91.783	100	7.0	Costa de Chiapas
1950	10	23	17:47:59	13.800	-91.783	100	6.5	Costa de Chiapas
1952	12	31	20:16:27	15.417	-93.800		6.7	Chiapas
1953	08	24	13:21:14	14.533	-92.317	100	6.5	Costa de Chiapas
1954	02	05	15:18:01	17.333	-92.117	100	6.7	Chiapas
1955	09	25	08:28:32	15.833	-92.833	200	7.0	Cerca de Pijijiapan
1957	07	08	13:30:50	15.217	-92.000	100	6.5	Chiapas
1959	04	28	11:09:44	15.833	-92.833		6.6	Chiapas
1960	07	13	16:23:50	17.433	-94.450	60	6.9	Chiapas

³ http://www.ssn.unam.mx/SSN/Sismos/sismicidad_mx_siglo_xx.html

Año	Mes	Día	Tiempo	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud	Zona
1970	04	29	14:01:34	14.463	-92.683	44	7.1	Costa de Chiapas
1976	04	02		15.260	89.190	13	7.5	Costa de Chiapas y Guatemala
1983	12	02		14.030	91.950	35	7.0	Costa de Chiapas y Guatemala
1986	09	10		14.800	92.680	34	7.2	Costa de Chiapas
1993	09	10	19:12:57	14.800	-92.687	34	7.2	Costa de Chiapas
1994	03	14	20:51:26	15.984	-92.432	160	6.8	Chiapas
1995	10	20	02:38:58	16.794	-93.648	165	6.5	Chiapas
2001	11	28					6.5	Costa de Chiapas
2002	01	16	17:09:56	15.430	-93.550	76	6.7	Costa de Chiapas
2007	06	13	14:29:48	13.260	-91.430	20	6.6	Ciudad Hidalgo
2008	04	14	22:03:06	13.270	-91.040	40	6.5	Ciudad Hidalgo
2008	10	16	14:41:22	13.870	-92.500	23	6.6	Ciudad Hidalgo
2011	04	07	08:11:22	17.200	-94.340	167	6.7	83 km al suroeste de Las Choapas

- El tiempo empleado corresponde a GMT (Greenwich Mean Time). Tiempo universal, 6 horas más respecto al tiempo local de México (5 horas en horario de verano).
- Las magnitudes son diferentes y dependen del equipo o red que la reporta.

En el cuadro 1 se muestran los sismos con magnitud superior a 6.5, cuyo epicentro se localizó en el estado de Chiapas o sus costas durante el siglo XX y el inicio del siglo XXI, según las bases de datos del SSN (Servicio Sismológico Nacional) y complementada con información de artículos y reportes de sismos de diversas fuentes que se encuentran en las referencias de Figueroa (1973). Los datos de sismos históricos son referencias cuyos parámetros son aproximados y, en muchas ocasiones, están limitadas por el estado del conocimiento en el momento en que fueron publicados.

Anexo 2. Sismos históricos ocurridos en el estado de Chiapas, reportados por distintas fuentes con intensidad igual o mayor que VI

Cuadro 2-A. Sismos históricos ocurridos en el estado de Chiapas, reportados mediante distintas fuentes con intensidad igual o mayor que VI (Figueroa, 1973, García y Suarez, 1996, SSN)

Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1545	12	25		VI	Pérdidas moderadas y zozobra, coincide con el ingreso de Fray Bartolomé a Ciudad Real (San Cristóbal de las Casas)
1565	8			VIII	Daños importantes en San Cristóbal de Las Casas, Zinacantán y Chiapa de Corzo, donde se daña la fuente. En Zinacantán una peste a partir de los muertos del sismo provocó la pérdida de la mitad de los pobladores.
1591	3	14		VIII	Importantes daños en Chiapas y hasta San Miguel, El Salvador. En San Cristóbal de las Casas se cayó la torre de la iglesia y se dañaron construcciones
1607				VIII	Importante sismo en Chiapas
1623	4	4		VII	Fuerte sismo desde Puebla hasta Chiapas
1652				VIII	Colapso de campanario de Catedral, graves daños de Tabasco a Guatemala
1662	5	2		VI	Daño en Chiapa de Corzo
1679				VI	Importante sismo en Chiapas
1681				VI	Importante sismo en Chiapas
1683				VI	Importante sismo en Chiapas
1684				VI	Importante sismo en Chiapas
1689				VI	Importante sismo en Chiapas
1714				VI	Importante sismo en Chiapas
1726				VI	Importante sismo en Chiapas
1729				VIII	Abarcó el estado de Chiapas y se extendió a Guatemala
1743				VI	Importante sismo en Chiapas
1744	5	30		VII	Terremoto daña iglesias y convento de Ciudad Real (San Cristóbal de las Casas)
1765				VI	Importante sismo en Chiapas
1785				VI	Importante sismo en Chiapas
1791				VI	Importante sismo en Chiapas
1798				VI	Importante sismo en Chiapas
1804				VII	Daños en la Catedral de San Cristóbal de las Casas entre otras estructuras
1816	7	22		VIII	Abarcó todo el estado de Chiapas y Guatemala. En San Cristóbal dañó la Catedral
1828	3	5		VI	San Andrés, María Magdalena, Santa Martha, dañó la iglesia.
1855	1	12		VI	Chiapas y Guatemala, actividad del Santa María.
1858				VI	Fuerte sismo en Chiapas
1864				VI	Fuerte sismo en Chiapas
1869	7			VI	Fuerte sismo sentido en Chiapa de Corzo
1870	6	18		VII	Daños importantes en Chiapas y menores en Oaxaca
1871	2	6		VI	Sismo sentido con más intensidad en Chiapa de Corzo, Cunduacán y San Cristóbal de las Casas.
1872	1			VI	Fuerte sismo en Chiapas
1872	8	30		VI	Sismo sentido en San Cristóbal de las Casas

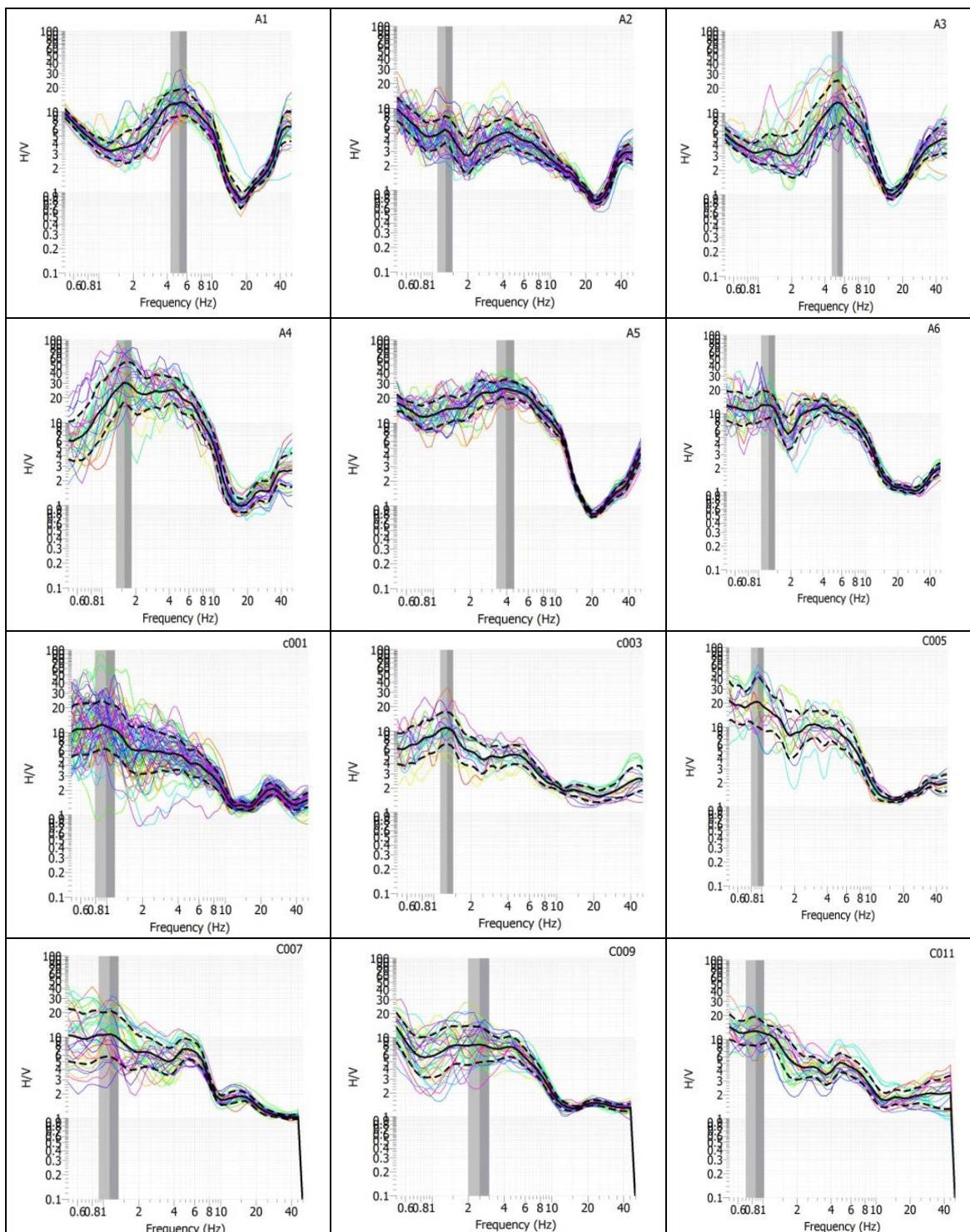
Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1875				VI	Fuerte sismo en Chiapas
1875	3	25		VII	Terrible sismo fuertemente sentido en San Cristóbal
1875	5	25		VI	Sismo sentido en San Cristóbal de las Casas
1878	1	2		VI	Tres sismos durante un día sentidos en Tuxtla Gutiérrez
1879	9	9		VI	Fuerte sismo sentido en Tuxtla Gutiérrez
1880	1	23		VI	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1880	5	2		VI	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1881	5	31		VI	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1881	8	17		VI	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1887	8	1		VII	Tonalá, Cintalapa, Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal
1892				VII	Temblor destructor San Cristóbal de las Casas
1892	7	12		VI	Fuerte sismo en Tapachula
1896	11	15		VI	Fuerte sismo sentido en Tuxtla Gutiérrez
1897	5	29		VI	Fuerte sismo sentido en Tonalá
1897	7	5		VI	Fuerte sismo sentido en Chiapas
1899	3	25		VII	Fuerte sismo en Tuxtla dañó el palacio de gobierno, en Zinacantán hundió parcialmente la iglesia principal y daños importantes en Huistan
1902	4	18	7.0	VII	Daños en Tapachula. Destructor en Guatemala
1902	9	23	7.8	X	El sismo más importante originado en Chiapas. Destructor de Venustiano Carranza y graves daños en San Cristóbal, Chiapa de Corzo y Tuxtla Gutiérrez. Según Isosistas grados VI a X.
1903	5	6		VI	En la región costera de Chiapas, limítrofe con Oaxaca
1904	12	1		VI	Fuerte sismo en Tapachula
1906	6	21		VI	Fuerte sismo en Tapachula
1906	8	21		VI	Fuerte sismo en Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal
1907	6	23		VI	Fuerte sismo en Chiapas
1907	7	21		VI	Fuerte sismo en Tuxtla Gutiérrez
1907	8	18		VI	Fuerte sismo Motozintla
1908	3	26		VI	Fuerte sismo en Tapachula
1908	7	19		VI	Motozintla y Tapachula
1908	11	6		VI	Tapachula
1909	2	26		VI	Fuerte sismo en Chiapas
1909	11	16		VI	Chicharras con fuertes ruidos subterráneos
1909	12	15	5.6	VI	Cintalapa, Providencia, Tuxtla Gutiérrez y Tonalá
1914	3	30	7.5	IX	Daños considerables en Altamirano, Ocosingo y Huixtán. Grado VI en San Cristóbal y Tuxtla Gutiérrez
1919	4	17	7.0	VIII	El Soconusco
1920	7	3	6.0	VII	Daños en Cintalapa
1920	10	9	6.0	VII	En la región costera de Chiapas
1924	6	4	6.0	VII	Tonalá y Arriaga
1925	3	25	4.0	VI	Ciudad Hidalgo
1925	11	28	5.5	VI	Gran alarma en Altamirano y Ocosingo
1925	12	16	6.0	VI	La providencia y Cintalapa
1926	3	24	6.5	VII	Comalapa y Chicomuselo
1927	5	9	7.0	VII	Muy fuerte en Tuxtla Gutiérrez. También sentido en Jiquipilas, Cintalapa y La Providencia
1931	2	12	6.0	VII	Teopisca, Totolapa, Venustiano Carranza. Muy fuerte en San Cristóbal de las Casas
1931	2	15	5.5	VI	Jiquipilas, Cintalapa y Ocozocuahtla
1931	9	26	6.5	VI	Talismán, Tuxtla Chico, Tapachula y Huixtla
1933	8	12	6.0	VI	La Concordia, Trinitaria, Jaltenango y Socoltenango
1934	5	19	6.2	VI	Trinitaria, Socoltenango, La Concordia y Venustiano Carranza

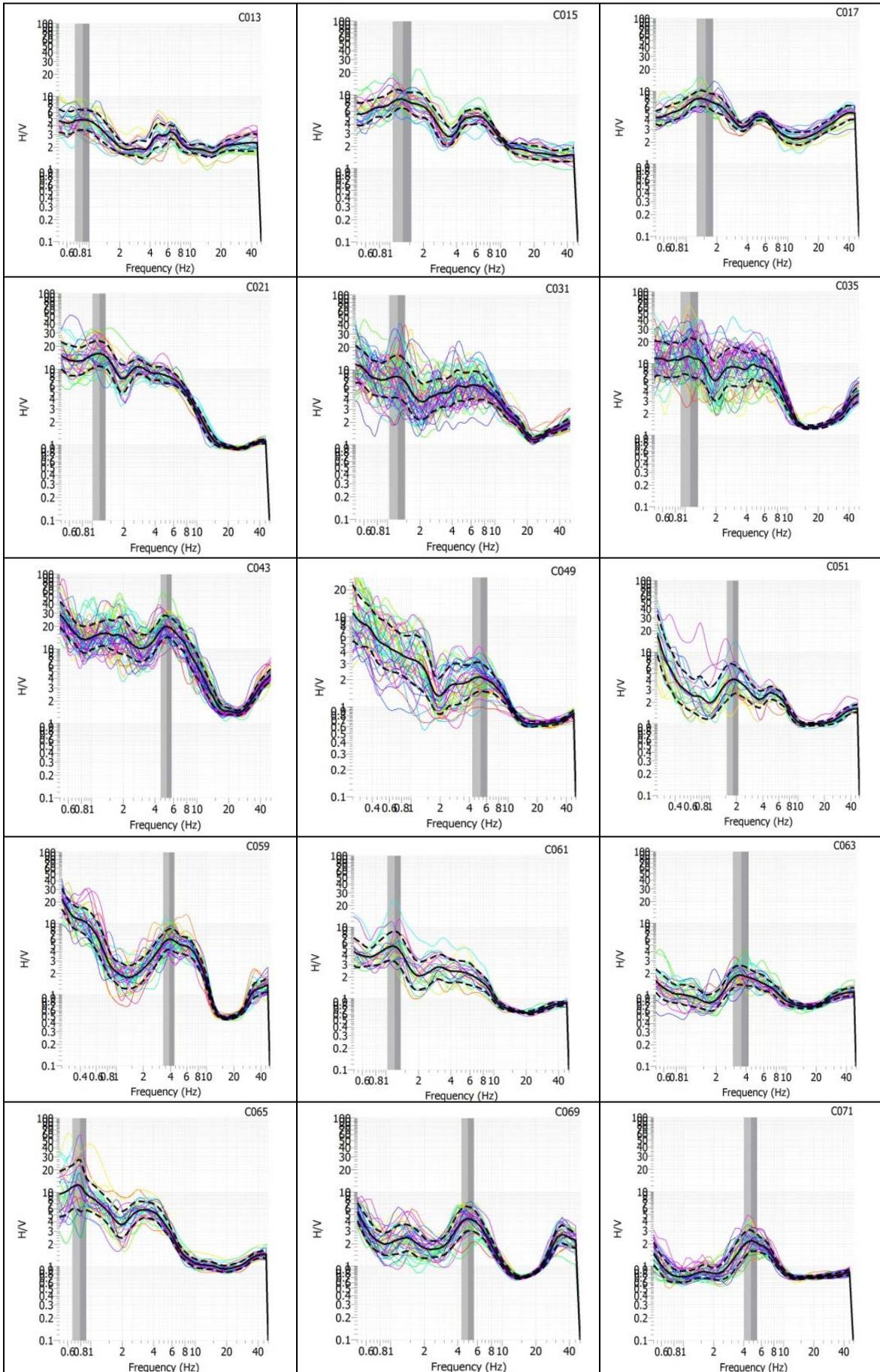
Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1934	7	27	6.2	VII	Motozintla, Niquivil, Mazapa de Madero
1934	12	24	6.5	VI	Chicomuselo y Trinitaria
1935	12	14	7.3	VIII	Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo y San Cristóbal. Muy fuerte en Chicoasén
1936	9	3	6.0	VI	Rivera de Cangui y Chiapilla
1937	1	11	6.0	VI	Chicoasén, Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, San Cristóbal de las Casas y otras poblaciones
1937	5	28	6.5	VII	Tuxtla Gutiérrez y en municipios cercanos
1937	6	8	6.2	VI	Tapalapa, Pichucalco y Ocoatepec
1939	9	28	6.2	VI	Ciudad Hidalgo, Puerto Madero y Tapachula
1939	12	5	6.2	VI	Escuintla, Acapetahua y Pueblo nuevo
1941	6	27	6.2	VI	Tonalá y lugares próximos
1942	11	20	6.7	VI	Chiapas en la región sur limítrofe con Oaxaca
1943	9	23	6.7	VII	Amatenango de la Frontera, Mazapa y Motozintla
1944	8	24	6.0	VI	Arriaga y Tonalá
1945	1	12	5.7	VI	Arriaga, Tonalá, Villaflores y Villacorzo
1945	10	27	6.7	VI	El Soconusco
1947	5	26	6.0	VI	Ángel Albino Corzo y Jaltenango
1947	5	26	5.8	VI	Ángel Albino Corzo y Jaltenango
1949	12	22	6.5	VI	Villaflores, Rivera de Cangui, Tuxtla Gutiérrez, Villacorzo, Chiapa de Corzo y San Cristóbal
1950	10	28	6.0	VI	Motozintla y Mazapa
1950	10	31	5.8	VI	Puerto Madero y Ciudad Hidalgo
1950	11	5	6.0	VI	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1951	1	29	5.8	VI	Motozintla
1951	2	13	6.0	VI	Motozintla y Mazapa de Madero
1952	2	4	5.7	VI	Escuintla, Pueblo Nuevo y Acapetahua
1952	6	2	5.0	VI	Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, San Cristóbal de las Casas y Suchiapa
1952	8	20	5.7	VI	Trinitaria y las Margaritas
1953	8	24	6.5	VII	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1954	2	5	6.7	VI	Graves daños en Tila, Yajalón, Petalcingo y Chilón. Tuvo 13 repeticiones
1954	4	1	6.0	VI	Tapalapa, Ixtacomitán y Pichucalco
1955	1	10	6.0	VI	Motozintla
1955	5	5	5.7	VI	Motozintla y Mazapa de Madero
1955	9	26	7.0	VII	Jaltenango, Pijijiapan y Ángel Albino Corzo
1956	1	9	5.8	VI	Altamirano
1956	1	10	5.6	VI	Cintalapa y la Providencia
1956	12	4	6.0	VI	San Cristóbal de las Casas, Motozintla y Mazapa de Madero
1957	6	22	6.4	VI	Arriaga, Tonalá y Villaflores
1958	9	2	6.0	VI	Puerto Madero y Ciudad Hidalgo
1958	9	3	6.2	VI	Puerto Madero, Ciudad Hidalgo y Mazatán
1959	2	20	6.4	VI	Independencia y Tenosique
1959	4	28	6.6	VI	Ángel Albino Corzo, Jaltenango y La Concordia
1959	4	29	5.8	VI	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1959	5	12	5.8	VI	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1960	1	15	5.6	VI	Ciudad Hidalgo
1960	4	13	5.6	VI	Motozintla y Mazapa de Madero
1960	6	5	5.8	VI	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1961	11	22	5.8	VI	Motozintla
1961	12	20	5.9	VI	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1964	9	14	6.1	VI	Ángel Albino Corzo y Jaltenango
1965	3	1	6.4	VI	Rivera de Cangui, Villaflores y Villa Corzo
1968	1	21	6.2	VI	Mapastepec, Pijijiapan y Sesecapa
1968	5	9	5.5	VI	Providencia

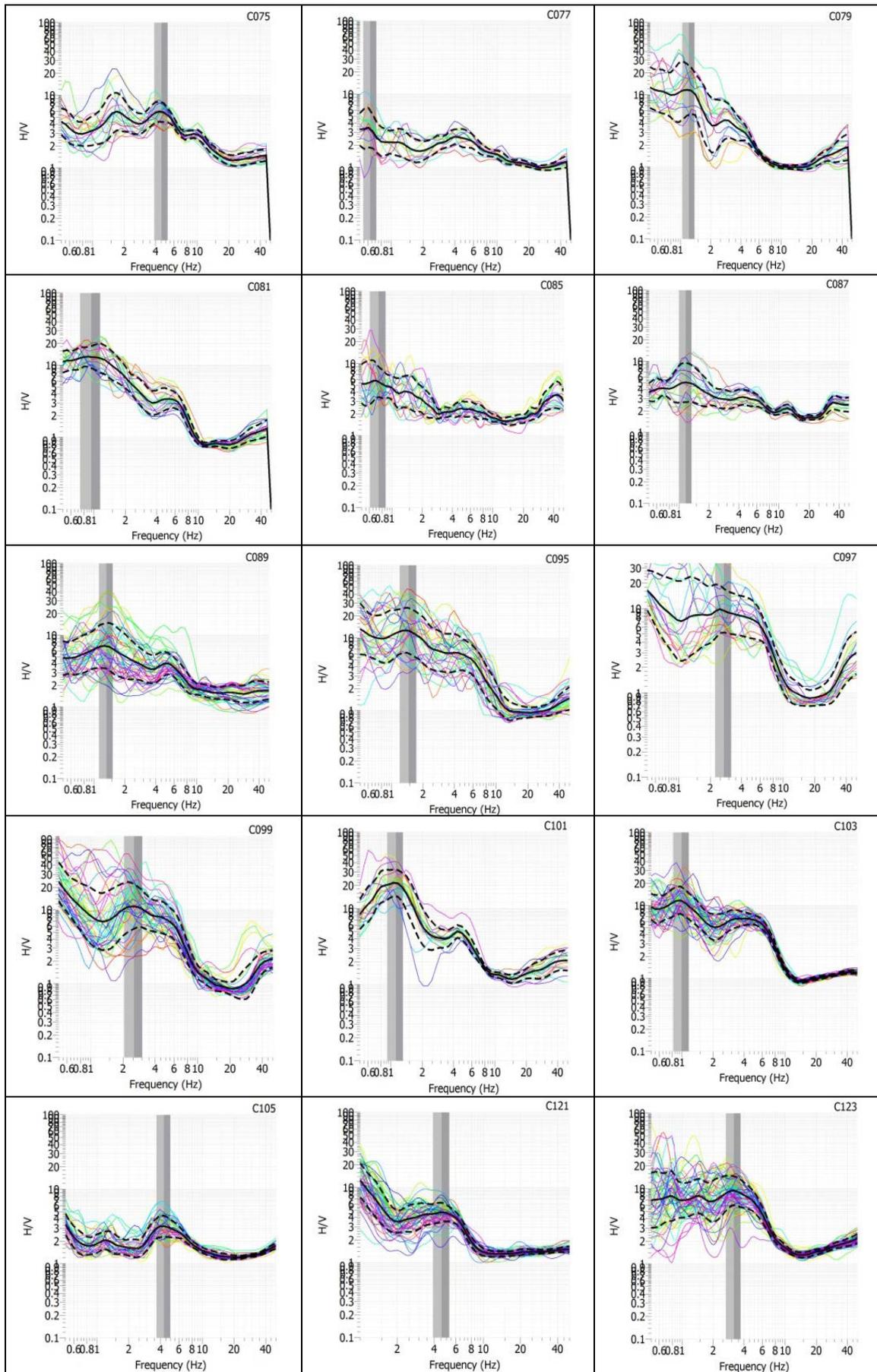
Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1968	9	25	6.0	VIII	Soconusco (48 muertos, daños en Acapetahua por 7 500 000, interrupción en comunicaciones), 333 casas destruidas y 608 dañadas
1968	11	11	5.5	VI	Puerto Madero y Ciudad Hidalgo
1969	9	16	5.0	VI	Pijijiapan y Mapastepec
1970	4	29	7.3	VII	Suchiapa, Mazapa de Madero, Motozintla, Tapachula, Huixtla y Ciudad Hidalgo (Siete repeticiones el mismo día y 32 en total)
1970	5	23	4.9	VI	Tapachula
1970	6	11	4.9	VI	Mapastepec y Sesecapa
1970	12	23	5.3	VI	Puerto Arista
1975	6	30		VII	El Amatal, Chiapa de Corzo, Chicoasén, Comitán y Tehuantepec
1975	10	15		VI	El Amatal, Chiapa de Corzo y Cupía
1995	10	21	7.1	VII	Villaflores, Villacorzo y Tuxtla Gutiérrez
2002	01	16	6.7	VII	Arriaga, San Cristóbal de las Casas, Tapachula y Tuxtla Gutiérrez

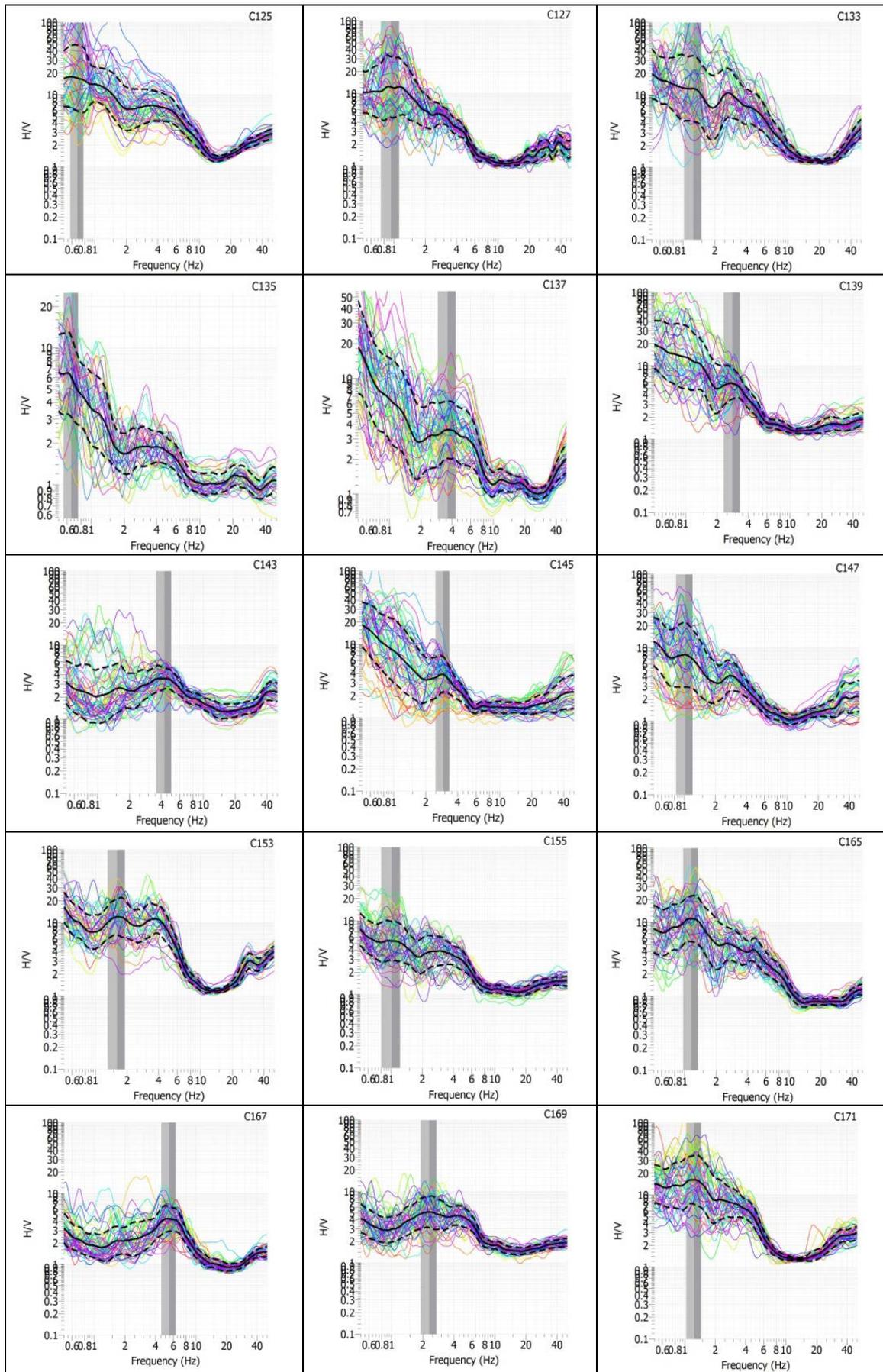
A continuación se presenta en el cuadro 2 una relación de los sismos históricos más importantes del estado de Chiapas, los resultados de los mismos han sido obtenidos de diversas fuentes, también se incluyen diversas épocas y por lo tanto hay involucrados diversos criterios, como el relativo a la época prehistórica y colonial, donde los sismos eran considerados como actos que venían de Dios para castigo. Para el año de 1823 comienza una nueva era para la sismología mediante el inicio de la interpretación científica, la cual se consolida pasando el año de 1850 a una sismología cualitativa y a partir de 1900 a una sismología instrumental.

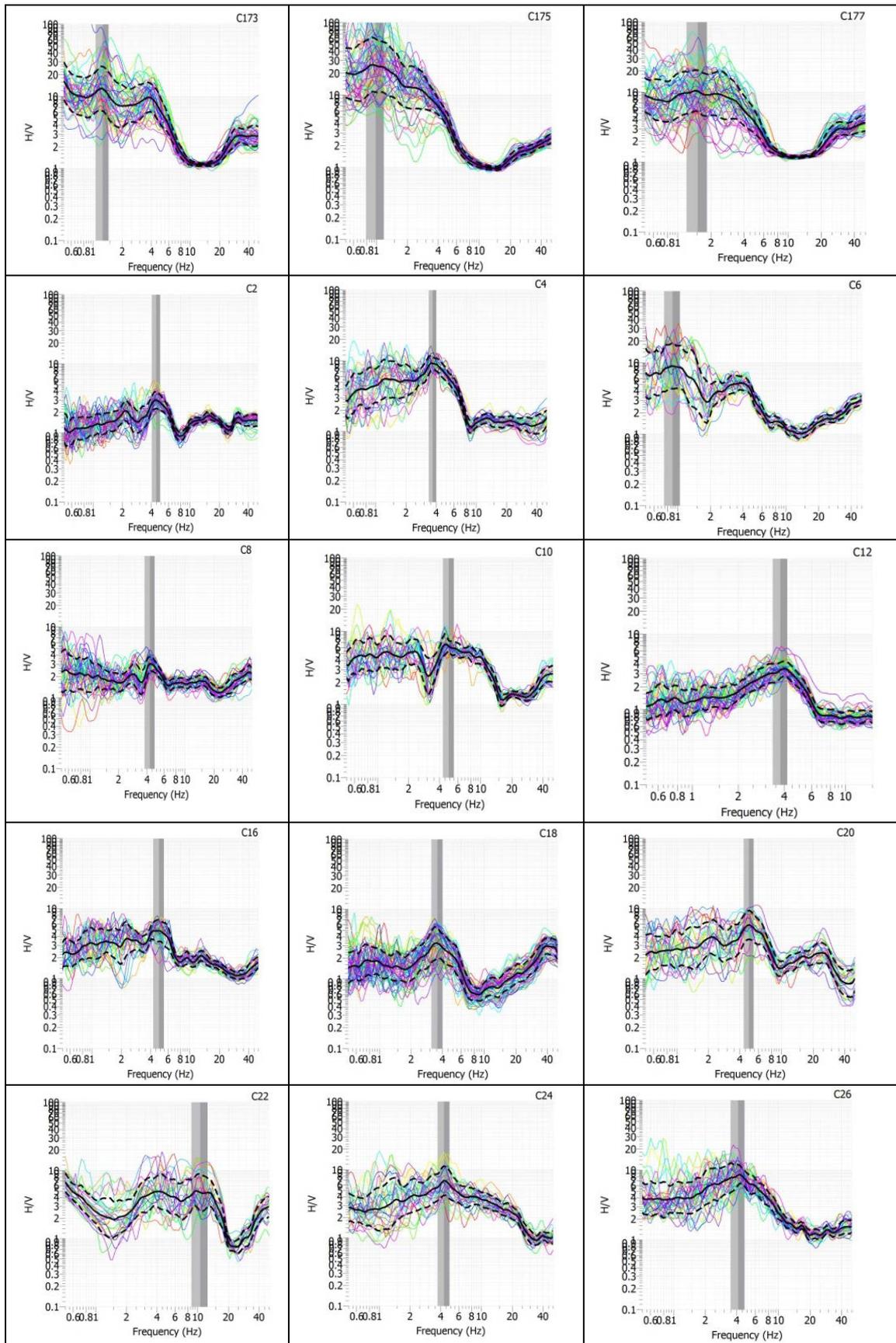
Anexo 3. Graficas H/V para la zona centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas

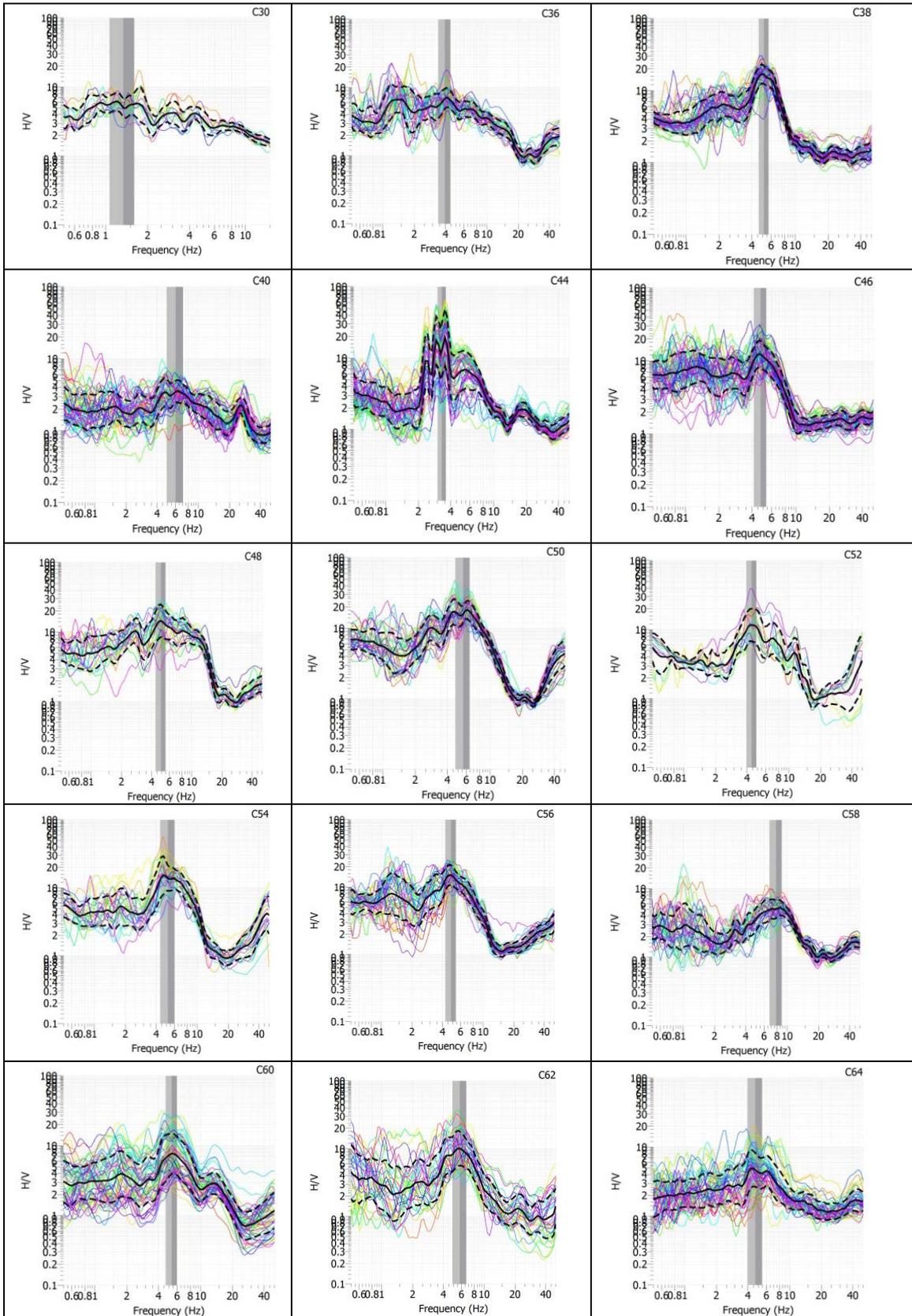


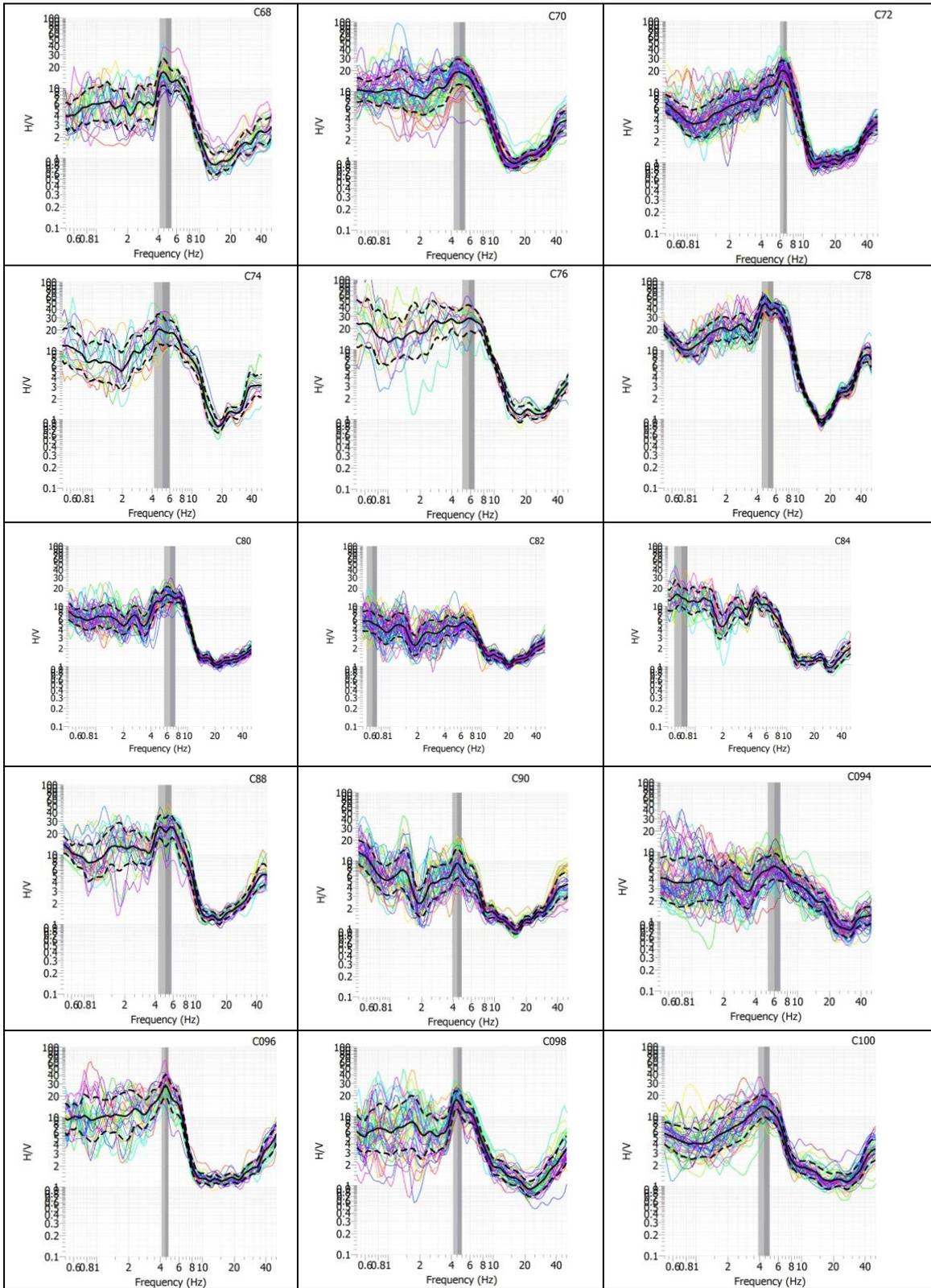


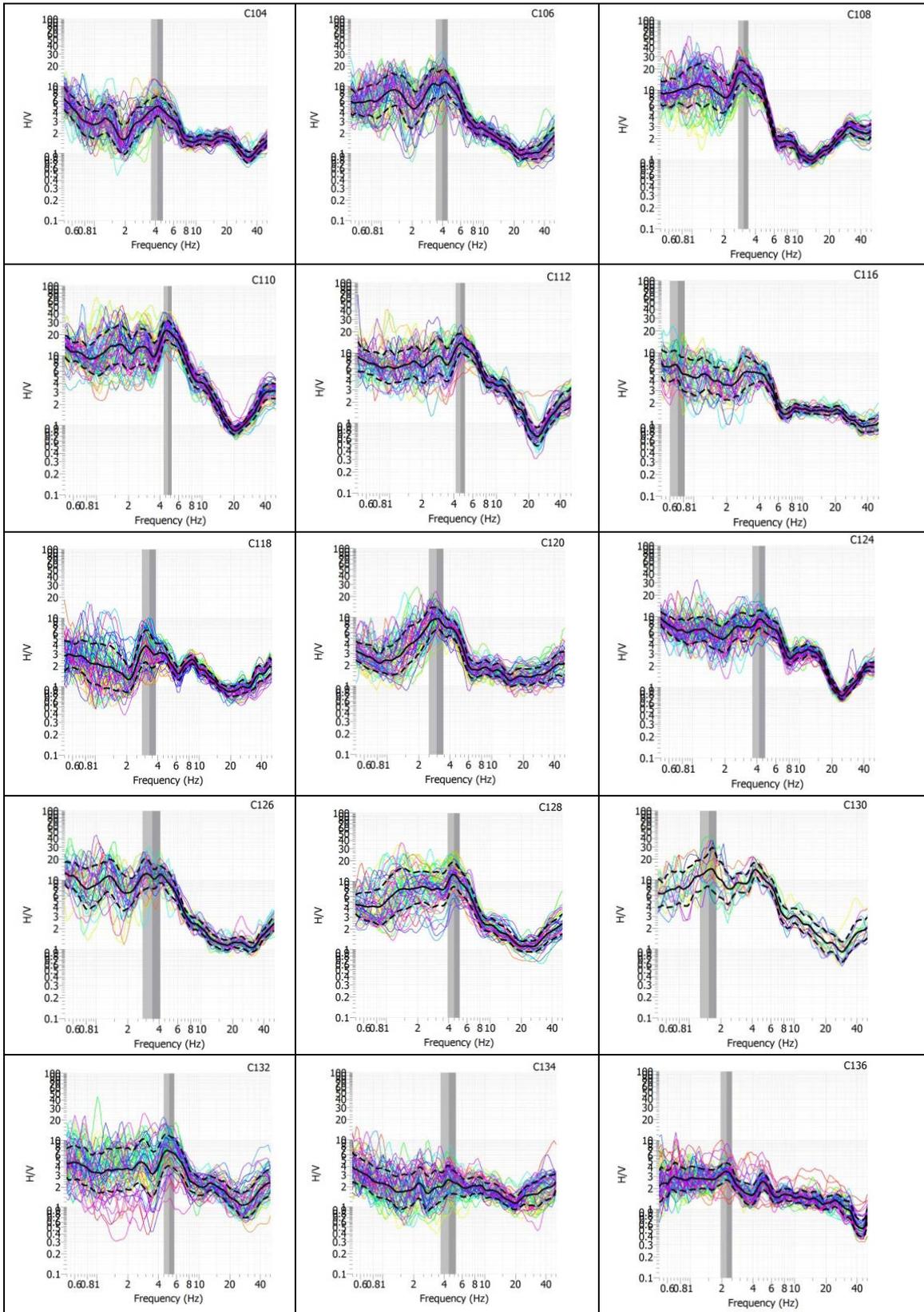


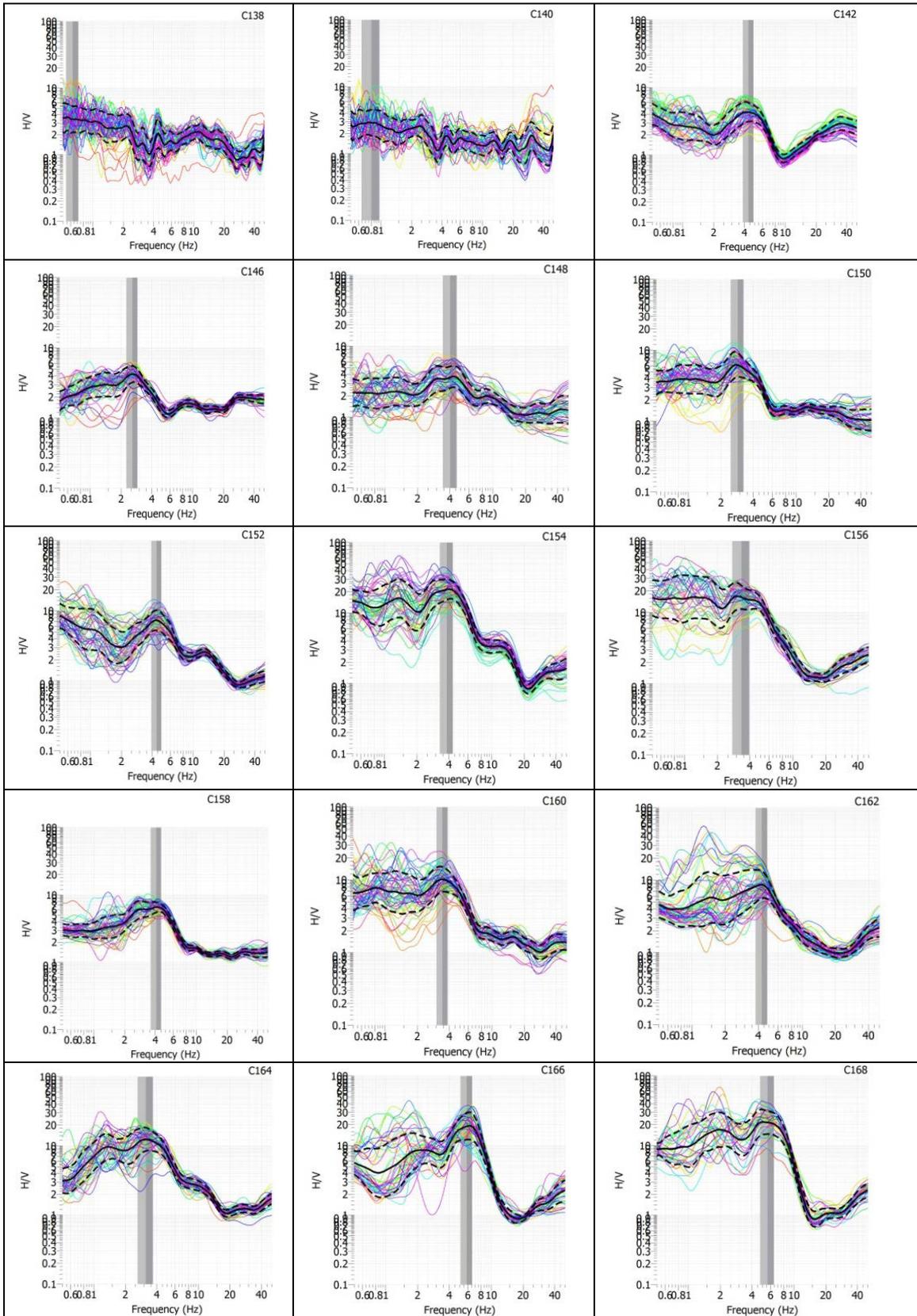


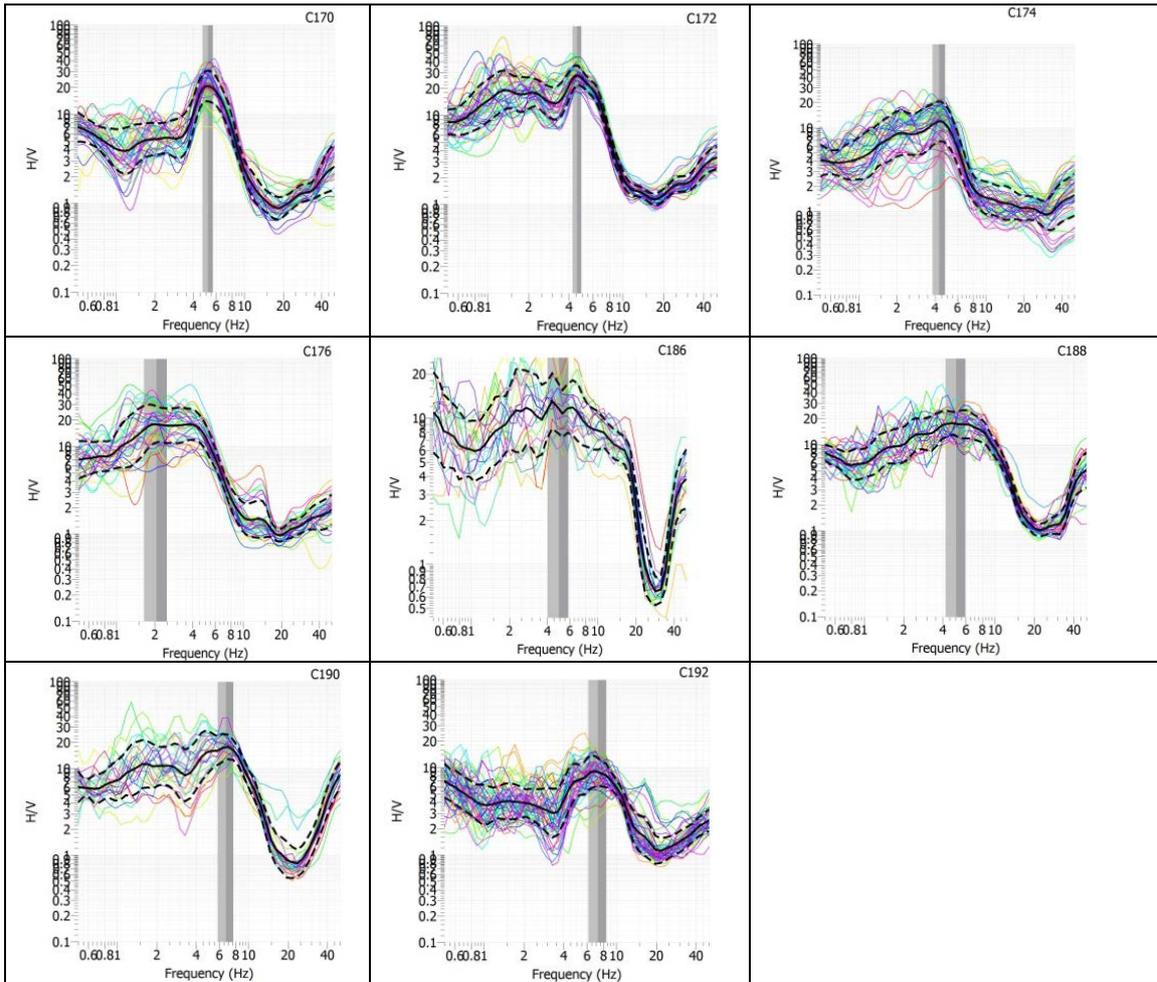












Anexo 4. Graficas H/V para las laderas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas

