

MICROZONIFICACIÓN DE PELIGROS EN ÁREAS URBANAS, MÉXICO

Torres Morales, Gilbert^{1,3}

Lermo Samaniego, Javier²

Rodríguez González, Miguel²

Aguirre González, Jorge²

Dávalos Sotelo, Raymundo⁴

Castillo Aguilar, Saúl³

Córdoba Montiel, Francisco¹

*Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Francisco J. Moreno No. 207,
Col. Emiliano Zapata, Xalapa, Veracruz, México,*

E – mail: gitorres@uv.mx.

²*Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria,
Coyoacán, 04510, México, D.F.*

³*Facultad de Ingeniería Civil, Zona Xalapa, Universidad Veracruzana, Calle de la Pergola,
s/n, Lomas del estadio. C.P. 91000, Xalapa, Ver. México.*

⁴*Instituto de Ecología A.C., Km 2.5, carretera antigua a Coatepec No. 351, Xalapa, Veracruz, México.*

Manuscrito recibido 15 de septiembre de 2011. Aceptado 20 de enero de 2012

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de una microzonificación de peligros geológicos en la Zona Conurbada Xalapa, Veracruz México y las microzonificaciones sísmicas para otras dos Zona Conurbadas en el Estado de Veracruz.: Las ciudades de Orizaba y Veracruz, obtenidas como parte de un proyecto de Atlas de peligros Geológicos para el estado de Veracruz, desarrollado por el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana (CCTUV) y financiado por los Fondos para la prevención de desastres naturales FOPREDEN y los fondos mixtos CONACyT Gobierno del Estado de Veracruz (FOMIX). En estos trabajos se integró la información general de cada zona conurbada mediante un sistema de información geográfica (SIG), obteniendo diferentes mapas temáticos, y mediante la obtención de registros sísmicos y de vibración ambiental y su análisis espectral, mapas de características dinámicas de los suelos en cada zona conurbada.

Se realizó un estudio de las características más importantes de las zonas conurbadas, como su geología, geotecnia, hidrología e hidrología histórica y ubicación de las zonas de daño por sismos históricos. Asimismo, se tomaron puntos de vibración ambiental en las diferentes zonas geológico-geotécnicas para determinar sus características dinámicas y de efecto de sitio mediante la técnica Nakamura, y se han instalado estaciones de monitoreo sísmico permanente en terreno firme y blando, utilizando sismómetros de banda ancha marca Guralp modelo CMG-6TD, registrando en continuo a 100 mps las 24 horas. Con las estaciones de monitoreo sísmico, se pudo aplicar la técnica estándar y corroborar los resultados obtenidos mediante vibración ambiental y la técnica de Nakamura. En la zona conurbada Xalapa, además, se realizaron evaluaciones del peligro por inundaciones y deslizamiento de laderas lo que generaliza el

estudio a una microzonificación de peligros. También, se está iniciando la obtención de registros de vibración ambiental mediante arreglos utilizando la técnica SPAC, con lo que se obtendrán más datos de las diferentes zonas geológico-geotécnicas.

Palabras Claves: Microzonificación, peligro, vulnerabilidad, riesgo, áreas urbanas.

In this work show the results of a geologic dangers microzonification for Xalapa, Veracruz, Mexico, the urban area, and also the seismic microzonifications for other two urban areas of Mexican Veracruz State. These studies were obtained for the cities of Orizaba and Veracruz as part of a project of Atlas of Geologic dangers for the state of Veracruz. This study was developed by the Center of Sciences of the Earth of the University Veracruzana (CCTUV) and was financed by the Fund for the prevention of natural disasters FOPREDEN and the mixed funds CONACyT State government of Veracruz (FOMIX). In these works was integrated the general information of each urban area by a GIS which were obtaining different thematic maps, and also were obtained the seismic registrations produces by the environmental vibration together with spectral analysis maps of dynamic characteristics of the soils for each urban area.

Was realized a study of the most important characteristics in the urban areas like geology, geotechnics, hydrology and historical hydrology in addition with the location of the areas of damage for historical earthquakes. Also, they took points of environmental vibration in the different geologic-geotechnic sectors for determine the dynamic characteristics and site effect with the Nakamura method, and have settled stations of permanent seismic registration both for rigid like soft soils. For this were used wide band seismometers type Guralp CMG-6TD. These registering in continuous manner to 100 mps during 24 hours. With the stations of seismic registration was applied the standard method for corroborate the results obtained with the environmental vibration and Nakamura method. In the Xalapa urban area also were realized evaluations about the dangers by floods and rocks fall or slides amplifying with these the study of dangers microzonification. Finally also is starting the registrations of environmental vibration with the using the SPAC method with that will are obtained more geologic – geotechnical data for the different areas.

Key words: Microzonification, Danger, Vulnerability, Risk, Urban areas.

INTRODUCCIÓN

Los sismos han provocado en México, en numerosas ocasiones grandes desastres, que vienen acompañados de pérdidas económicas y humanas, muchas veces relacionadas con el colapso de estructuras por la falta de información precisa respecto al comportamiento dinámico del suelo y por la aplicación de criterios, en ocasiones erróneos, para el diseño sísmico. La inquietud de conocer mejor este fenómeno natural para tomar medidas de prevención a través de reglamentos de construcción y planes de contingencia, ha convencido al hombre de que la observación, el registro y el estudio de este fenómeno nos conducen a mejores resultados.

El Estado de Veracruz ha sufrido a lo largo de su historia daños importantes debido a sismos de gran intensidad. Cabe recordar que el Estado ocupa el segundo y el tercer lugar en número de víctimas mortales a nivel nacional, sólo después del sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México,

que cobró aproximadamente 6,000 víctimas, de acuerdo con los registros oficiales. El sismo de Xalapa del 3 de enero de 1920 ($M_s=6.2$) ocupa el segundo lugar a nivel nacional en número de víctimas con 650; de éstas, 419 murieron por avalanchas de lodo provocadas por el deslave de material en barrancas. Este sismo se originó en la Sierra Madre Oriental, entre los Estados de Puebla y Veracruz, el epicentro se ubicó aproximadamente a 35 Km. al suroeste de la Ciudad de Xalapa (Suárez, 1991, Flores & Camacho, 1922). El tercer lugar corresponde al sismo de Orizaba del 28 de agosto de 1973 ($M_w=7.0$) con 539 muertes. Este sismo se ubicó en el estado de Puebla muy cerca de la zona limítrofe entre Puebla y Veracruz, a una distancia de menos de 40 Km. al suroeste de Orizaba.

Tabla 1. Sismos más importantes para el Estado de Veracruz

<i>I d</i>	<i>Fecha</i>	<i>Día</i>	<i>Me s</i>	<i>Año</i>	<i>Hor a Loc al</i>	<i>Lat. (N)</i>	<i>Lon g (W)</i>	<i>Prof (Km)</i>	<i>Magnit ud</i>	<i>Temblor de</i>	<i>Referencia</i>
1	03-Ene-20	3	1	1920	22:21	19.27	-97.08	15	$mb=6.5$ $M_s=6.2$	Xalapa	Figuroa (1968)- Suter et al.(1996)
2	14-Ene-31	14	1	1931	19:50	16.34	-96.87	40	$M_s=7.8$	Oaxaca	Singh et al. (1985)
3	25-Jul-37	25	7	1937	21:47	18.48	-96.08	85	$M_s=7.3$	Nopaltepec Ver.	Jiménez y Ponce(1977-78)
4	26-Ago-59	26	8	1959	02:25	18.26	-94.43	21	$M_w=6.4$	Jáltipan	Figuroa (1968)- Ponce y Suárez(1985)
5	11-Mar-67	11	3	1967	08:44	19.23	-95.74	24	$M_w=5.7$	Veracruz	Ponce y Suárez(1985)
6	28-Ago-73	28	8	1973	3:50	18.82	-97.47	82	$mb=6.5$ $M_w=7.0$	Orizaba	Abe (1981)- Singh y Wyss(1976)

Sismos profundos de subducción

Sismos corticales

Además de los sismos de Xalapa y Orizaba, de gran importancia por las vidas que cobraron, han existido otros sismos que dañaron ciudades del Estado, como (Tabla 1): El sismo de 1931 en Huajuapán de León, Oax., ($M_s=7.8$), que causó daños en Veracruz; el sismo de 1937 ($M_s=7.3$), que afectó a Veracruz, Xalapa, Orizaba y Córdoba; el sismo de Jáltipan del 26 de agosto de 1959 ($M_s=6.4$), que destruyó totalmente la ciudad y afectó a las ciudades de Acayucan, Minatitlán y Coatzacoalcos; el sismo del 11 de marzo de 1967 ($M_w=5.7$), conocido como el temblor de Veracruz por los daños ocasionados en aproximadamente 50 edificios. Los epicentros de los sismos se presentan gráficamente en la Figura 1.

Es evidente que el Estado de Veracruz y las ciudades de Orizaba, Veracruz y Xalapa, que han sido afectadas por sismos en el pasado, se han convertido en importantes núcleos turísticos, industriales y comerciales, con inversiones en infraestructura cada vez más fuertes. Además, en el caso de la ciudad de Veracruz sus muelles lo hacen uno de los principales puertos mercantiles y financieros del país. El aumento de la población, la actividad industrial y la alta probabilidad de afectación por temblores,

muestran la importancia de conocer mejor el comportamiento dinámico de los diferentes tipos de suelo (efectos de sitio) para poder tomar medidas para la prevención de daños y desastres. Frecuentemente, la falta de recursos económicos acompañada de la falta de información más precisa sobre la zona, tiene como consecuencia que muchas viviendas e incluso grandes estructuras, se construyan sin el asesoramiento técnico adecuado (Torres, 2000).

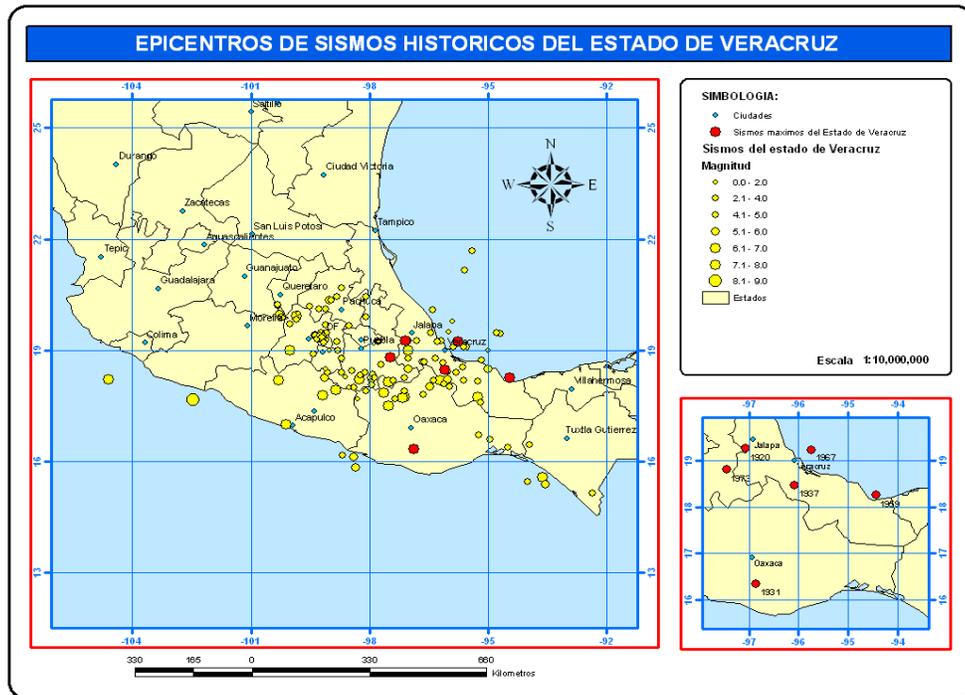


Fig. 1. Mapa que muestra los epicentros de sismos que han afectado al estado de Veracruz, el tamaño indica la magnitud para cada uno de los sismos; resaltando en rojo los que han causado mayor afectación en el estado. (Modificado de Torres, 2008).

METODOLOGÍA

Para la planificación regional, que aspire a un desarrollo sustentable de un área urbana, es indispensable contar con la mayor información sobre ésta. La más importante es la que tiene que ver con el grado de exposición a los fenómenos naturales (peligro). Uno es el peligro sísmico. Este fenómeno afecta considerablemente las áreas urbanas cuando se presenta si no se tienen medidas preventivas y generalmente sus consecuencias cobran una gran factura económica y en vidas humanas.

Estudios sobre la distribución de las calamidades causadas por los sismos indican que las zonas de daño intenso pueden estar muy localizadas y que la envergadura de esos daños puede cambiar bruscamente a distancias muy cortas, es decir, las intensidades sísmicas pueden variar considerablemente entre dos puntos próximos. Lo anterior condujo a la hipótesis de que el factor esencial para la evaluación del daño de las estructuras son las condiciones del subsuelo local (efectos de sitio) (Trigos, 1988). La importancia de la respuesta de sitio ha sido reconocida desde los inicios de la sismología, sobre todo en Japón, y ha sido documentada desde principios del siglo XVIII (Giraldo *et al.* 1999).

La metodología empleada para determinar los efectos de sitio en las Zonas Conurbadas (ZC), fue la experimental, misma que se ha ocupado en muchos estudios de determinación de efectos de sitio de

ciudades en México, como en el Distrito Federal, Oaxaca, Puebla, Morelia, Tehuacán, Guadalajara, y que se divide, en general, en cuatro fases: La primera fase consistió en definir las zonas sismogénicas a través del estudio de la sismicidad global donde se ubica la ciudad, así como, de una investigación de los sismos históricos que han afectado la zona y la ciudad. La segunda fase consistió en investigar y definir las características de la geología, morfología, geotecnia, hidrología, hidrología histórica, además de los daños por sismos. La tercera fase fue el monitoreo sísmico, utilizando diferentes tipos de registro para cuantificar el comportamiento y las características del subsuelo. Se analizan los registros de movimientos sísmicos fuertes, débiles y microtemblores (vibración ambiental) y se tratan de aplicar todas las técnicas particulares para cada uno de estos registros

La cuarta fase consistió en definir, a partir de los mapas y la información integrada en los SIG, el mapa de curvas de isofrecuencias, isoperíodos, la amplificación relativa a terreno firme y el mapa de clasificación de las microzonas sísmicas, que indican las zonas con amplificaciones locales debido al tipo de suelo. Con lo anterior, se pueden seleccionar puntos idóneos para la construcción de estaciones de monitoreo sísmico permanentes, así como establecer algunas recomendaciones para el uso de estos mapas e incluirlos en los reglamentos de construcción.

Determinación del efecto de sitio

La amplificación de las ondas sísmicas en sedimentos blandos cerca de la superficie ha sido reconocida desde los inicios de la sismología; esta amplificación de las ondas sísmicas durante un sismo puede desencadenar daños en las estructuras que están cimentadas sobre estos suelos. Una forma de inferir estas características desfavorables de los suelos es mediante la técnica de Nakamura, que consiste en el registro de vibración ambiental en un punto de una área urbana y la obtención de las razones espectrales entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro propuesta originalmente por Nakamura (1989).

Para evaluar la amplificación de las ondas sísmicas de los suelos en las diferentes zonas conurbadas se procedió al registro de vibración ambiental, en la zona conurbada de Orizaba se tomaron 121 puntos, en Veracruz 238 y en Xalapa, 517. Se utilizaron dos acelerómetros triaxiales, uno de la marca Refteck modelo 130-anss/02 y otro el CMG-5TD de la marca Guralp System, además de que en algunos sitios también se registro vibración ambiental con un simografo de banda ancha CMG-6TD de la marca Guralp System. Después de orientar y nivelar los aparatos en cada punto, se registraron un promedio de diez minutos continuos de vibración ambiental, estos se grabaron en las memorias internas de los equipos que después se descargaron a una computadora para su análisis. De los registros de vibración ambiental obtenidos se procedió a su análisis espectral para obtener sus razones H/V.

La primera parte del análisis 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 estabilidad de las señales (principalmente vehículos y peatones en la proximidad del instrumento). De los registros se seleccionan segmentos de dos minutos para su análisis y de cada uno de estos se escogen ventanas de entre 20 y 30 segundos de duración, los cuales se utilizaron para calcular espectros de Fourier. El elegir varias ventanas de registro para cada punto, permite obtener estimaciones más robustas del espectro de amplitudes de Fourier para cada punto de observación. Finalmente, se aplica la técnica de Nakamura para cada uno de los puntos, y se obtiene una estimación de la frecuencia dominante del sitio.

Como ejemplo se muestra en la figuras 2, las razones espectrales promedio y su respectiva desviación estándar para dos puntos de vibración ambiental en la ciudad de Veracruz con diferentes características de suelo, la línea continua indica el promedio de los cocientes espectrales para diferentes ventanas de

información, mientras que la línea discontinua indica el promedio más-menos una desviación estándar. Se observa una buena concordancia entre ambas componentes horizontales.

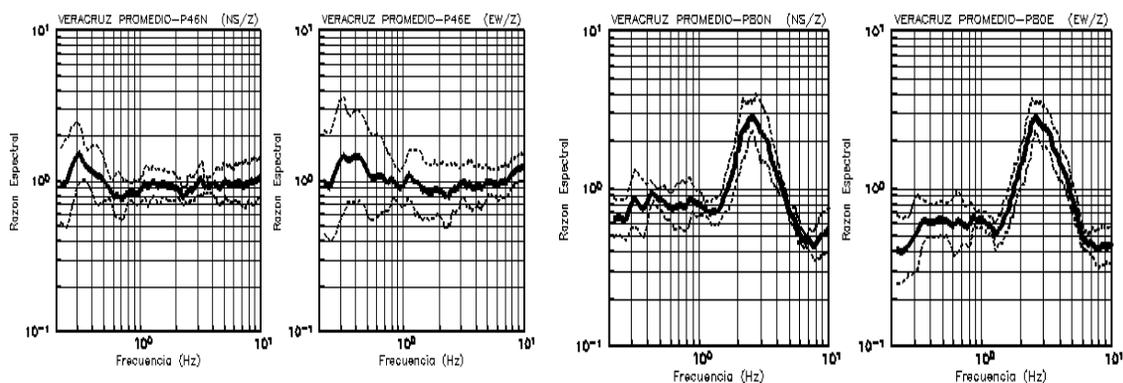


Fig. 2. Razón espectral típica para un registro de vibración en terreno firme (Izq.) y blando (Der.).

MAPAS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

1. Orizaba

1.1 Introducción

El primer dato de un sismo que afectó a la ciudad de Orizaba fue en 1545 donde se indica que el volcán Citlaltépetl emitió un porcentaje importante de lava que ocasionó ciertos temblores en la zona. Para 1566 el volcán Citlaltépetl nuevamente hizo erupción, arrojando lava, sin embargo, no ocasionó fuertes temblores en la región. Del mismo modo, en los años 1613 y 1687 se presentaron nuevas emisiones de lava, la primera sin la presencia de temblores y la segunda acompañada de estos.

Para el año de 1884, un sismo con intensidades que van desde V hasta VIII grados, afectó los estados de Veracruz y Puebla siendo el más fuerte que se recuerda en esta ciudad dando como resultado 20 muertos, en Orizaba también hubo daños. El temblor del 3 de enero de 1920 en Orizaba causó pánico pero no hubo víctimas. El 14 de enero de 1931 ocurrió un sismo de 7.5 grados de magnitud con su epicentro en Huajuapán de León, Oax., que ha sido el más fuerte en muchos años, causando 25 muertos y muchos heridos. El fuerte sismo fue percibido en Huatusco, Orizaba y Camarón. El sismo del 25 de julio de 1937 de 7.3 grados ocasionó daños en la zona fabril de Orizaba, el desplome de la cúpula del templo de La Concordia aplastando a una mujer y varias casas derrumbadas (Torres, 2008).

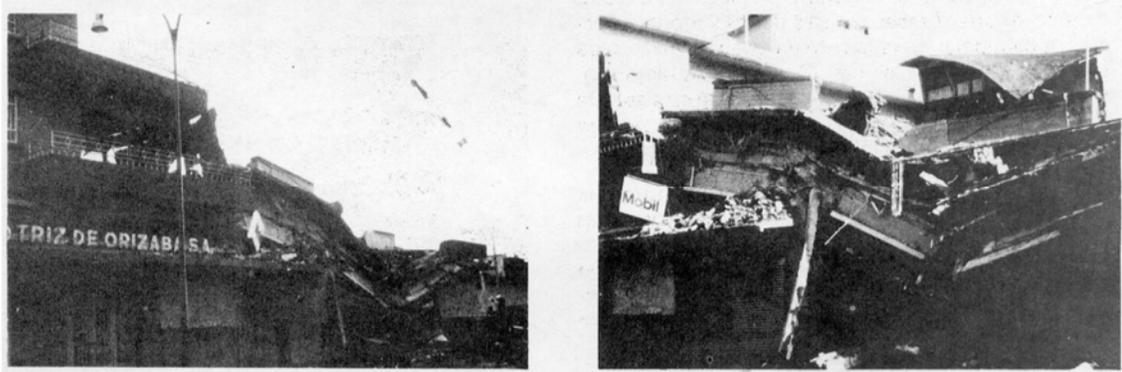


Fig. 3. Fotos de daños por sismo en Orizaba 1973 (Del Valle, 1974).

El sismo más importante de la ciudad de Orizaba es el del 28 de Agosto de 1973, con 7 grados de magnitud, ocurrido a las 3:52 con epicentro en el estado de Puebla muy cerca de la zona limítrofe entre Puebla y Veracruz, a una distancia de menos de 40 Km. al suroeste de Orizaba. Este sismo provocó 539 muertes, 2,000 heridos y 100,000 personas sin hogar, ocupando el tercer lugar a nivel nacional en número de víctimas. En la ciudad de Orizaba, se desplomaron numerosos edificios, la casi totalidad de las torres de las iglesias se vinieron a tierra, muchos edificios y casas que no se derrumbaron amenazaban con hacerlo y fueron un peligro por lo que se demolieron (Figura 3).

1.2. Principales características de la ZCO.

1.2.1. Ubicación

La Zona Conurbada de Orizaba (ZCO) está ubicada en la región centro montañosa del Estado de Veracruz, y está situada sobre el valle del Pico de Orizaba (Mapa 1.1.). Su altura es cercana a 1200 msnm. La ZCO cuenta con más de 110,000 habitantes y su zona conurbada reúne un gran número de industrias, lo que la convierte en un importante núcleo de desarrollo para el Estado y el país. Sus coordenadas geográficas son: 18° 50' de latitud norte y 97° 05' de longitud oeste.

1.2.2. Geología Regional

La región de Orizaba se encuentra en una zona de confluencia entre dos provincias geológicas del país, la Sierra Madre Oriental (SMO) y la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). Las rocas pertenecientes a la SMO son calizas y lutitas estratificadas del Cretácico Medio y Superior (INEGI, 1994) que constituyen grandes barreras topográficas con alturas máximas que varían entre 3,000 y 1,500 msnm. Estratigráficamente estas rocas conforman el basamento pre-volcánico de la zona. Se encuentran intensamente plegadas y falladas, formando un complejo patrón de anticlinales, sinclinales, fallas normales e inversas, cuyos ejes y planos están orientados en dirección NW-SE.

1.2.3. Geología Local

Los principales asentamientos urbanos en esta zona se encuentran en las planicies de inundación. En esta unidad se agrupan los depósitos aluviales y los depósitos dejados por flujos hiperconcentrados cuya fracción granulométrica se concentra en las arenas, limos y arcillas. Se trata de material proveniente de los depósitos piroclásticos. Los depósitos que forman el valle, son de origen aluvial del cuaternario, con

calizas del cretácico superior en sus bordes. Las principales unidades de acuerdo al INEGI (1994) (Mapa 1.2.) son: CALIZA, Ks(cz) y Ki(cz), LUTITA, Ks(lu), CONGLOMERADO, Q(cg), y ALUVION, Q(al).

1.2.4. Resumen de resultados

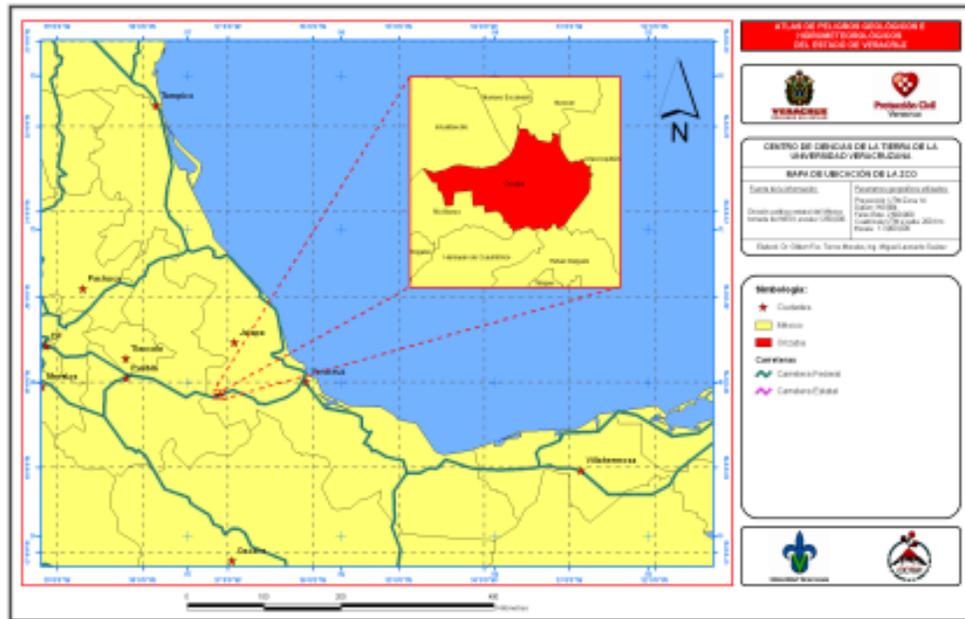
Los resultados del análisis espectral de vibración ambiental se integraron mediante un sistema de información geográfica (SIG), resultando mapas temáticos con las principales características de la ZCO. Se pudieron obtener diferentes mapas temáticos, como los mapas: geológico (Mapa 1.2.), de isoamplificaciones (mapa 1.3.) isoperíodos (Mapa 1.4.) y microzonificación sísmica (Mapa 1.5.). Todos estos mapas contienen la información a detalle y están superpuestos en un SIG sobre la cartografía de INEGI, por lo que esta información está georeferenciada y es susceptible a actualizar, lo que hace que el estudio sea dinámico. Además, se pueden hacer consultas a detalle para cualquier punto en la ZCO, de las características antes mencionadas.

Con base en los resultados anteriores se pueden delimitar 3 zonas de acuerdo a sus características y comportamiento dinámico (respuesta de sitio) (Mapa 1.5.):

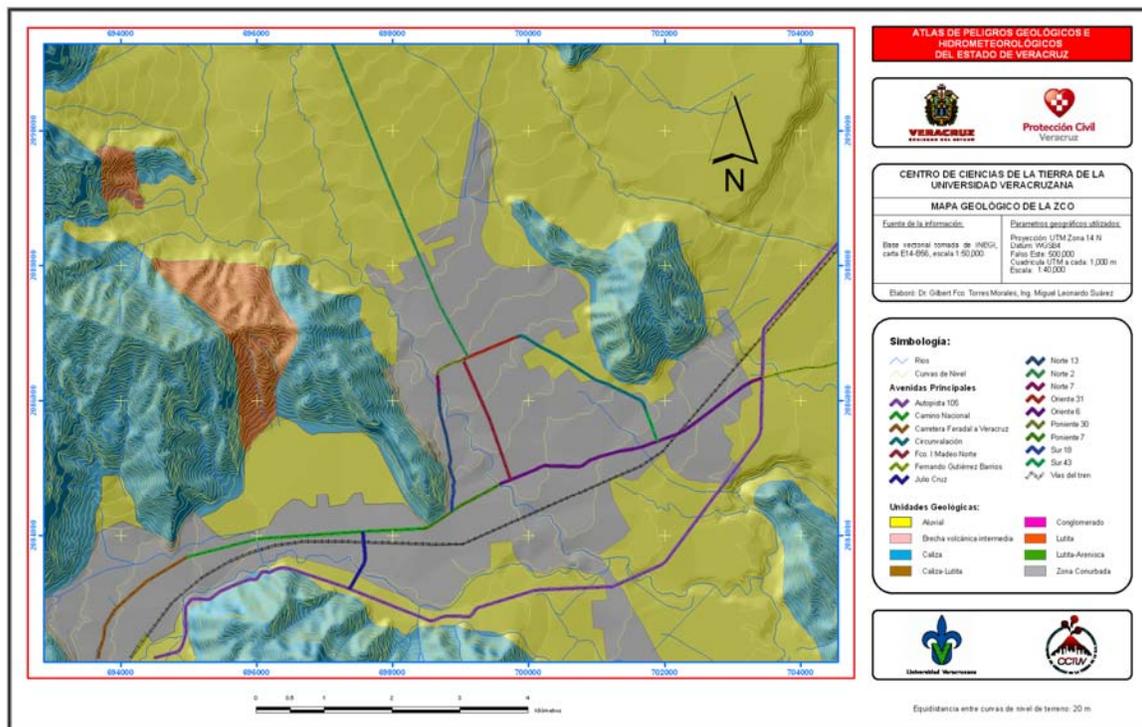
La Zona 1 (Peligro Bajo): Considerada la más estable. Está formada por terreno que tienen periodo dominante de Vibración de entre 0.1 a 0.3 segundos, además de observarse que en esta zona es de muy baja a nula la amplificación relativa con respecto a terreno firme, en esta zona se encuentran los depósitos más consolidados o donde el estrato resistente se ubica a poca profundidad, de acuerdo a la geotecnia de la ciudad están formados por gravas o arenas consolidadas.

La Zona 2 (Peligro Intermedio): Zona formada por suelos con periodos entre 0.3 a 0.6 segundos, donde se observan amplificaciones relativa con respecto a terreno firme de entre 2 a 3 veces, esta se ubica sobre depósitos aluviales de profundidad media y suelos de consistencia intermedia.

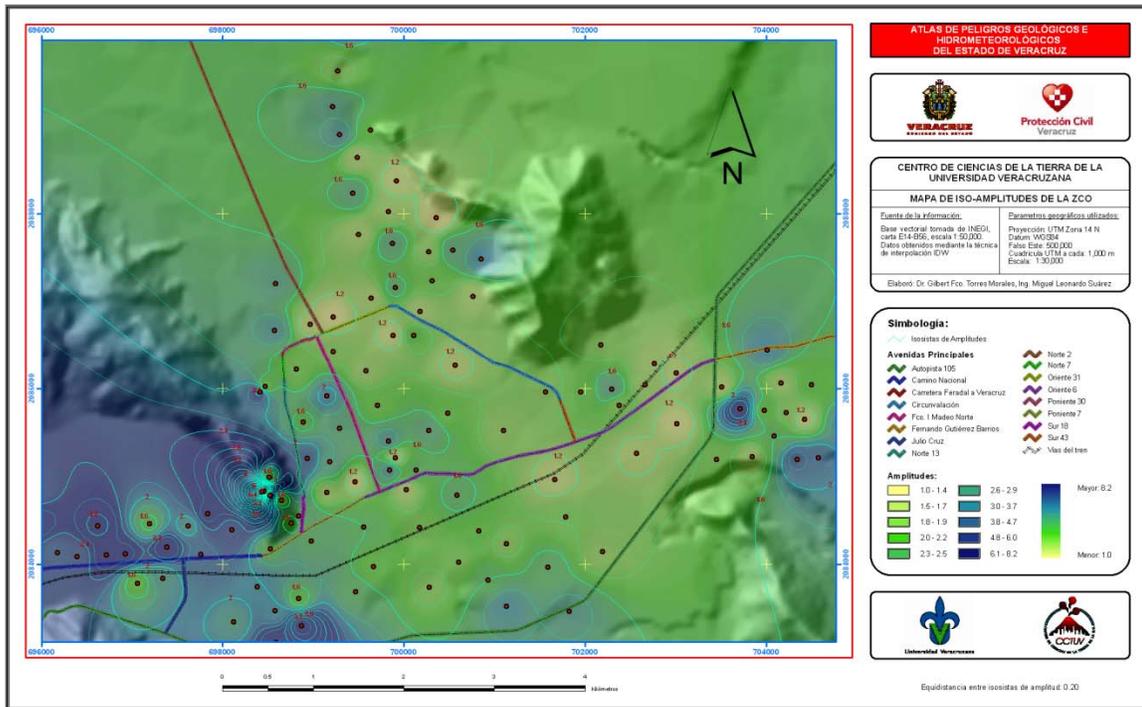
La Zona 3 (Peligro Alto): Considerada la menos estable. Está formada por terreno el cual tiene periodos de entre 0.6 a 0.9 segundos, donde se observan amplificaciones relativas con respecto a terreno firme mayores de 3 veces, por lo que se considera la zona más desfavorable en la ciudad. Esta zona incluye suelos aluviales profundos, el cauce de antiguos ríos y antiguas zonas de inundación.



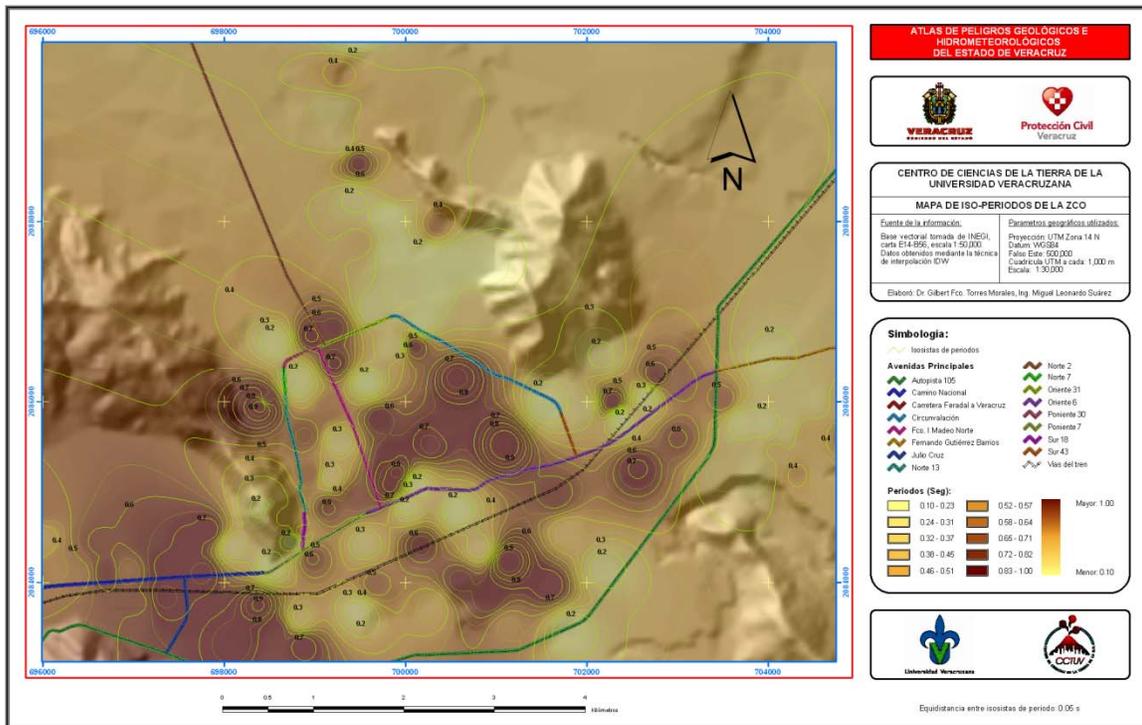
Mapa 1. 1. Localización de la Zona Conurbada de Orizaba.



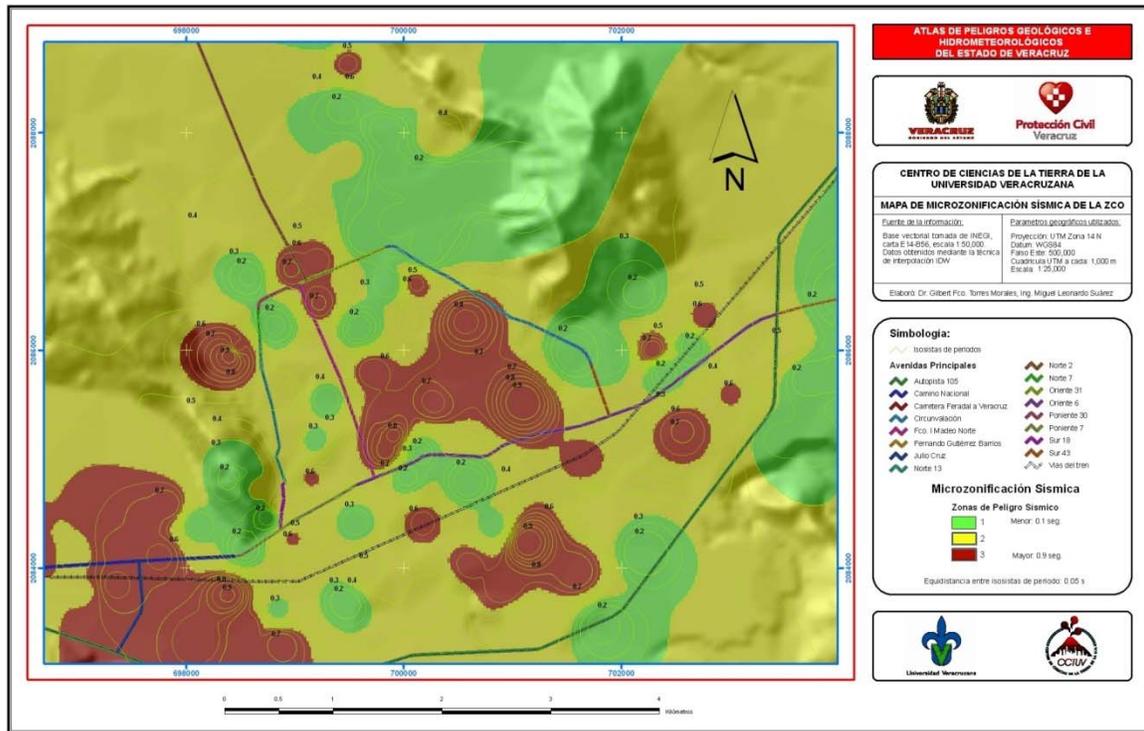
Mapa 1. 2. Mapa Geológico de la ZCO.



Mapa 1. 3. Mapa de isoamplificaciones de la ZCO.



Mapa 1. 4. Mapa de isoperíodos de la ZCO.



Mapa 1. 5. Mapa de microzonificación sísmica de la ZCO

2. Veracruz

2.1. Introducción

La Zona Conurbada Veracruz (ZCV) se localiza en la costa oriental del Golfo de México, parte media oriental del Estado de Veracruz, y ocupa la porción norte de la llanura de Sotavento. Está comprendida entre los paralelos $18^{\circ} 58' 02''$ y $19^{\circ} 16' 06''$ de latitud norte y entre los meridianos $95^{\circ} 58' 03''$ y

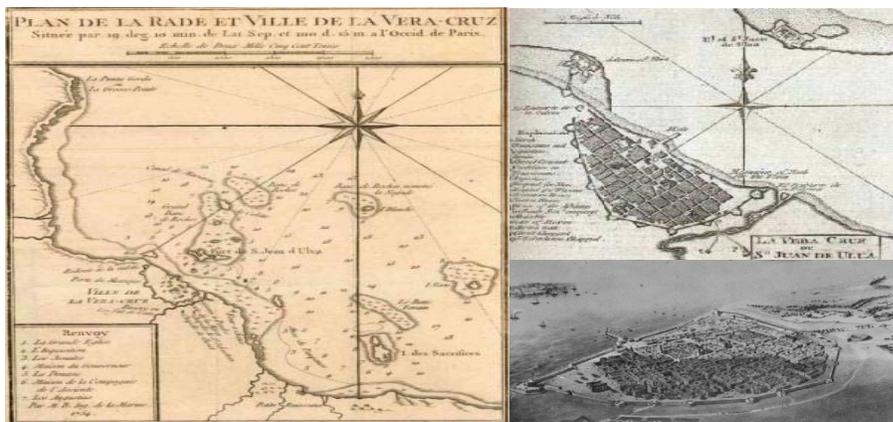


Figura 4. Diferentes vistas de la antigua ciudad Amurallada de Veracruz

95°16'46" de longitud oeste (Mapa 2.1.). La ZCV se encuentra asentada donde originalmente se fundó La Villa Rica de la Vera Cruz, primer ayuntamiento de México, fundado en el año de 1519 (Fig. 1.3.2.1.). La ZCV es en general baja, formada por una planicie llana de origen fluvio-marino, con numerosas formas fluvio-deltaicas, dunas litorales, depresiones y cauces; carece de alturas importantes, cuenta con zonas de inundación y es húmeda y calurosa.

La Ciudad y Puerto de Veracruz ha experimentado los efectos destructivos de los sismos a lo largo de la historia. Los primeros datos históricos de un sismo son de Antonio de Ulloa, marino y científico español que visitó la Nueva España entre 1776 y 1778. En una carta informa al virrey Antonio María Bucarelli: *A las 12:30 horas, entre el 9 y 10 de septiembre de 1777, ocurrió un violento terremoto, de menos de un minuto, en la ciudad de Veracruz, con movimiento de tierra del oeste-suroeste para el este-noreste. Los arcos y las bóvedas de las iglesias quedaron rajadas, las paredes de las casas cuarteadas, con grietas que las atraviesan, algunas desplomadas y otras tan dañadas que están inhabitables, siendo preciso demolerlas. De haber durado medio minuto más era infalible el total exterminio de la ciudad y de San Juan de Ulúa.*

La ciudad de Veracruz ha sido afectada por los sismos más fuertes en la historia del estado de Veracruz (Tabla 1.1.1.). Siendo *el sismo del 11 de marzo de 1967*, conocido como el temblor de Veracruz es el más importante para la ciudad de Veracruz por los daños ocasionados en aproximadamente 50 edificaciones, siendo el desplome de la cúpula del hotel Victoria, y el descuadre de la cúpula del edificio de la aduana, algunos de los daños más importantes. Este temblor fue localizado en la plataforma continental, frente a Punta Antón Lizardo, a unos 20 Km. al sureste del Puerto de Veracruz y afectó también a las ciudades de Boca del Río, Medellín, Antón Lizardo, y Alvarado.

2.2. Principales características de la ZCV

2.2.1. Características de geomorfología y geología

Las características geológicas de la zona en estudio, así como su geomorfología son resultado de fenómenos que han ocurrido en esta zona desde la consolidación de la corteza hasta nuestros días; estas características son de suma importancia en los estudios de microzonificación sísmica, ya que dan indicios y explicación del comportamiento dinámico en las diferentes zonas, de esto la importancia de delimitar geológicamente el área de estudio en un mapa, con el cual se puedan comparar y corroborar los resultados obtenidos a partir de las mediciones de vibración ambiental.

La formación geológica histórica de la zona, tiene su origen en el cuaternario, no existiendo fenómenos tectónicos que hayan afectado su formación. Su estratigrafía tiene una gran uniformidad en sus materiales, ya que los sedimentos están constituidos principalmente por arenas, que se pueden considerar contemporáneos, ya que mientras por un lado el viento forma los cordones de dunas litorales por el otro los ríos con sus inundaciones y el mar moldea la superficie topográfica del área.

Geomorfológicamente la forma del relieve se divide en tres zonas principalmente: la zona de *depósitos de playa*, que es una zona plana con una ligera pendiente hacia el mar, la zona de *depósitos de médanos*, que son formaciones con eje longitudinal en la dirección norte noreste y por último la de *depósitos aluviales*, la que se ubica en las partes bajas de la ciudad, por detrás del cordón de dunas. Esta clasificación se integra a la geológica por su analogía.

2.2.2. Características geotécnicas

Los estudios preliminares en la zona, consultados para la microzonificación sísmica de la ZCV (Esquivel,

1976; Miranda, 1979; Páez *et al.* 2000), hacen una descripción de la geomorfología, geología y geotecnia de la zona y una propuesta de zonificación muy general a partir de estudios de mecánica de suelos. De acuerdo con los resultados de los trabajos consultados podemos resumir las siguientes zonas: Zona de depósitos de médano o eólicos, Depósitos de playa, Depósitos aluviales, y Conglomerado.

2.2.3. Resumen de resultados

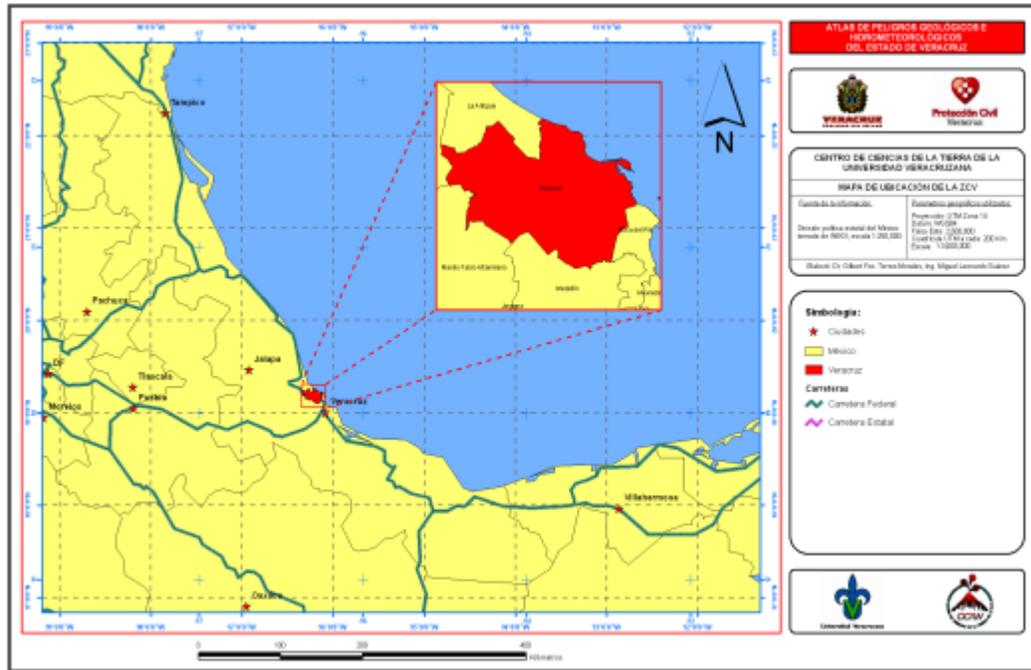
A partir de la información recopilada y generada, podemos observar que la distribución de los valores de los periodos dominantes del terreno (T), coinciden con el tipo de geología superficial e hidrología.

Los resultados del análisis espectral de vibración ambiental se integraron mediante un sistema de información geográfica (SIG), resultando mapas temáticos como los mapas geológico, isoamplificaciones (Mapa 2.2.), isofrecuencias, isoperíodos y microzonificación sísmica (Mapa 1.3.2.3). Con base en los resultados anteriores se pudieron delimitar 3 zonas de acuerdo a sus características y comportamiento dinámico (respuesta de sitio). (Mapa 2.3.):

La Zona 1 (Peligro Bajo): Considerada la más estable. Está formada por terreno que tiene periodo dominante de Vibración de entre 0.1 a 0.3 segundos, además de observarse que en esta zona es de muy baja a nula la amplificación relativa con respecto a terreno firme, por lo que se considera la zona más favorable en la ciudad y se podría considerar apta para construir cualquier tipo de edificación por los periodos bajos del terreno a si como su casi nula amplificación, esta zona incluye terrenos próximos al mar formados por depósitos de playa cerca de los depósitos de coral, así como dunas estables, además de estar formada por los depósitos aluviales más estables que se encuentran próximos a los depósitos de conglomerado.

La Zona 2 (Peligro Intermedio): Considerada como zona intermedia está formada por terreno el cual tiene periodos de entre 0.3 a 0.6 segundos, donde se observan amplificaciones relativas con respecto a terreno firme de entre 2 a 3 veces, ésta se ubica sobre depósitos aluviales de profundidad intermedia y dunas de consistencia media.

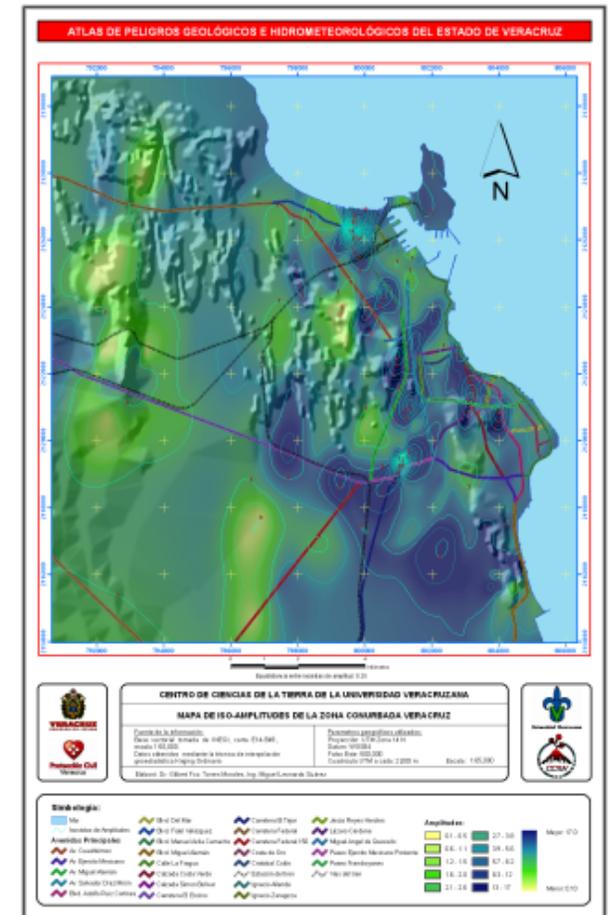
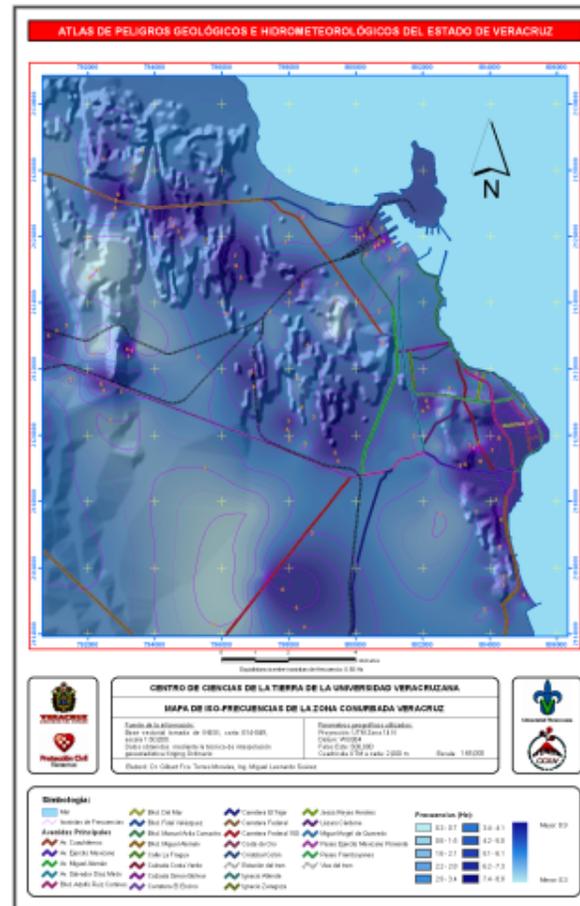
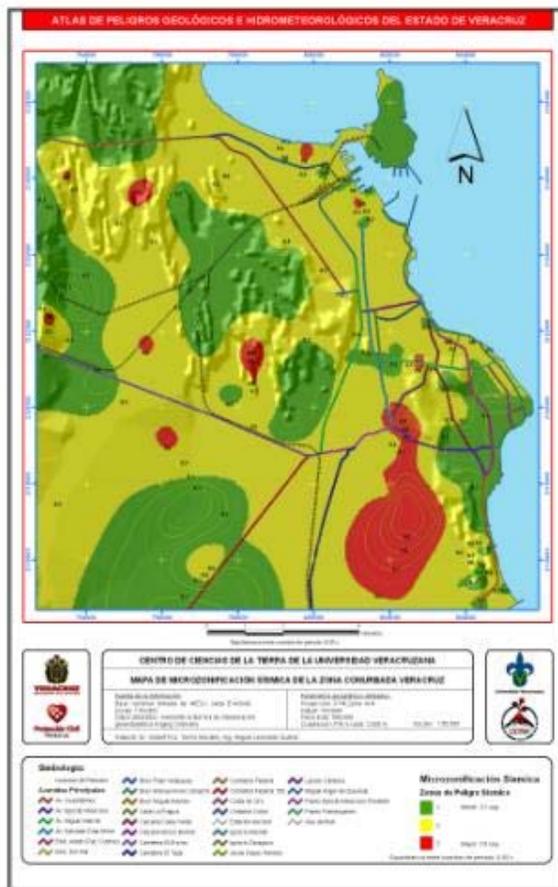
La Zona 3 (Peligro Alto): Considerada la menos estable. Está formada por terreno el cual tiene periodos de entre 0.6 a 0.9 segundos, donde se observan amplificaciones relativas con respecto a terreno firme mayores de 3 veces, por lo que se considera la zona más desfavorable en la ciudad. Esta zona incluye terrenos aluviales donde se ubican los depósitos más profundos y las zonas de inundación, así como el cauce de antiguos ríos y antiguas zonas de inundación, además de dunas inestables y zonas de terrenos de relleno en zona pantanosa o ganadas al mar, esta coincide con la parte más antigua de la ciudad de Veracruz, donde se encuentran ubicados los Edificios Históricos así como la zona más densamente poblada.



Mapa 2.1. Localización de la Zona Conurbada de Veracruz

Mapas 2.2. Geológico–Geotécnico, arriba a la izquierda, Puntos de vibración ambiental arriba a la derecha, y de isoamplificaciones de la Zona conurbada de Veracruz, abajo.

Mapa 2.3. Isofrecuencias ala izquierda,, isoperíodos al centro y de microzonificación sísmica de la Zona Conurbada Veracruz a la derecha..



3. Xalapa

3.1. Introducción

La primera noticia de un sismo local importante en las inmediaciones de Xalapa data de 1546. Los reportes históricos de este evento indican la destrucción total del Convento de San Francisco, fundado en 1534. Reportes posteriores indican que la ciudad fue afectada por otros temblores de magnitud importante. En 1691 se reportaron numerosos sismos de baja magnitud que causaron daños moderados en la ciudad. El 13 de noviembre de 1874 un sismo afectó una amplia región del país localizándose los daños más importantes en Xalapa donde de nuevo el templo de San Francisco sufrió daños (Torres, 2008).

El sismo de Xalapa ($M_s=6.2$) es el sismo más importante ocurrido en la zona y ocupa el segundo lugar a nivel nacional en número de víctimas con 650, se originó aproximadamente a 35 Km. al suroeste de la ciudad de Xalapa (Fig. 1.3.3.1.).

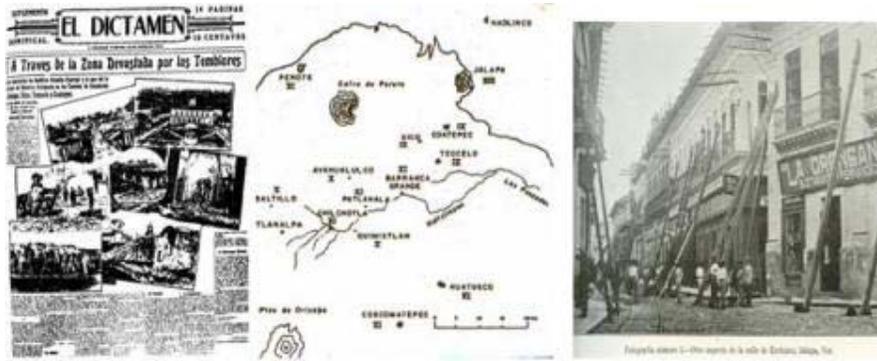


Fig. 5. Foto periódico El Dictamen que informa del sismo de Xalapa, mapa que muestra las intensidades (MM) y una fotografía del centro histórico de Xalapa (Flores y Camacho 1922).

3.2. Principales características de la ZCX

3.2.1. Ubicación

La Zona Conurbada Xalapa (ZCX) está ubicada en la Región Central del Estado de Veracruz, en las faldas del cerro Macuiltépetl, en las estribaciones orientales del Cofre de Perote, zona de transición entre la Sierra Madre Oriental y la planicie costera del Golfo de México (Mapa 3.1.). Su altura promedio es de 1,400 msnm. La ZCX cuenta con más de 400,000 habitantes y sus coordenadas geográficas son: $19^{\circ} 32' 24''$ de latitud norte y $96^{\circ} 55' 39''$ de longitud oeste. Tiene un área aproximada de 118 Km².

3.2.2. Geología Local

La ciudad de Xalapa tiene una topografía muy irregular la cual es producto de su origen derivado de centros volcánicos de escoria y lava que rodean su área urbana. Son 20 aparatos volcánicos que se distribuyen en un área de 905 km² alrededor de la ciudad de Xalapa, lo que es conocido como el Campo Volcánico de Xalapa (CVX) (González-Mercado, 2005). De los 20 centros del CVX, cuatro se localizan dentro de lo que actualmente es la zona urbana de Xalapa: Macuiltépetl, Colorado, Estropajo y Las Margaritas. Estos volcanes han producido derrames de lava y depósitos piroclásticos que dan un sello muy particular a su topografía y determinan las características geotécnicas de los suelos y materiales sobre los cuales se asienta la ciudad. También existen otros depósitos producidos por procesos distintos que contribuyen a conformar la geología urbana de Xalapa.

Para definir la geología de la ZCX se han agrupado las distintas rocas y materiales en unidades cuyos nombres responden ya sea a su centro emisor o al proceso por el cual fueron emplazadas. Estas se muestran en el Mapa 3.2. En total se identificaron 10 unidades, (modificado de Hernández, 2007), las cuales se mencionan a continuación de la más antigua a la más reciente. *Unidad Calizas, Deposito de Lahar, Ignimbrita, Ignimbrita Xáltipan, Unidad Cerro Las Margaritas, Unidad Cerro Colorado, Unidad Cerro El Estropajo, Unidad Cerro Macuiltépetl, Unidad La Pitaya, Depósitos aluviales.*

3.2.3. Determinación del efecto de sitio

Se tomaron más de 500 puntos de vibración ambiental, en las diferentes zonas geológico-geotécnicas de la ZCX para determinar sus características dinámicas y de efecto de sitio mediante la técnica Nakamura (Mapa 1.3.3.2.). De los registros de vibración ambiental obtenidos se procedió a su análisis espectral para obtener sus razones H/V con el programa Degtra (Ordaz y Montoya, 1990-2002), siguiendo el procedimiento detallado por Torres (2008), además, también se utilizó el programa GEOPSY (2007) pudiendo realizar el análisis espectral de registros más largos de una manera más eficiente.

Además, se instalaron estaciones de monitoreo sísmico, en terreno firme (estación de referencia) y en terreno blando, de acuerdo con las características geológico-geotécnicas utilizando sismómetros de banda ancha marca Guralp, modelo CMG-6TD, funcionaron simultáneamente hasta ocho estaciones de monitoreo sísmico, registrando a la fecha más de 100 sismos, con lo que se pudo aplicar la técnica estándar y corroborar los resultados obtenidos mediante la técnica de Nakamura.

3.2.4. Resumen de resultados

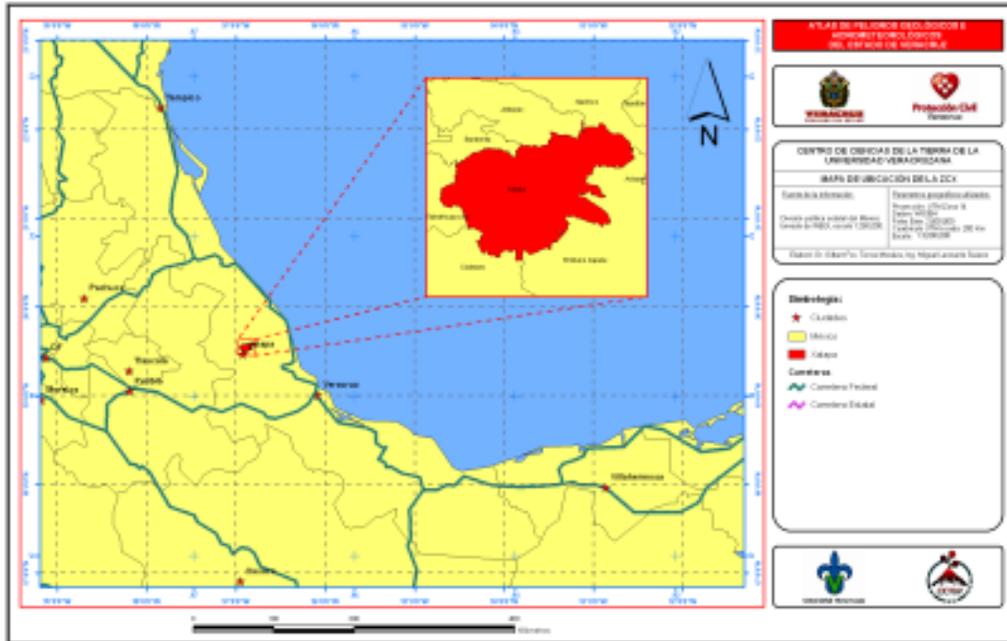
Los resultados del análisis espectral de vibración ambiental y de los sismos registrados en las estaciones de monitoreo sísmico se integraron mediante un sistema de información geográfica (SIG), generando mapas temáticos como el de isoperíodos, isoamplificaciones y de microzonificación sísmica (Mapa 3.3.); éstos son productos importantes ya que se podrán combinar los resultados obtenidos de la vibración ambiental y sismos con los de las principales características de la ZCX. Los mapas elaborados en esta investigación se procesaron con ayuda del programa (SIG) *ArcGis* de la empresa *ESRI*. Lo anterior permitió realizar un análisis de los peligros sísmicos en la zona y clasificar las zonas a partir del periodo fundamental del suelo, obteniendo así las siguientes tres zonas (Mapa 3.3.):

Zona 1 (Peligro Bajo): Esta zona es la más estable, ya que se encuentra asentada bajo derrames basálticos de origen reciente y sobre material compacto de mediana a alta estabilidad producto de las últimas emisiones volcánicas. Esta zona se encuentra en la parte central del área urbana de Xalapa, sobre los derrames de lava emitidos por el Cerro de Macuiltépetl. Esta zona presenta valores de periodos menores a 0.3 y amplitudes menores a 2.

Zona 2 (Peligro Intermedio): Esta zona es de mediana estabilidad, ya que se encuentra en su mayoría sobre limos arcillo-arenosos compactos, flujos piroclásticos y brechas volcánicas, esta zona presenta valores de periodos de entre 0.3 a 0.6 y amplitudes de 2 a 4.

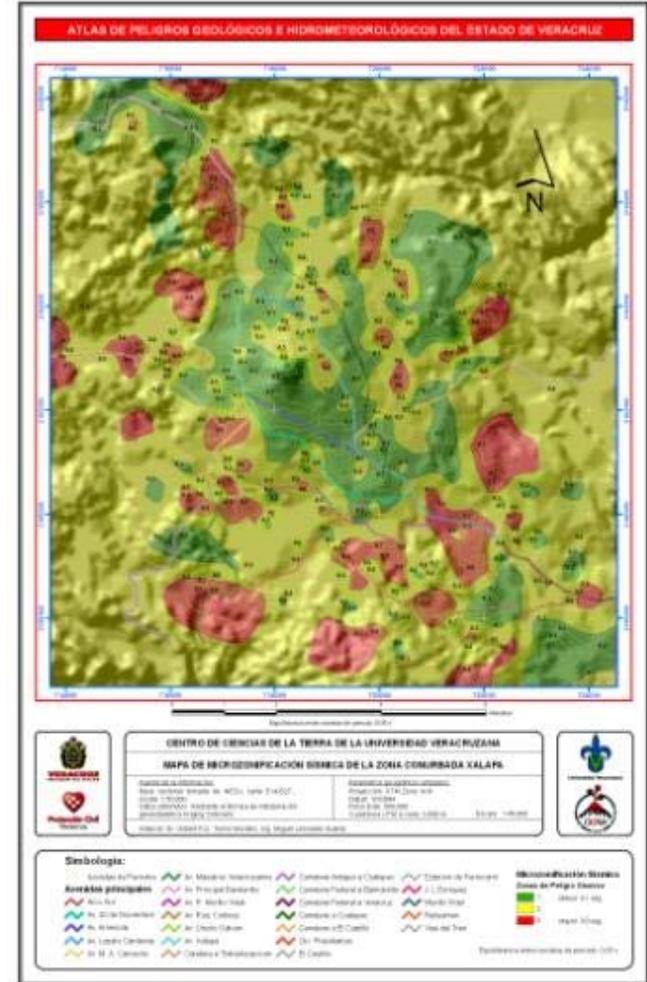
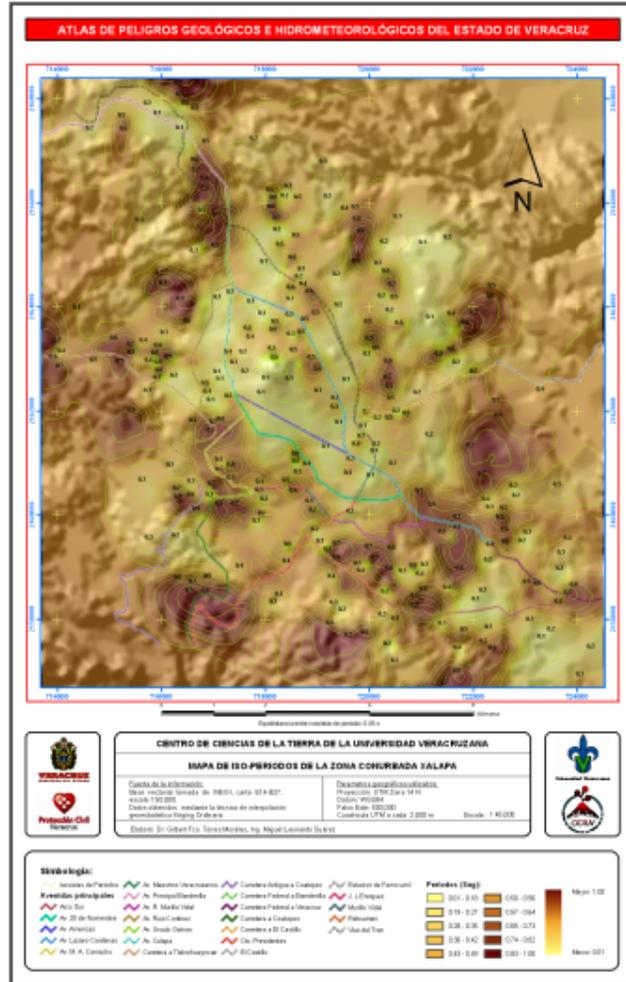
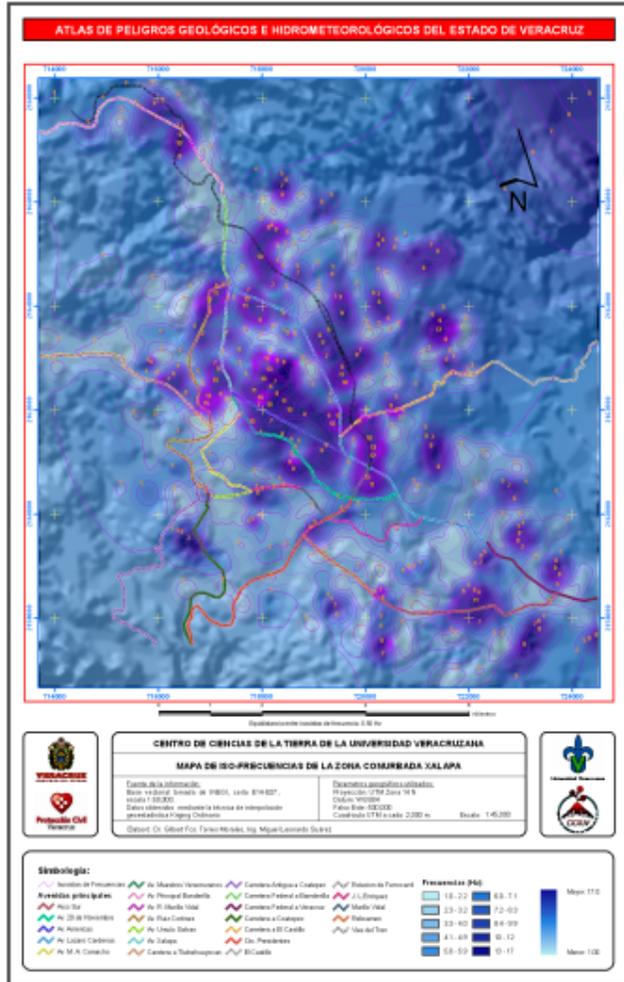
Zona 3 (Peligro Alto): Esta zona es de baja estabilidad, ya que se encuentra en su mayoría sobre limos de plasticidad alta y media, sobre arenas limosas producto de los derrames de lava basáltica muy alterada del Cerro Colorado y sobre depósitos de aluvión material transportado y depositado por corrientes de agua. En sitios constituyen lomas con pendientes pronunciadas, haciendo inestable sus laderas. En esta zona se presenta valores de periodos mayores a 0.6 y amplitudes mayores a 4.

Se puede observar a partir de los resultados integrados mediante el SIG, que las zonas con características de suelo menos favorables presentan los efectos de sitio más desfavorable, es decir periodos y amplificaciones altos. Los periodos encontrados en la ZCX tienen valores que van de 0.07 hasta 1.14 y las amplificaciones relativas a terreno firme de 1 a 6 veces.



Mapa 3.1. Localización de la Zona Conurbada Xalapa

Mapa 3.2. Geología a la izquierda, puntos de vibración ambiental al centro y de isoamplificaciones de la Zona Conurbada Xalapa a la derecha.



Mapa 3.3. Isoamplificaciones a la izquierda, isofrecuencias al centro y de microzonificación sísmica de la Zona Conurbada Xalapa a la derecha.

MICROZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INUNDACIONES EN LA ZCX

Se presentan los resultados de la delimitación de peligros por inundaciones como parte de los resultados del proyecto denominado: “Microzonificación de Peligros Geológicos para la Zona Conurbada Xalapa”, desarrollado por el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana (CCTUV) y financiado por los Fondos Mixtos CONACYT-Gobierno del Estado de Veracruz.

Para delimitar las zonas susceptibles a inundaciones la metodología empleada para evaluar el peligro por inundación incluyó los siguientes pasos en la investigación: antecedentes históricos, condiciones meteorológicas, existencia de cursos de agua en la zona, condiciones topográficas (zonas bajas), condiciones de permeabilidad y uso del suelo, intervención humana, identificación de puntos críticos, cálculo de microcuencas, identificación de puntos críticos de desbordes durante crecidas, dimensionamiento del peligro de inundación, superficie afectada, altura de inundación, probabilidad de ocurrencia y por último la elaboración de mapas de peligro por inundación (Figura 6).

Los insumos ocupados en el proceso del análisis fueron un modelo digital de elevaciones de alta resolución, proporcionado de forma libre por la NASA a partir del proyecto ASTER Global Digital Elevation Model y un Sistema de Información Geográfica gvSIG-Sextante utilizando la herramienta hidrológica MFD. Esta herramienta de modelación se basa en el modelo “Multiple Flow Direction Algorithms” método que considera un flujo bidimensional, que calcula la dirección y acumulación de los flujos superficiales a partir de las diferencia de las pendientes y exposiciones del terreno, obteniendo como resultado la red de escurrimientos y los límites de las nano-micro y subcuencas hidrográficas.

Antes de utilizar el MDE para realizar el análisis hidrológico se aseguró que este no tuviera ningún sumidero o alguna cima artificial. Posteriormente, se procedió a obtener el tema de acumulación de flujo. Este tema como su nombre lo dice, acumula el agua en la dirección de la pendiente del terreno, por lo tanto, valores altos representan mayor acumulación de agua. A continuación se inicio la clasificación de todas las celdas con flujos procedentes de un número de celdas mayor a un umbral de 5 (150 m) como pertenecientes a la red de drenaje. Esto implica que las puntos de máxima elevación en las cimas o divisorias topográficas sean reales y que las depresiones o puntos de mínima elevación también sean verdaderos.

Para obtener el mapa final que muestra la zonificación de las aéreas con peligro de inundación, se aplicó el índice de humedad, también conocido como índice topográfico compuesto. El índice es una función de la pendiente y de las áreas que aportan flujo en el sentido de la pendiente; por esta razón áreas planas con un mayor aporte de flujo tendrán un valor más alto de peligro a inundarse, en tanto que las áreas ubicadas en las laderas tendrán valores menores de peligro a inundarse. El índice está asociado a la forma del terreno y a las propiedades del suelo tales como profundidad, porcentaje de limo y contenido de materia orgánica. Se procedió a verificar los resultados obtenidos en el análisis, sobreponiendo los polígonos que la comisión de agua y saneamiento (CMAS) del municipio Xalapa identifica como sitios críticos de inundación, con lo que se observó la correspondencia entre los resultados obtenidos en el modelado y los sitios identificados como problemáticos.

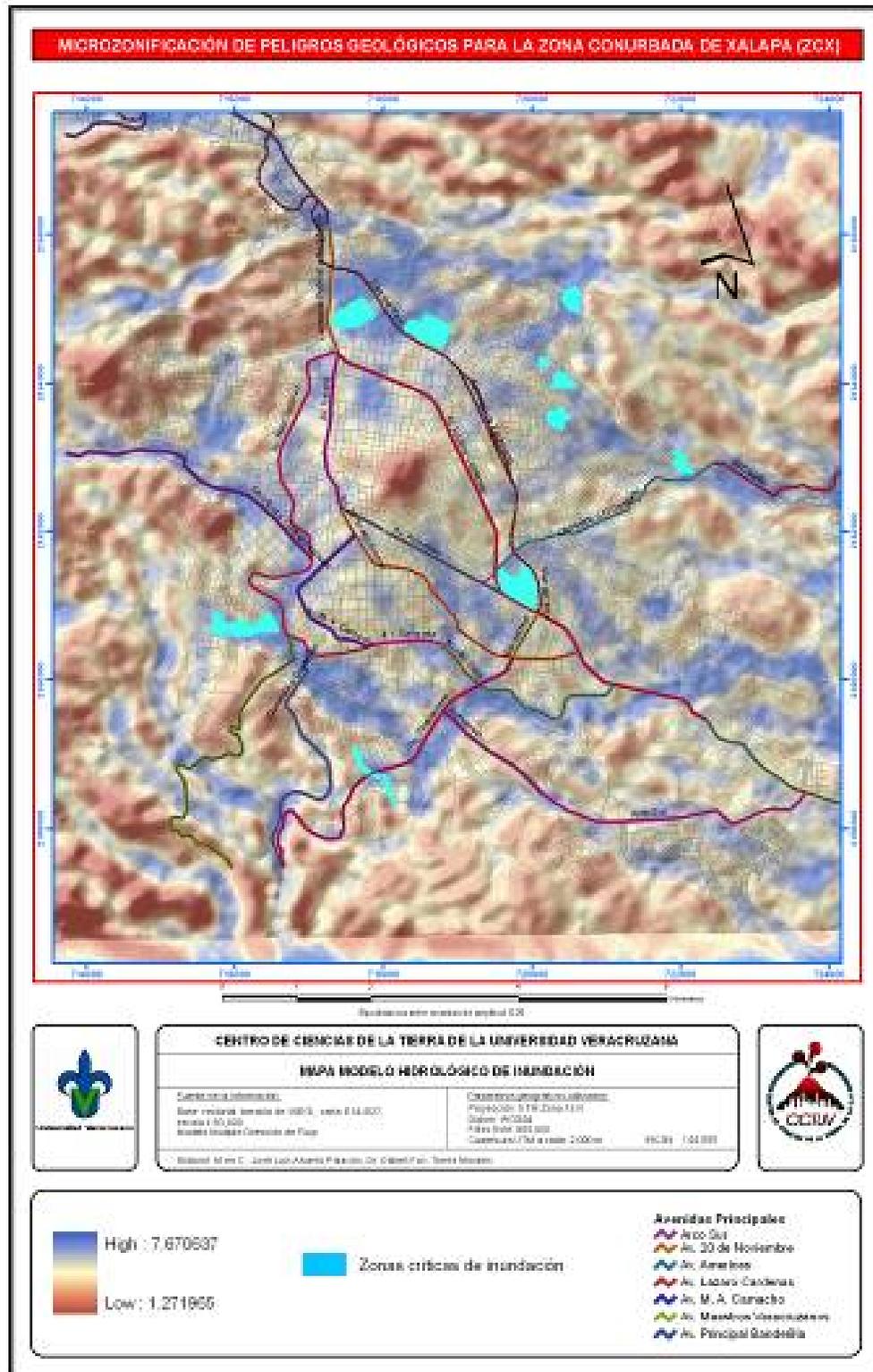


Fig. 6. Mapa de modelo hidrológico de inundación, indicando las zonas críticas de inundación

MICROZONIFICACIÓN DE PELIGRO POR DESLIZAMIENTO DE LADERAS EN LA ZCX

Se presentan los resultados de la delimitación de peligros por deslizamiento de laderas obtenido dentro del proyecto: “Microzonificación de Peligros Geológicos para la Zona Conurbada Xalapa”, desarrollado por el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana (CCTUV) y financiado por los Fondos Mixtos CONACYT-Gobierno del Estado de Veracruz. La metodología utilizada para determinar el peligro por deslizamiento de laderas, fue mediante la calificación de los factores físicos desencadenantes del deslizamiento.

La identificación de los atributos geotécnicos, geológicos y topográficos permitieron hacer una estimación cualitativa de la amenaza de un deslizamiento. Los factores a calificar son: el tipo de ladera, ubicación, características físicas del sitio, factores topográficos, históricos, geotécnicos, geomorfológicos, ambientales, y si existiera, tipología de escurrimientos y de viviendas. Finalmente se realiza una estimación de la amenaza sumando la calificación para cada etapa, a fin de valorar el grado de la amenaza que pudiese adjudicársele a la ladera, calificándola desde la muy baja hasta la muy alta (Mapa 1.3.3.5). Éste peligro se incluirá en el mapa final de microzonificación de peligros geológicos que incluye además la microzonificación sísmica y por inundaciones (figuras 7 y 8).

La utilización del Sistema de Información Geográfica (SIG) fue de gran ayuda para identificar los parámetros requeridos para el análisis, la información ocupada para este proceso fue un modelo digital de elevaciones (MDE) de alta resolución, proporcionado libremente por la NASA a partir del proyecto ASTER Global Digital Elevation Model. Con el MDE se elaboraron curvas de nivel a cada 2m de equidistancia, se delimitaron las zonas de mayor pendiente y posteriormente se clasificaron las de mayor peligro, con el propósito de verificarlas y evaluarlas en campo. Además, de los parámetros básicos recomendados por CENAPRED para evaluar laderas, en el análisis se incluye el efecto de sitio, resultado de un estudio preliminar de la microzonificación sísmica. Con los resultados obtenidos y la aplicación del SIG, se delimitaron cualitativamente las zonas de peligro ante deslizamiento de laderas, diferenciando zonas de peligro bajo, moderado y alto, representándose en el mapa del color verde al rojo.

La información sobre los peligros naturales se plasmó en forma de mapas de peligrosidad, a los que se pueden asociar bases de datos relacionadas con la tipología del peligro. La integración de estas cartografías y bases de datos mediante un SIG, es un aspecto de gran interés ya que permite modificaciones en la medida que se produzcan cambios en el medio físico, en la actividad económica o en el desarrollo de las poblaciones. Además, permite manejar gran cantidad de información, cruzándola para obtener nuevos mapas resultado del análisis de las variables y factores considerados de influencia en los procesos. Siendo un elemento fundamental para que autoridades, legisladores y técnicos puedan fundar sus decisiones en los campos de su competencia, tales como la elaboración de leyes y normativas o en materia de ordenamiento territorial, protección civil y prevención de desastres.

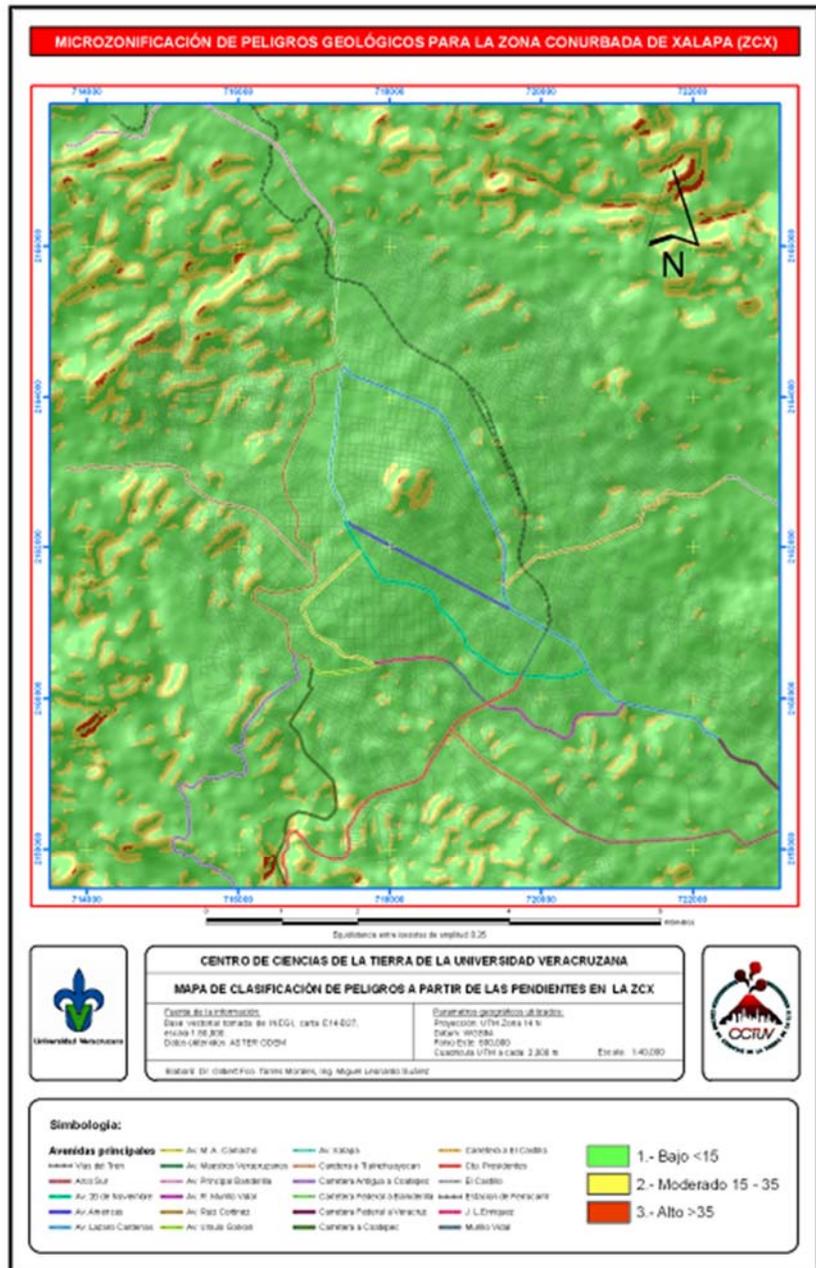


Fig. 7. Vista del Modelo Digital de Elevación ASTER con la clasificación de pendientes de acuerdo a los criterios cualitativos propuestos.

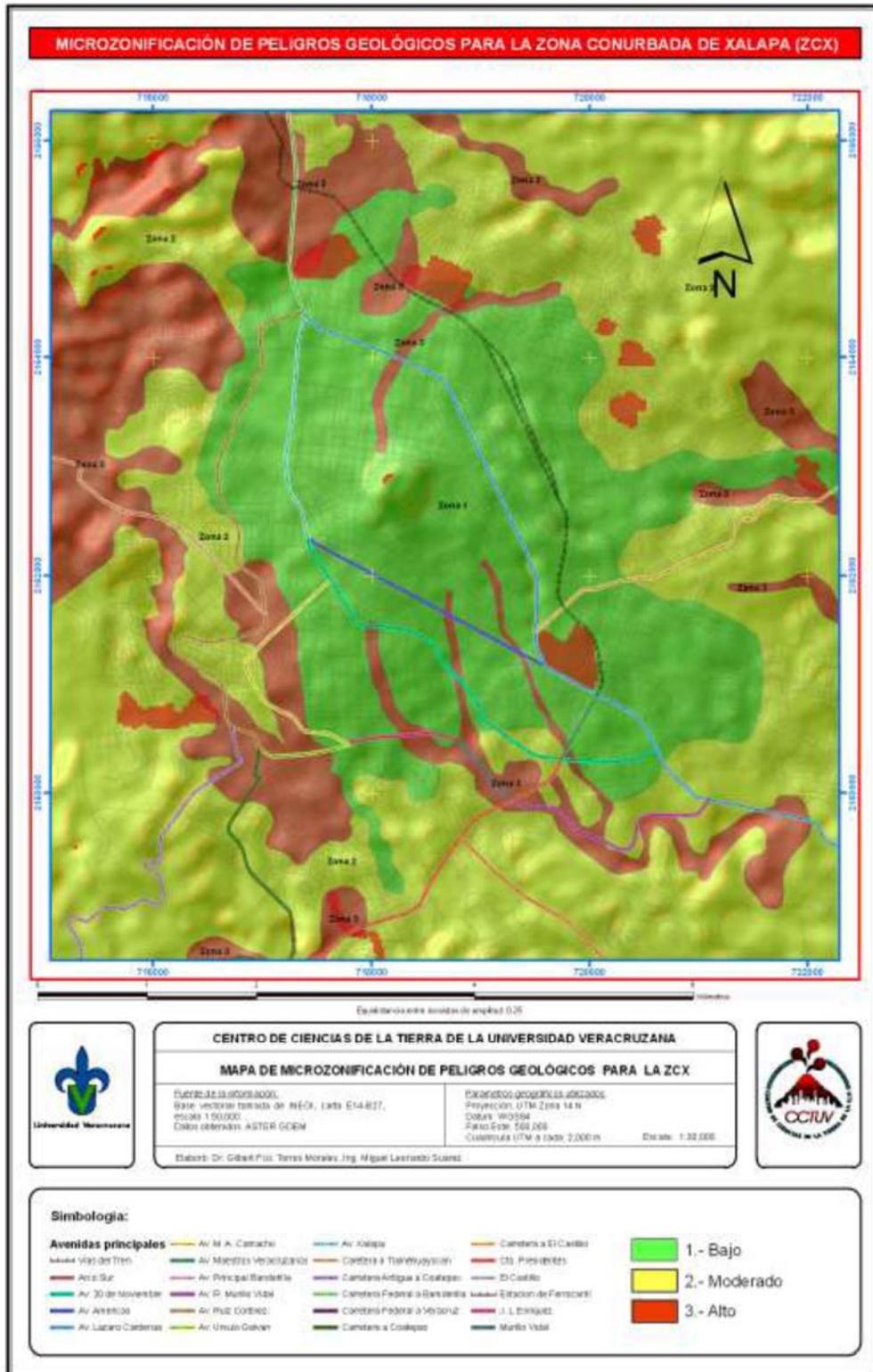


Fig. 8. Mapa de microzonificación de peligros geológicos de la Zona Conurbada Xalapa.

REFERENCIAS

Del Valle E. (1974). *Temblor del 28 de agosto de 1973, Aspectos estructurales*. Publicaciones del instituto de ingeniería de la UNAM.

Esquivel, R. (1976). Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Veracruz, Ver., Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos. Noviembre, Tomo II, p. 245-256. Guanajuato., México.

Figueroa, J. (1968). La sismicidad en el estado de Veracruz, Macrosismo del 11 de marzo de 1967, serie #167 de instituto de ingeniería, UNAM, pp. 16, México, D.F.

Flores T., H. Camacho. (1922). *Terremoto Mexicano del 3 de enero de 1920*. Boletín 38, Instituto Geológico Mexicano. <http://bcct.unam.mx/bogeolpdf/geo38/>.

Giraldo V., A. Alfaro, L.G. Pujades y J.A. Canas. (1999). *Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores*. Monografía Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Editor A.H. Barbat. ISBN: B-42176-99.

GEOPSY (2007). Versión 2.6.3, (SESARRAY-2.0.5), <http://www.geopsy.org>.

González-Mercado, E. (2005). El vulcanismo monogenético de la región de Xalapa, Veracruz, Geomorfología, petrología y génesis y su relación con los límites orientales de la Faja Volcánica Trans-Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, Postgrado en Ciencias de la Tierra.

Hernández, J. (2007). Integración de Sondeos de Mecánica de Suelos en la zona urbana de Xalapa, Veracruz, como base para elaborar un mapa geotécnico. Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, Zona Xalapa, Tesis de Licenciatura, Xalapa.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI (1994). Carta Geológica Orizaba E14-6, escala 1:250,000.

Miranda J. (1979). Características Geotécnicas del Subsuelo de la Ciudad de Veracruz. Tesis Profesional, Veracruz

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

Ordaz M. y C. Montoya. (1990-2002). *Programa DEGTRA*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Orozco y Berra, J. D. (1887). Efemérides Sísmicas Mexicanas, Mem. Soc. Cientif. Antonio Alzate, México, 1, 303-541.

Páez Isidro, Capallera, J. y Miranda J. (2000). Características Geotécnicas y Criterios Básicos para el Diseño de Cimentaciones en la Zona Conurbada de Veracruz, Ver., Tesis Profesional, Veracruz.

Singh S. K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J. M. Espinosa, E. Mena, & R. Quass, (1988). The México earthquake of September 19, 1985 a study of amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site. *Earthquake Spectra*, 4: 653-673.
Servicio Sismológico Nacional, (2009), <http://www.ssn.unam.mx>

Suárez, G. (1991). El sismo de Xalapa del 3 de enero de 1920, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, # 42, México D.F.

Trigos J. L., (1988). Riesgo sísmico, construcciones y reglamentos en México”, Memorias III Simposio nacional de ingeniería sísmica, Guadalajara. Jal. Octubre 30- Noviembre 1 1988.

Torres G. (2000). Importancia de la microzonificación sísmica de las principales ciudades del estado de Veracruz". Memorias congreso nacional por la prevención de desastres, 1^{er} foro regional del sureste sobre desastres hacia una cultura de la prevención, Xalapa, Veracruz. Marzo de 2000. Publicado en La Revista de La Sociedad Mexicana de Salud Pública, A.C.: Revista Higiene, Vol. IV, No.2, Mayo-Agosto del 2002.

Torres, G. (2008). [Microzonificación](http://www.uv.mx/insting/Tesis/tesis-2008.html) sísmica de la zona conurbada Veracruz y evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural del centro histórico", Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería, Zona Veracruz, Tesis Doctoral, Veracruz. <http://www.uv.mx/insting/Tesis/tesis-2008.html>.

Torres G., J. Lermo, R. Dávalos, I. Mora, J. Hernández, M. Leonardo, D. Huesca. (2009). Microzonificación sísmica de la zona conurbada de la Ciudad de Xalapa (ZCX), Ver, Memorias XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, México.