



MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y GENERACIÓN DE MAPAS DE INTENSIDADES EN LA ZONA CONURBADA VERACRUZ – BOCA DEL RÍO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Sara Pérez Torres⁽¹⁾, Francisco Williams Linera⁽¹⁾, Guadalupe Riquer Trujillo⁽¹⁾, Regino Leyva Soberanis⁽¹⁾, Roberto Rivera Baizabal⁽¹⁾, Iris Neri Flores⁽¹⁾, Alejandro Vargas Colorado⁽¹⁾

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. S. S. Juan Pablo II, s/n, Campus Mocambo, Fracc.Costa Verde, C.P. 94294, Boca del Río, Veracruz.

exactas_sara@hotmail.com, fwilliams@uv.mx, franciscowilliamslinera@yahoo.com.mx, guadaluperiquer@yahoo.com.mx, reginol@yahoo.com, rrivera_baizabal@hotmail.com, irisneri@gmail.com, alejvargas@uv.mx

RESUMEN

En este trabajo se destaca el uso de los Sistemas de Información Geográfica (Google Earth y ArcGIS), los cuales se aplicaron en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río (ZCV), para elaborar el mapa digital de Microzonificación Sísmica, posteriormente, se aplicó una metodología para conocer la respuesta de cada zona para el Sismo de Sayula (25/02/11), y se generaron mapas digitales de aceleraciones máximas, para diferentes periodos de interés.

ABSTRACT

In this research emphasizes the geographic information system (Google Earth and ArcGIS) in order to create the digital map of the seismic microzonification, of Veracruz – Boca del Río (ZCV). Also, select the Sayula Earthquake (25/02/11) and applied a method to know the maximum accelerations for different periods of interest, that was used for generate intensity maps.

INTRODUCCIÓN

La zona conurbada Veracruz-Boca del Río (ZCV), cuenta con uno de los principales puertos comerciales y turísticos de México, y su crecimiento urbano continua, como resultado de esto, posee importante infraestructura marítima, zonas hoteleras, comerciales e industriales, y por último, pero en mayor cantidad, con unidades habitacionales. Estas construcciones constantemente se enfrentan a desafíos del hombre, de la naturaleza y del tiempo, con peligros como: errores constructivos y fenómenos naturales (huracanes, sismos).

Por esa razón, es de nuestro interés que estas construcciones cumplan con la reglamentación, y para aplicarlas correctamente debemos conocer cual le corresponde, de acuerdo a las propiedades dinámicas del lugar. De esta forma, tendremos estructuras resistentes, que podrán salvar vidas y mantener servicios indispensables como: agua potable, luz eléctrica, vías de comunicación, hospitales, oficinas de gobierno y continuar con la actividad turística. Además de evitar altos costos en reparación y reconstrucción, en su mayoría de casas habitación, pues generalmente es la población quien sufre las consecuencias.

En este trabajo, se analizó el desarrollo urbano, zonas inundables, estudios de mecánica de suelos, pruebas de campo para conocer el efecto de sitio, y registros sísmicos. Integrando la información, se generaron capas para su manejo en Sistemas de Información Geográfica (SIG), con esto, fue posible elaborar mapas digitales que contienen información asociada, de Microzonificación Sísmica de la ZCV y posteriormente, al conocer la respuesta de cada zona ante sismos de diversas fuentes y magnitudes, Mapas de Intensidades, para diferentes periodos de interés.

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Es el conjunto de hardware, software y datos, que permiten manipular y analizar información geográficamente referenciada. Su campo de aplicación realmente depende del usuario, pues es él quien decide qué información usar y que desea analizar (Figura 1).

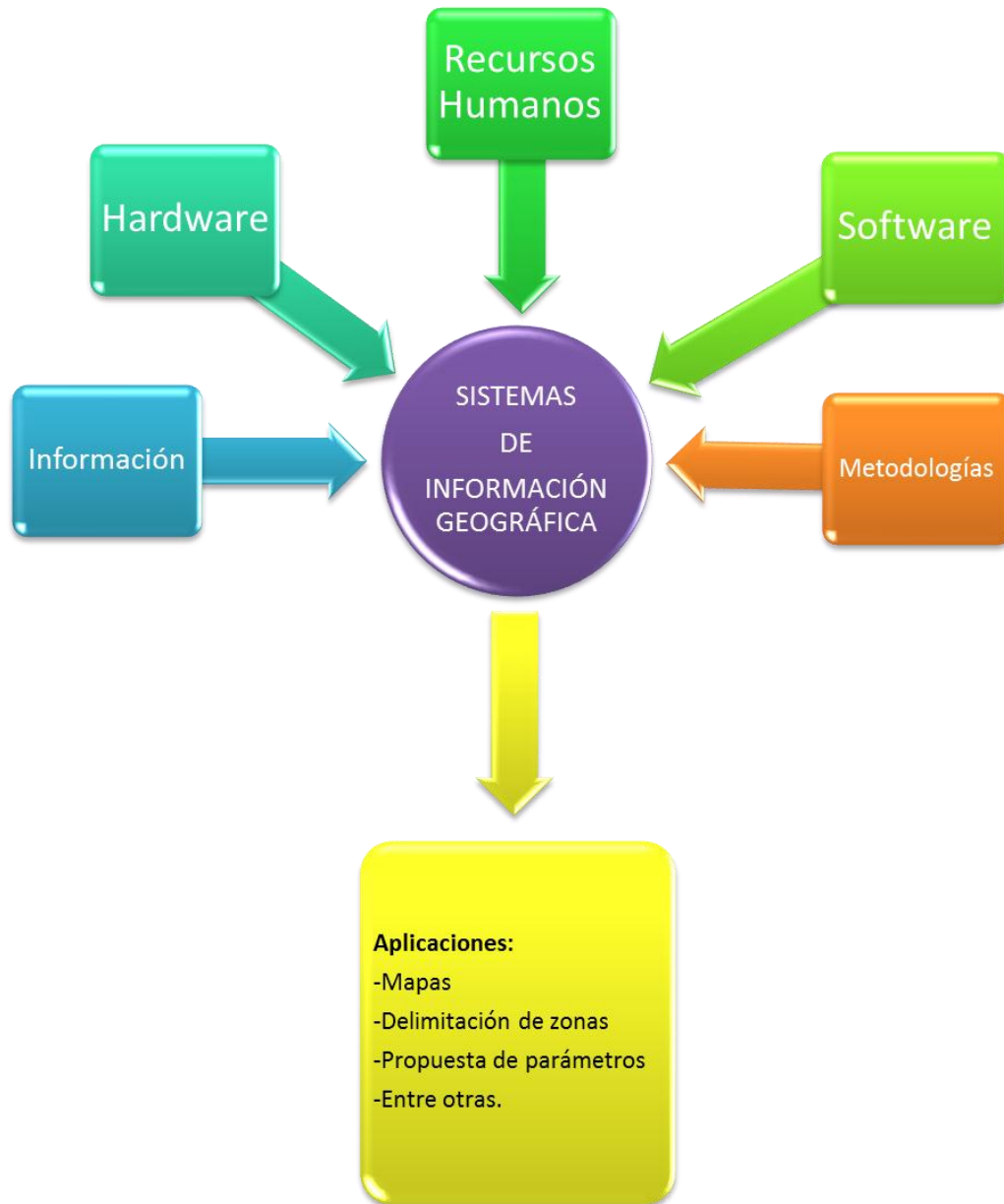


Fig. 1.- Sistema de información geográfica.



Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizan capas temáticas digitales, las cuales se pueden obtener de fuentes como el INEGI y en otros casos se pueden generar a partir de una base de datos, además es posible asociarles información, como reportes o fotografías.

En este trabajo, se emplearon 3 tipos de capas: puntos, líneas y polígonos, éstas pueden indicarnos la ubicación de un sitio, de ríos o zonas de estudio, respectivamente, (Figura 2), sin embargo, las posibilidades son infinitas ya que 2 capas de un mismo tipo, por ejemplo de puntos, pueden representar diferentes temas como una prueba y un epicentro, solo se deben variar aspectos como el tamaño o color, por mencionar algunos, y asegurarse de mostrar la simbología.

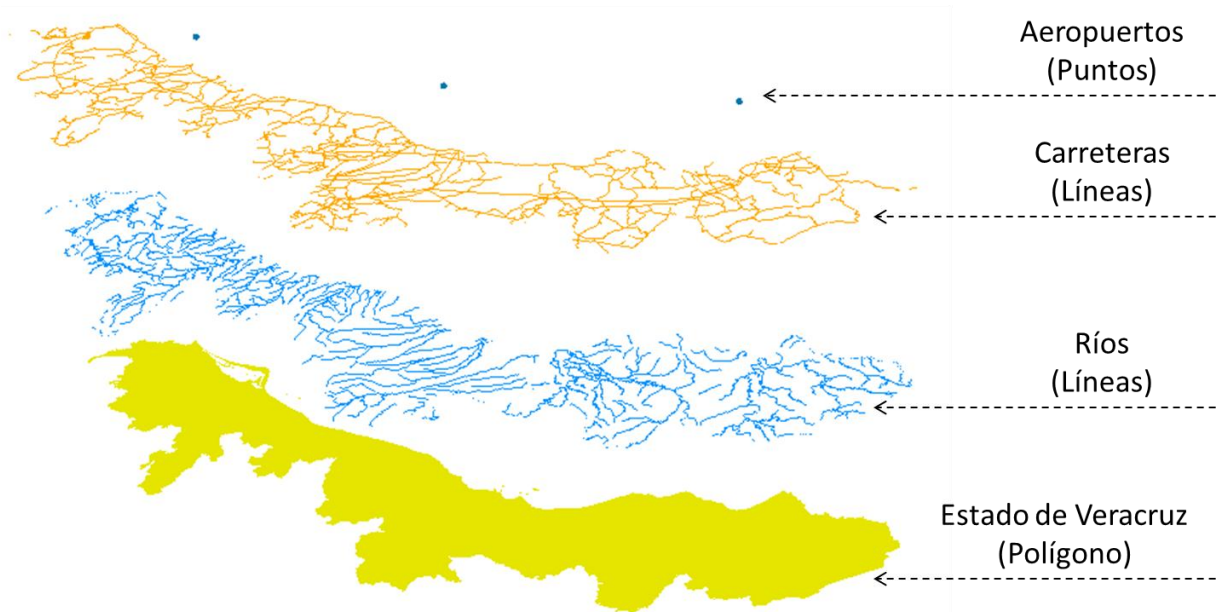


Fig. 2.- Capas digitales.

Cada capa debe contar con proyección geográfica, y lo ideal es trabajar el proyecto en un solo sistema, así que, debido a la extensión y ubicación de la ZCV, se optó por usar el sistema de coordenadas geográficas WGS84 y las capas que se encontraban en otro sistema se transformaron a éste.

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Análisis del desarrollo urbano

Se emplearon mapas de los siglos XVIII, XIX y XX, que pertenecen al archivo de Indias, en los cuales se observa la ciudad amurallada para repeler los ataques.

Se digitalizaron los mapas y se usó Google Earth, para realizar una comparación de éstos con la actualidad, el procedimiento se detalla a continuación:

Se ejecutó Google Earth y se visualizó la zona de interés.

De la barra de herramientas, se seleccionó la opción “Añadir”, a continuación, “Superposición de imágenes”, en la ventana emergente designamos el nombre e indicamos la ruta donde se encontraba el mapa digitalizado.

Al ser una imagen y no una capa temática digital, el mapa se visualiza, pero no posee escala, ni se encuentra geográficamente referenciado. Sin embargo, el programa cuenta con herramientas que permiten ampliar, disminuir o rotarlo.

Se procedió a identificar puntos de referencia que contenían los mapas y continúan existiendo, algunos de ellos fueron; la plaza de armas (actualmente el Zócalo de Veracruz), el fuerte de San Juan de Ulúa y el Baluarte de Santiago, entre otros.

El procedimiento anterior, se repitió para cada uno de los mapas (Figura 3).

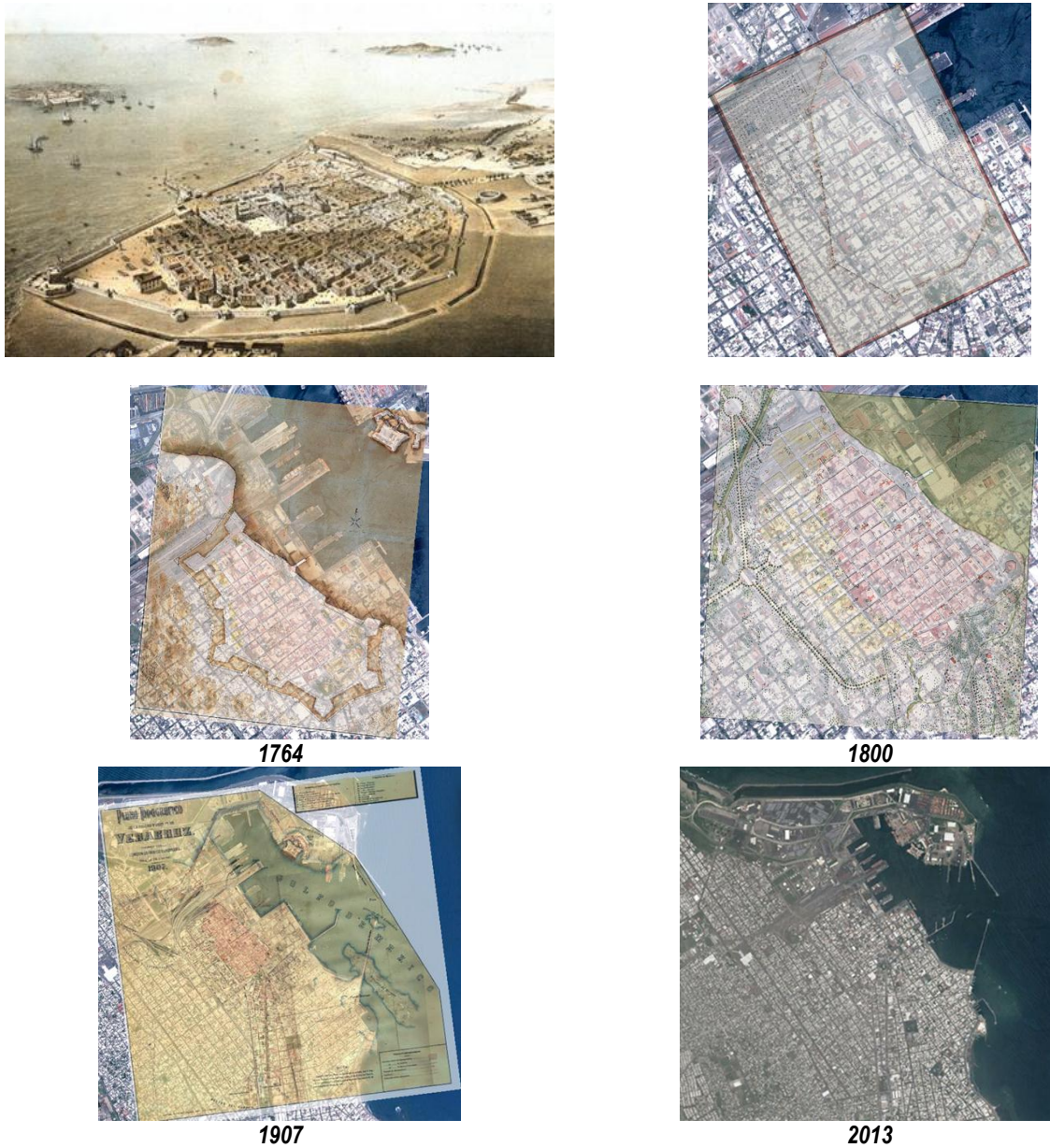


Fig. 3.- Crecimiento Urbano.



De éste análisis, se obtiene que la actual zona del centro histórico se conserva intacta, ya que posee la misma distribución que hace siglos, coincidiendo las plazas principales, calles e incluso pequeñas plazuelas y callejones, sin embargo, debido a las necesidades de vivienda, se expandió la zona urbana de forma errática y sin considerar las condiciones del terreno. Adicionalmente, se identificaron antiguos cauces de ríos, cuerpos de agua, terrenos ganados al mar.

Estudios de mecánica de suelos

Se recopiló información geológica-geotécnica, consultando tesis, artículos y mapas físicos, los cuales se digitalizaron y generaron archivos, también se descargaron capas del INEGI, para complementar la información, se consultaron estudios de mecánica de suelos, los cuales se depuraron de acuerdo a su tipo (SPT o pozo a cielo abierto), algunos solo indicaban la dirección y otros tenían coordenadas UTM, por lo que la ubicación espacial se homogenizó a coordenadas geográficas, los estudios se realizaron a diferentes profundidades y en diversos sitios, incluso en la zona de coral, por último, se definieron perfiles estratigráficos.

De esta información anterior, se generaron 2 capas una de puntos que corresponden a los sondeos SPT y se representan con su simbología oficial y otra de líneas que representa los perfiles, ambas, muestran información asociada al seleccionarlos (Figura 4).

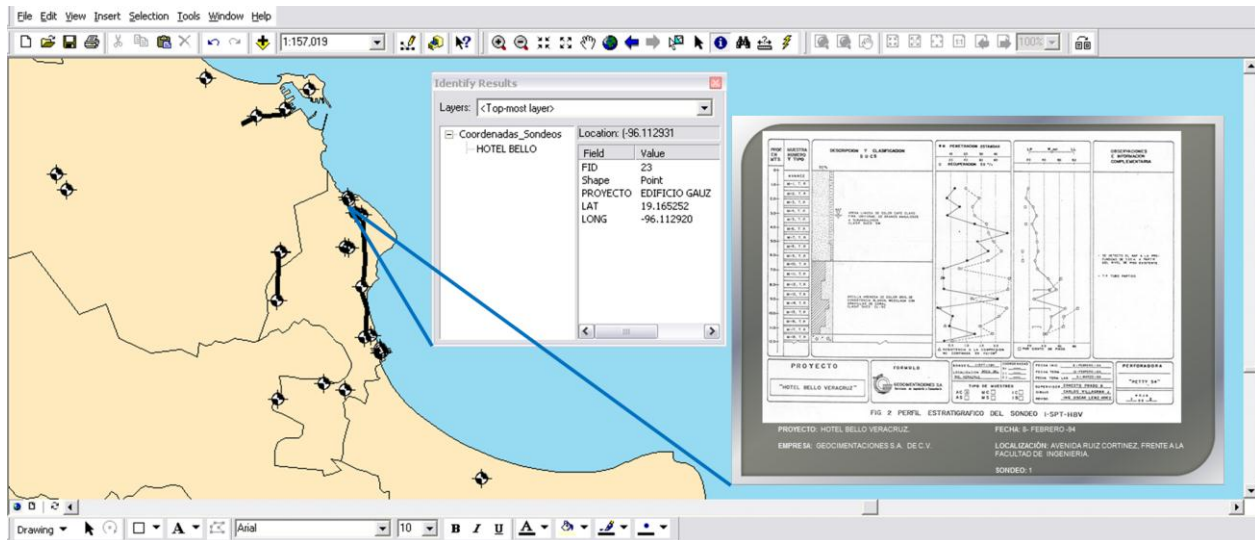


Fig. 4.- Mecánica de suelos.

Es importante mencionar que en los sondeos no se encontró roca firme, mayor razón para realizar estudios de microzonificación, pues debemos conocer el efecto de sitio, ya que contamos con suelos blandos.

Efecto de sitio

Se puede identificar conociendo el período dominante, parámetro que depende directamente de las propiedades de la estratigrafía del suelo. Se realizó el registro de microtremores (vibración ambiental) por su sencillez de operación y su bajo costo, así como por la rapidez con que permite obtener resultados, en especial cuando es interpretado utilizando la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical (H/V) de un mismo registro (técnica de Nakamura), propuesta originalmente por Nakamura (1989). Sin perder de vista que el mismo, subestima la amplificación del movimiento.

Se planearon las campañas de campo, ubicando los posibles puntos de vibración ambiental con al menos 50 metros de distancia entre ellos, distribuidos en la ZCV y considerado el riesgo sísmico, pues se cuenta con extensiones territoriales sin habitar, como ya se contaba con información geológica-geotécnica se tomaron en cuenta las características del suelo, así como el tipo de herramientas a usar y la duración de las campañas, pues se buscó optimizar tiempos y realizar la mayor cantidad de pruebas.

Una vez en campo se realizó la prueba, usando un acelerógrafo ETNA marca Kinometrics, el cual debía estar orientado y nivelado, algunos puntos se realizaron en la zona urbana, por lo cual la nivelación fue más sencilla, sin embargo, en estos casos, se debían evitar registros de agua, pues interfiere con la información del registro, por otra parte en zonas alejadas a la ciudad, fue necesario el uso de palas y demás herramienta especializada para la correcta nivelación del equipo, en cada punto se tomó registro fotográfico del lugar. Se destaca que esta prueba puede realizarla una persona con una duración de 20 minutos por punto.

Posteriormente, se realizó el procesamiento de la prueba, obteniendo para cada punto, una Función de Transferencia Empírica (FTE) en ambos sentido, Este-Oeste y Norte-Sur, que muestra amplitud y frecuencia dominante.

Es importante mencionar, que estos estudios se han realizado a lo largo muchos años, por lo que las pruebas se han sido en 2 etapas, la primera durante 2001-2002, que abarcó la zona norte de la Ciudad y se registraron 176 puntos y la segunda durante 2007-2008, que se enfocó hacia la zona sur, así como también se corroboraron algunos puntos, que requerían mayor estudio, obteniendo un total de 332 puntos.

Por lo anterior, se realizó un arduo trabajo, recolectando archivos, homogenizado formatos de trabajo, depurando, reubicando e incluso, en algunos casos, volviendo procesar los puntos. También se modificó el sistema de coordenadas, a pesar de que ambos usaron UTM, en la segunda etapa se abarco una mayor extensión, cambiando de la Zona 14 Norte a la Zona 15 Norte, causando un conflicto en el SIG, por lo cual, se transformaron a coordenadas geográficas.

Se generó una base de datos que integró los 332 puntos de estudio, contiene amplitud, periodo y frecuencia de cada uno, a partir de esta base, se elaboró una capa de puntos, que además de mostrar éstos parámetros, tiene asociada el registro fotográfico y el archivo que muestra la FTE en ambos sentidos (E-O y N-S) con los valores que contiene cada una, esta información está disponible para cada punto de vibración ambiental (Figura 5).

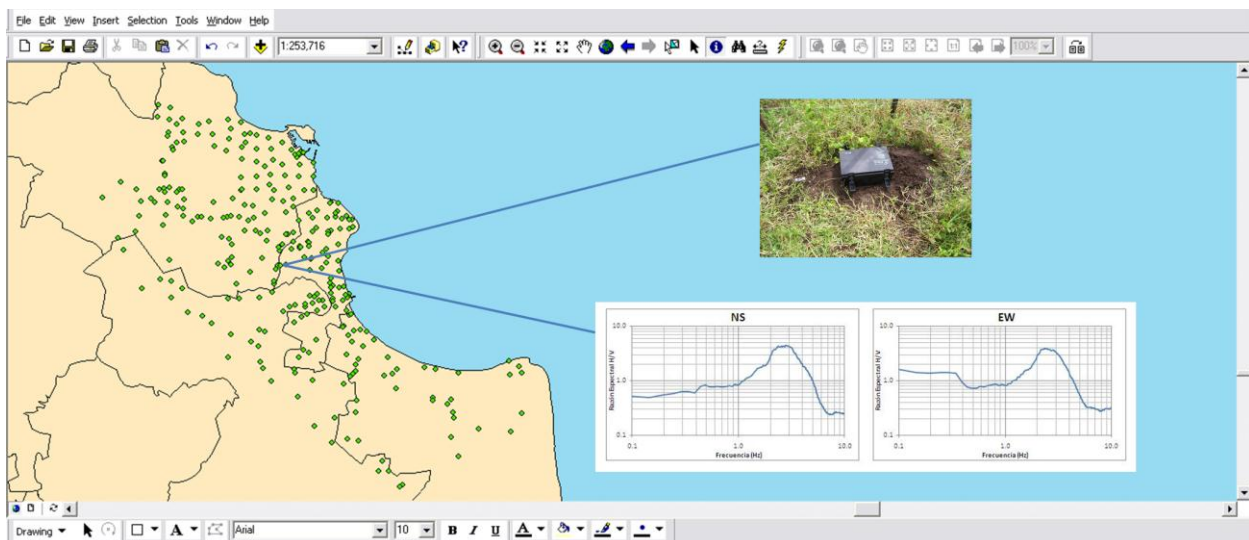


Fig. 5.- Vibración Ambiental.



Velocidades de cortante

De manera paralela a las pruebas de vibración ambiental, se realizaron pruebas de refracción sísmica, nuevamente las planeación de las campañas realizadas en el SIG, aportaron ventajas en costos y tiempos. Para este caso, se requerían terrenos amplios, de preferencia libres de hierba y arboles, para colocar los geófonos y evitar interrupciones en el tendido, el cual era ≥ 70 metros, debían estar alejados del tráfico, del oleaje y de cualquier interrupción que afectara el registro, se consideró el acceso a los sitios, pues debido al equipo necesario, es indispensable un vehículo para su transporte, además de que éste también se emplea en la prueba (Figura 6).



Fig. 6.- Zona de estudio y geófonos para refracción sísmica.

Contrario a la prueba anterior, ésta puede durar varias horas y el personal necesario, es considerable, ya que se necesitan realizar mediciones, orientar y colocar geófonos, hacer excavaciones, desplazar el vehículo y manejar el software e interpretar resultados preliminares.

Se procesaron los registros y se obtuvo el número de estratos, sus espesores y velocidades de cortante. Se realizaron 12 pruebas. Se creó una base de datos que contiene nombre del lugar y ubicación geográfica, de la cual se generó una capa de puntos.

Delimitación de las microzonas

Se visualizaron en el SIG las siguientes capas digitales (Tabla 1):

Tabla 1.- Capas digitales	
Nombre	Tipo
Pruebas de vibración ambiental	Puntos
Pruebas de refracción sísmica	Puntos
Estudios SPT	Puntos
Perfiles estratigráficos	Líneas
Curvas de nivel	Líneas
Cuerpos de agua	Polígonos
Ríos	Polígonos
Geología-Geotécnica	Polígonos
Uso de Suelo y vegetación	Polígonos
Zona Inundable*	Polígonos

*Adicionalmente, han aumentado los daños originados por huracanes, como el STAN en 2005 o Karl en 2010, éste último, provocó que varios ríos y arroyos superaran su escala, en el centro de Veracruz se registró un tirante de hasta un metro y medio de altura, que ocasionó inundaciones en la ZCV, la mancha de inundación provocada es la capa Zona Inundable, realizada por el SAS.

A primera vista, se observó que no existe una correlación directa entre el valor de los periodos dominantes y la geología-geotecnia de la zona, así que no fue posible establecer microzonas a partir de esta información.

Se optó por agrupar las FTE, en 3 Familias de Formas Espectrales (Figura 7):

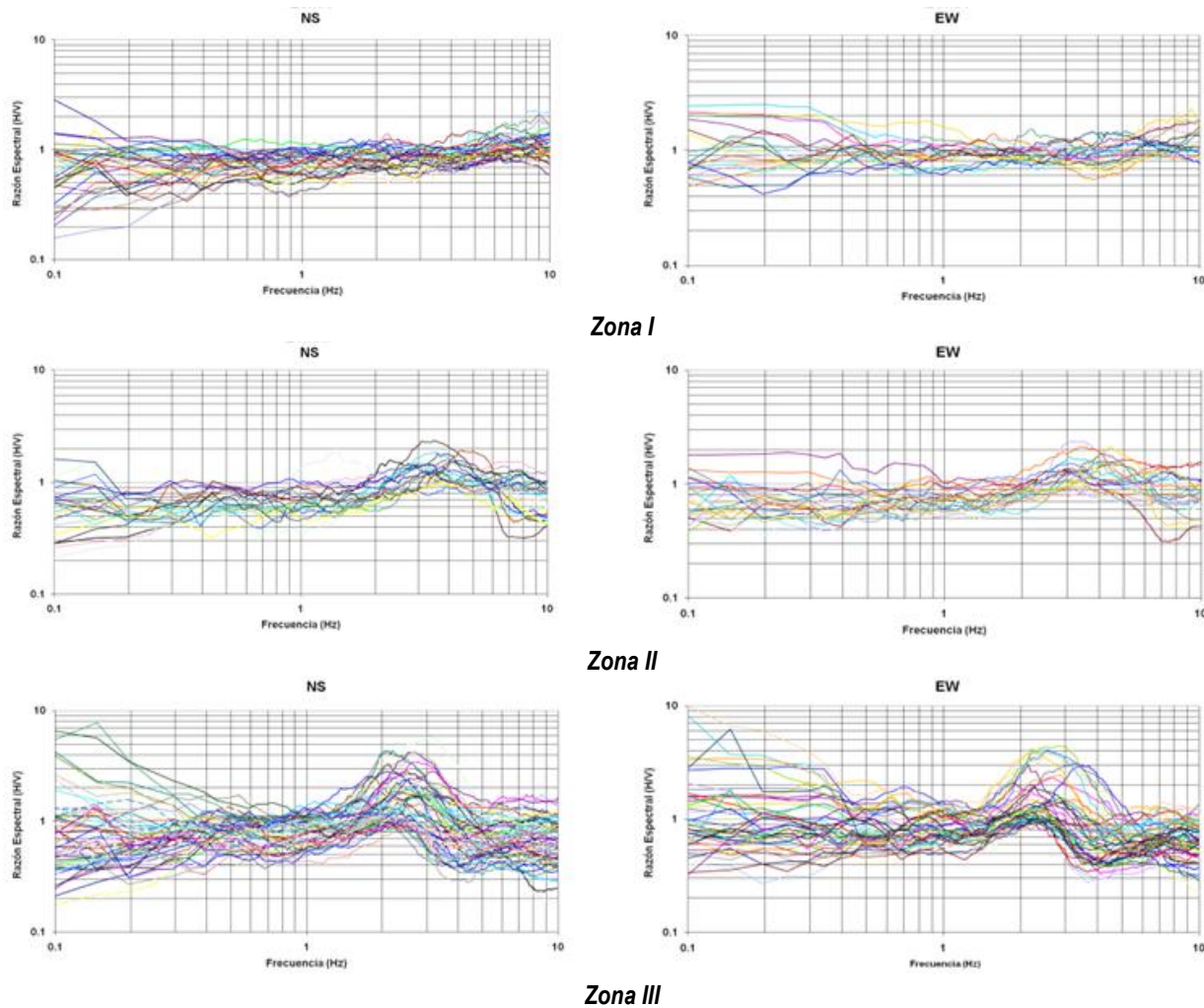


Fig. 7.- Familias de Formas Espectrales.

En el SIG, se identificaron los puntos que corresponden a cada familia y se consideró la información de mecánica de suelos, topografía, hidrografía para delimitar las microzonas, finalmente, se generó una capa con 3 polígonos, cada uno corresponde a una microzona. Un aspecto importante que facilitó la visualización y manipulación de las capas, fue que todas poseen el mismo sistema de coordenadas.

Una vez creadas las capas, la presentación de los mapas digitales depende de las necesidades del proyecto, en este caso es interesante conocer la mancha urbana en relación con la microzonificación (Figura 8). Para esto, se obtuvo la imagen de la ciudad de google earth y se georeferenció en el SIG, posteriormente fue posible cargar todas las capas de interés. En casos donde las capas interferían con la mancha urbana, se les asignó un porcentaje de transparencia, que permitía visualizar 2, 3 o incluso más capas a la vez.

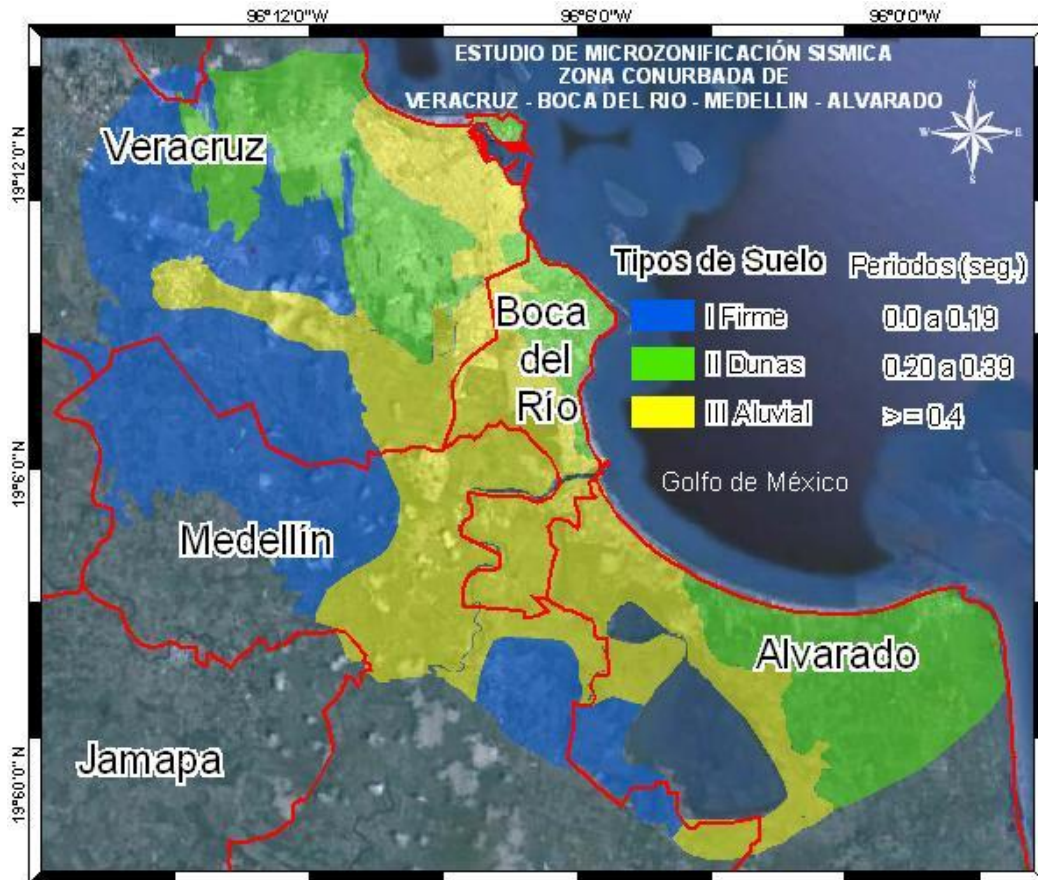


Fig. 8.- Microzonificación sísmica.

MAPAS DE INTENSIDADES

Antecedentes

Se realizó el análisis estadístico de la sismicidad del estado, a partir del catálogo de sismos instrumentales y se concluyó que es de mayor densidad al centro y sur del Estado. Al centro con menor tasa de sismicidad, y en su mayoría asociados a eventos intraplacas someros o poco profundos con magnitud $M_s < 4$. La zona norte del Estado no tiene evidencias de sismos de gran magnitud. Destaca sin embargo la poca instrumentación sísmica, por lo que se deduce que la sismicidad es baja y posiblemente solo detectada por redes de cobertura local.

Por otra parte, el daño que puede ocasionar un sismo no depende de los límites geográficos, por lo que también se consideraron aquellos registrados por red del Instituto de ingeniería, la cual lleva más de una década en funcionamiento. Cabe destacar que esta red consta de una estación de referencia ubicada en terreno firme (sin efecto de sitio), y estaciones temporales, las cuales se reubican periódicamente, en principio se buscaban puntos aleatorios en la ZCV, actualmente, se cuenta con una capa de puntos que contiene la clave de la estación temporal y su ubicación correspondiente, ésta se agregó al SIG que contiene la Microzonificación Sísmica, permitiendo proponer las estaciones temporales en diferentes zonas y evitando que los sitios de estudio se han cercanos a los anteriores, para abarcar una mayor extensión de registro.

A partir de los registros, se elaboró y depuró una base de datos, que contiene XX sismos, se clasificaron por tipo de fuente y estación de registro, con la cual se creó una capa de puntos que representa los epicentros dentro y cerca del país (Figura 9).

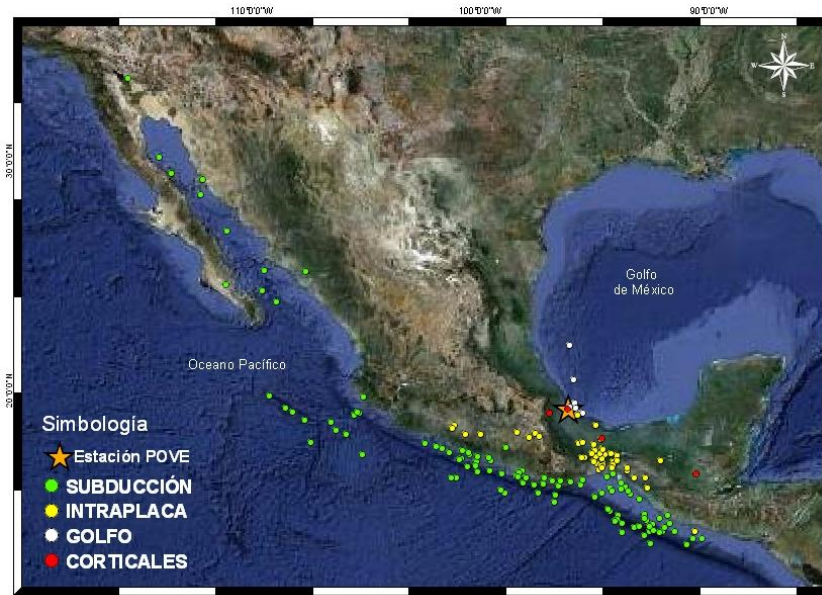


Fig. 9.- Sismo por fuente.

Metodología

Determinar el sismo para el cual se van a generar los mapas de intensidades. Se eligió el sismo del 25 de febrero de 2011, por su tipo de fuente y magnitud, ocurrió a las 7:07 horas tiempo de México, con una magnitud $M_w=6.0$, asociado a una profundidad de 135 Km y fue localizado por el Servicio Sismológico Nacional con coordenadas epicentrales de 17.76 latitud N y 95.21 longitud W, en la frontera entre los estados de Oaxaca y Veracruz, aproximadamente a 30 Km al Suroeste de Sayula de Alemán, Veracruz. Fue registrado por la estación de referencia y 2 estaciones temporales instaladas en la ZCV (Figura 10).

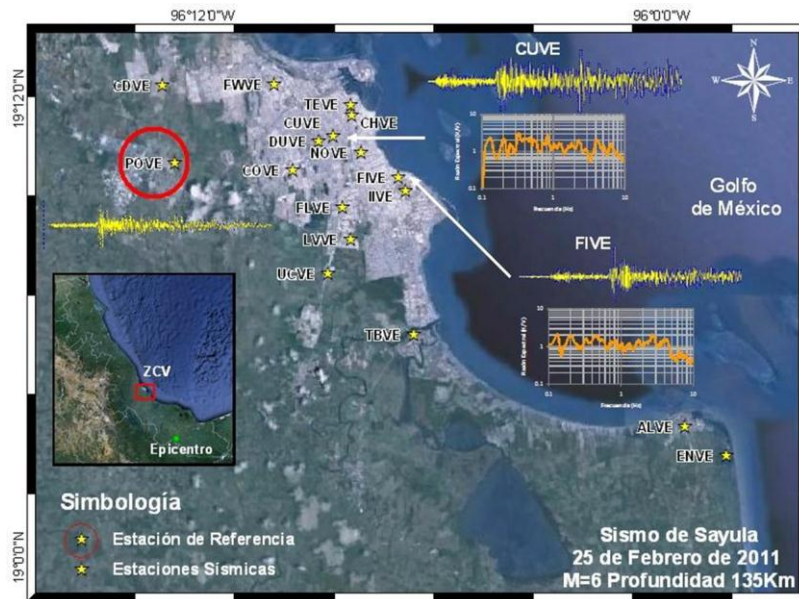


Fig. 10.- Epicentro del sismo de Sayula y estaciones de registro sísmico en la ZCV.



Se creó una carpeta para cada microzona, dentro contiene una carpeta con la información del sismo seleccionado y 3 carpetas más, que corresponden a las FTE, a los acelerogramas sintéticos y los espectros de respuesta sintéticos.

Seleccionado el sismo y conociendo donde se guardará la información, se obtuvo el registro en la estación de referencia, contiene la aceleración producida por el sismo. Se guardaron estos valores en una columna en formato .DAT, este archivo se llamó ARoca.

Se determinó el valor de la amplitud promedio de ambos sentidos (E-O y N-S), esto se realizó para cada FTE.

Para la zona de dunas y aluvial, se aplicó un factor de escala a la amplitud promedio.

La zona firme, permaneció sin cambios.

Se guardó una columna en formato .DAT que contiene el valor de la amplitud promedio de cada FTE. Cada archivo se llamó FTEPX, es decir Función de Transferencia Empírica Promedio, la X representa el número del punto de vibración ambiental.

La ARoca y las FTEP, se usaron para generar acelerogramas sintéticos, para cada punto de vibración ambiental. En ocasiones el equipo que registró el acelerograma en roca tiene un incremento en frecuencia, diferente al del equipo que registró las FTE, en estas situaciones, es posible obtener los acelerogramas sintéticos, sin embargo, como sucedió en este caso, se debe realizar una interpolación para cada FTE, y de esta forma, obtener los valores de aceleración correspondientes a las mismas frecuencias.

Se determinó para cada uno de ellos su respectivo espectro de respuesta sintético de pseudoaceleraciones, para un amortiguamiento del 5 %.

Se establecieron los periodos de interés, para los cuales se van a generar los mapas de intensidades, fueron: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 segundos.

Adicionalmente, se determinó generar un mapa considerando las aceleraciones máximas del terreno.

En este punto, se tenían 332 espectros de respuesta sintéticos, de los cuales se generó una base de datos con las aceleraciones de todos los puntos, posteriormente, se depuró considerando las aceleraciones que corresponden a los periodos seleccionados.

La información de esta base de datos, complementó a la base de puntos de vibración ambiental, de esta forma, los valores de aceleración de cada período, están asociados a la ubicación geográfica correspondiente.

Se creó una capa de puntos, cuya información asociada es: ubicación geográfica, efecto de sitio, aceleraciones para los periodos seleccionados y aceleraciones máximas.

Se cargó ésta capa en el SIG y se realizó una interpolación para cada período y para las aceleraciones máximas del terreno. Esto para cada para obtener valores en toda la zona de estudio.

Por último, se presentan los mapas con las capas de interés, donde se relaciono la microzonificación con las intensidades obtenidas (Figura 11).

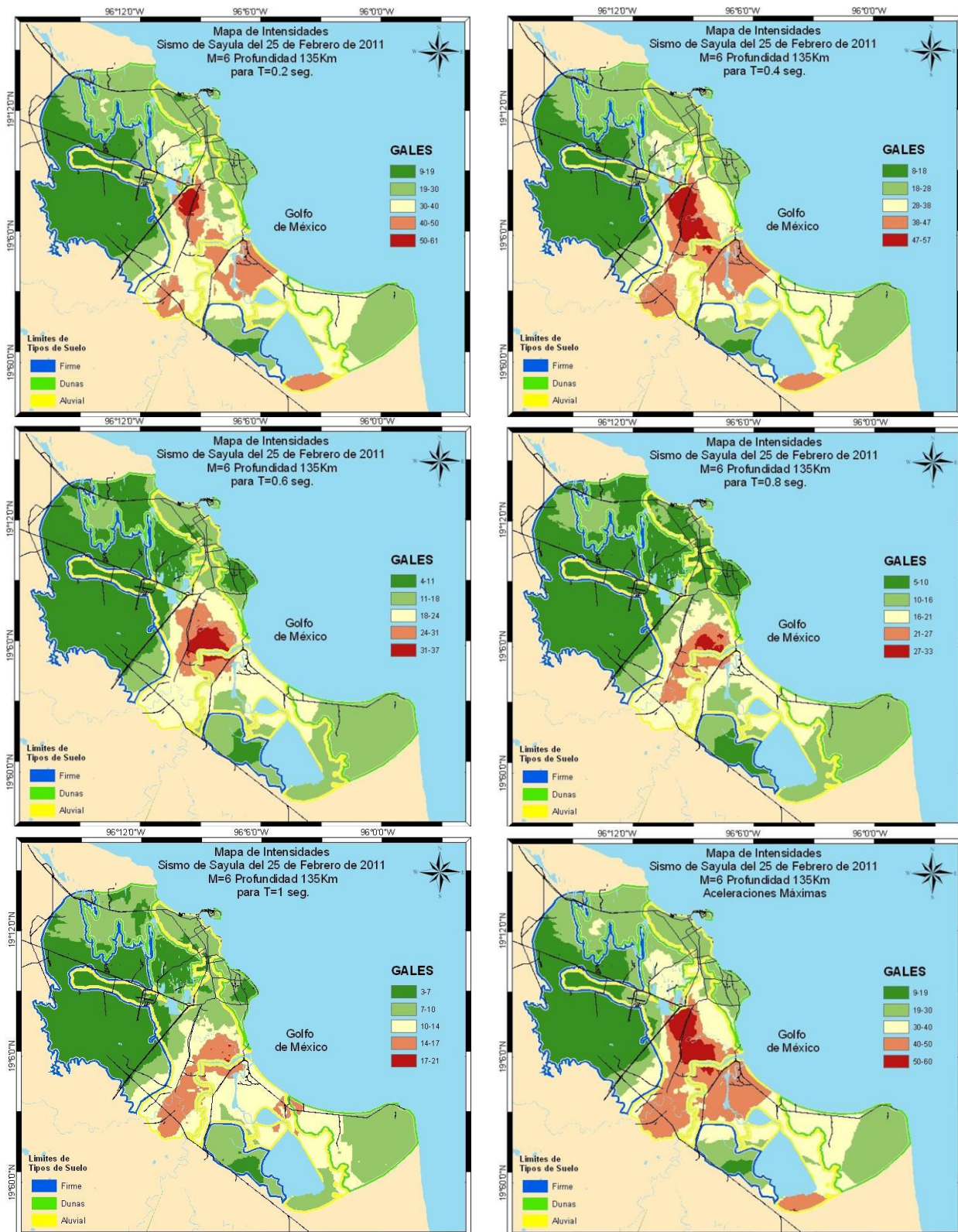


Fig. 11.- Mapas de Intensidades



CONCLUSIONES

Empleando los SIG, se logró optimizar el tiempo para realizar las pruebas en campo, aunque se requiere mayor preparación en la selección del lugar, se compensa con la ubicación ideal y reconocimiento de los accesos a sitio, además se tiene un idea previa de las condiciones del mismo, permitiendo incluso, llevar a cabo varias pruebas simultáneas.

Durante el desarrollo del proyecto, se permitió identificar sitios que requieren un análisis especializado, se realizó la verificación de algunas pruebas, así como suponer el comportamiento de algunas zonas. De igual forma fue posible complementar la información de cada área, como fue; mecánica de suelos, topografía, pruebas de campo, entre otras.

Los resultados de las pruebas realizadas, se reflejan en la propuesta de las microzonas, las cuales se visualizan en mapas y se relacionan con la mancha urbana, de ésta forma se podrá conocer de acuerdo a las características de la zona, los parámetros propuestos por los reglamentos correspondientes.

Es posible continuar enriqueciendo, éste SIG, como se muestra con los mapas de intensidades que se generaron y están relacionados con la microzonificación.

REFERENCIAS

Riquer, G., Williams,F., Lermo,J., Leyva, R., Neri,I., Santamaría, J. (2008), “*Ampliación de la red de registro sísmico basada en una regionalización sismotectónica preliminar del Estado de Veracruz*”, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Veracruz, Ver., México.

Williams F., Riquer, G., Leyva, R., Vargas, A., Zamora, A., Lermo, J., Limaymanta, F., (2008). “*Estudios para la reducción de daños por sismos en las construcciones del estado de Veracruz.*”. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Veracruz, Ver., México.

Williams F., Riquer, G., Leyva, R., Lermo,J., Pérez, S., Rivera, R. (2010), “*Espectros de diseño sísmico para las construcciones del Estado de Veracruz de acuerdo a CFE-2008*”, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, México.

Williams F., Lermo,J., Sánchez, J., Riquer, G., Leyva, R., Pérez, S., Rivera, R.(2011), “*Mapas de intensidades sísmicas en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río (ZCV), México, para el sismo de Sayula del 25 de febrero de 2011 (Mw6.0)*”, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, México.