



SISTEMA DE ESTIMACIÓN TEMPRANA DE DAÑOS POR TSUNAMI LOCAL EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DEL PACÍFICO MEXICANO

Benjamín Huerta Garnica¹, Mario Ordaz Schroeder² y Octavio Hinojoza Gabriel³

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es mostrar las características y resultados de un sistema automatizado de estimación temprana de daños ante sismos que ocasionen tsunamis locales en México. Se trata de un sistema que opera en forma automática sin la intervención constante de un usuario; en cuanto se registra un evento de sismo en la zona de subducción el Sistema identifica las características del mismo y comienza a realizar la evaluación de riesgo para los elementos expuestos ingresados previamente, obteniendo resultados para estimación de pérdidas físicas y población afectada.

ABSTRACT

The aim of this paper is to show the characteristics and results of an automated system of early estimation of damage to local tsunamis caused by earthquakes in Mexico. It is a system that operates automatically without the constant intervention of the user; when an earthquake event occurs in the subduction zone, the System identifies the characteristics of it and begins with the evaluation of risk for the exposed elements previously entered, obtaining results for estimating physical losses and affected population.

INTRODUCCIÓN

La costa occidental de México ha sido afectada por tsunamis derivados de grandes terremotos ocurridos en la zona de subducción del Pacífico, entre Jalisco y Chiapas. Por ejemplo, el tsunami de noviembre de 1925 que afectó Zihuatanejo con olas de 11 metros de altura y el de junio de 1932, que invadió Cuyutlán con olas de 10 metros de altura, son eventos que han dejado marca en las poblaciones. El sismo de 1985 causó miles de decesos y daños en el centro del país, pero también causó estragos en las costas, debido a los efectos del tsunami.

El tsunami más catastrófico que provocó el sismo con epicentro en la isla de Sumatra afectó todo el Océano Índico y devastó regiones de Sumatra y Sri Lanka. El recuento de las víctimas es de más de 280,000 personas y los daños económicos son incalculables.

En años más recientes, los tsunamis de los sismos de Chile de 2010 y Japón en 2011, han provocado daños importantes. El primero impactó las localidades de Pelluhue y Curanipe en el puerto de Talcahuano, donde el mar ingresó de 150 a 200 metros con una elevación de alrededor de 2.5 metros, dejando barcos pesqueros estacionados en las calles de la ciudad, dañando infraestructura civil y causando la muerte de 760 personas. El segundo produjo devastadores tsunamis de hasta 24 metros a lo largo de la costa de Tohoku al noreste de Japón causando pérdidas de vidas humanas, destrucción de caminos, carreteras y vías férreas, incendios, el colapso de una presa y explosiones en dos plantas nucleares.

¹ Director de modelos de riesgo, ERN Evaluación de Riesgos Naturales, Vito Alessio Robles No.179, Col. Hda. Gpe. Chimalistac, 01050, México, D.F. Tel. 5616-8161, 62, 64; benjamin_huerta@ern.com.mx

² Investigador, Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, DF, Tel.: (55) 5623-3500; mors@pumas.iingen.unam.mx

³ Coordinador de proyectos, ERN Evaluación de Riesgos Naturales, Vito Alessio Robles No.179, Col. Hda. Gpe. Chimalistac, 01050, México, D.F. Tel. 5616-8161, 62, 64; octavio_hinojoza@ern.com.mx

La importancia de un sistema de estimación temprana de daños ante tsunamis, como el que se presenta en este trabajo, es contar con parámetros que contribuyan a generar un plan de acción para lograr una atención inmediata de la emergencia, con el propósito de minimizar los efectos que estos fenómenos provocan a la población.

Este Sistema es parte de un conjunto de herramientas de estimación de riesgo en bienes asegurados e infraestructura que incluyen varios de los peligros naturales como sismo, huracán e inundación. La estimación temprana de daños por tsunami se combinará de manera adecuada con las estimaciones de sismo que forman parte de un proyecto complementario a este trabajo.

ANTECEDENTES

Con base en la información de eventos recientes, los daños reportados se pueden correlacionar con los siguientes factores, en orden de prioridad:

- a. Distancia del epicentro – Las zonas más cercanas al epicentro registran los mayores daños y las mayores pérdidas humanas por el menor tiempo para evacuar las partes bajas y cercanas a la costa.
- b. Batimetría y morfología de la costa – La batimetría determina en gran medida la altura y forma de la ola al llegar a la costa; la morfología de la costa, por otra parte, puede concentrar o disipar la energía de la ola. En este caso, las zonas más afectadas son las bahías profundas y las líneas de costa que no son paralelas a la zona de ruptura.
- c. Topografía de la costa – La topografía de la costa es determinante en la distancia horizontal (tierra adentro) de propagación del tsunami. Las zonas más afectadas son las partes bajas, planas y los márgenes de los ríos.
- d. Distancia de la costa – La energía del tsunami es disipada al propagarse tierra adentro por la fricción que ejercen los rasgos del relieve del terreno, ya sea de forma natural (árboles) o antropogénica (construcciones). En general se registraron menos daños a mayor distancia de la costa y en aquellos lugares donde se encontraron ‘barreras’ naturales o artificiales.
- e. Tipo de construcción – En este factor influyeron dos variables, 1) el material de la construcción, es decir si el edificio está hecho de madera o de concreto, y 2) la forma y altura del edificio. Se observa que las zonas con construcciones predominantemente de madera son ‘barridas’ por completo, mientras que en aquellas zonas con edificios de concreto, se encontraron todavía edificios en pie, particularmente aquellos más altos que la altura máxima de *run-up*.
- f. Tipo de población – El tipo de población y el siguiente desarrollo del área son factores fundamentales en la magnitud de los daños observados. Las zonas rurales, menos pobladas y con menor infraestructura, obviamente sufren menos daños económicos que aquellas áreas con mayor concentración de bienes expuestos pero el número de víctimas puede ser mayor en estas zonas.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En México los tsunamis más destructivos se originan por sismos que ocurren en el contorno costero del Océano Pacífico (Huerta y Ordaz, 2007), en las zonas de hundimiento de los bordes de las placas tectónicas que constituyen la corteza del fondo marino. Los tsunamis se generan cuando se presenta un movimiento vertical del fondo marino que desplaza una gran cantidad de agua, ocasionado por un sismo de gran magnitud y poca profundidad.

La estimación temprana de daños por tsunami involucra principalmente tres factores:

- a. Cálculo de la amenaza o peligro, en este caso la estimación de las zonas de inundación.
- b. Cuantificación de bienes, localización y características de los mismos.
- c. Aplicación de funciones de vulnerabilidad a cada elemento expuesto, estas se definen por la relación intensidad - daño.

El sistema descrito en este trabajo revisa la información de sismos en las páginas de Internet de los principales organismos nacionales e internacionales. Con esta información se usan algoritmos simples para determinar si

el sismo puede provocar un tsunami en la zona del Pacífico Mexicano y estima los parámetros de amenaza para finalmente realizar la estimación de daños sobre una base de datos de elementos expuestos previamente almacenada (Hinojosa y otros, 2011).

CARACTERISTICAS GENERALES

La metodología para la estimación de pérdidas por tsunami local en México se puede ejemplificar con el siguiente diagrama de flujo (ver figura 1), el cual considera los factores más importantes de generación de tsunamis y de sus afectaciones (Huerta y Ordaz, 2009).

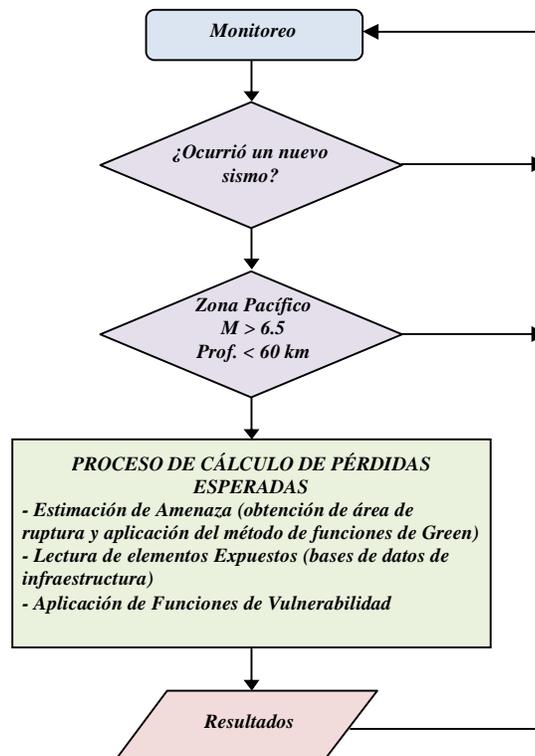


Figura 1 Diagrama de flujo general del Sistema

Este Sistema considera que dadas las condiciones anteriores se producirá un tsunami, aunque debemos reconocer que la determinación de si un sismo generará tsunami es un problema muy complejo donde existe gran incertidumbre (González y otros, 2012). Se sabe que incluso cumpliéndose muchas de las condiciones para que se produzca un tsunami, éste no llega a suceder.

Amenaza

Para la evaluación del riesgo se emplea un modelo de amenaza desarrollado por el Dr. Modesto Ortiz que permite analizar los efectos de tsunamis en la línea de costa del pacífico mexicano (Reinoso y otros, 2006). El método consiste en el uso de funciones de Green previamente calculadas con un modelo numérico de propagación de tsunamis que resuelve mediante diferencias finitas las ecuaciones hidrodinámicas de ondas largas en aguas someras (González y otros, 2012).

La predicción de alturas y tiempos de arribo de un posible tsunami en costas mexicanas se estima mediante la superposición lineal del conjunto particular de funciones de Green correspondiente al área de ruptura. Para ello se han desarrollado funciones para 189 mosaicos de 30 kilómetros de lado ubicados en la zona de subducción (ver figura 2).

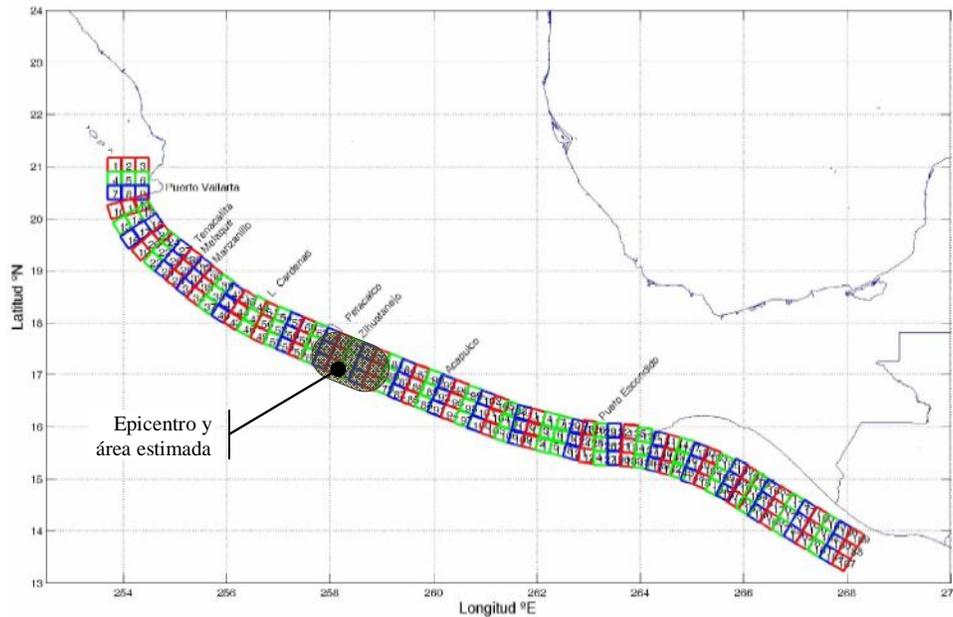


Figura 2 Segmentación de áreas de ruptura en 189 mosaicos de 30x30 km² localizados en la zona de subducción del Pacífico Mexicano

Dado un evento sísmico con condiciones de producir tsunamis y cuyo epicentro se localice en la zona de segmentación de la figura 2, se estiman los mosaicos que modelen correctamente el área de ruptura del sismo para estimar las alturas de ola en varios puntos de la costa. Con información de la topografía detallada se obtienen la altura de inundación en las poblaciones cercanas al mar.

Exposición

Se ingresa mediante una base de datos que contiene la descripción de los bienes expuestos así como su localización y los valores de cada uno de sus componentes. El Sistema permite introducir la información por medio de archivos Shape (*.shp) de puntos, líneas o polígonos, donde cada elemento proporciona información georeferenciada de un inmueble (edificaciones de diferentes usos como vivienda, hospitales, escuelas, entre otros) o infraestructura (carreteras, puentes, tuberías, presas). Adicionalmente se emplean el archivo de bases de datos (*.dbf) asociado al archivo Shape para incluir la información complementaria.

Al cargar la información al Sistema sólo se toman en cuenta los bienes expuestos, es decir, aquellos que se localizan en la costa a una altitud por debajo de los 30 metros.

Vulnerabilidad

Se emplean funciones de vulnerabilidad que fueron desarrolladas para inundación costera de edificaciones (Huerta y otros, 2006) y que fueron ampliadas para considerar todo los tipos de infraestructura considerados; con esta información se evalúa el impacto en términos del costo asociado al daño de las edificaciones e infraestructura. Para estimar la afectación que este fenómeno provoca a la población, se han empleado metodologías similares a la desarrollada en un trabajo de estimación de personas afectadas por huracán (Jaimes y otros, 2011).

PROCESO DE MONITOREO

Para el monitoreo de los sismos que puedan producir tsunamis en la zona de estudio, se emplea información de la página de Internet del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Esta página proporciona datos actualizados de los sismos más recientes a nivel mundial en diferentes formatos y opciones de consulta, para fines de este Sistema se eligió la lista de los sismos de los últimos 7 días con

magnitud mayor a 4.5 consultados en <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/feed/csv/significant/week> (ver figura 3). Esta dirección proporciona su información en archivos CVS que se actualizan cada 5 minutos.

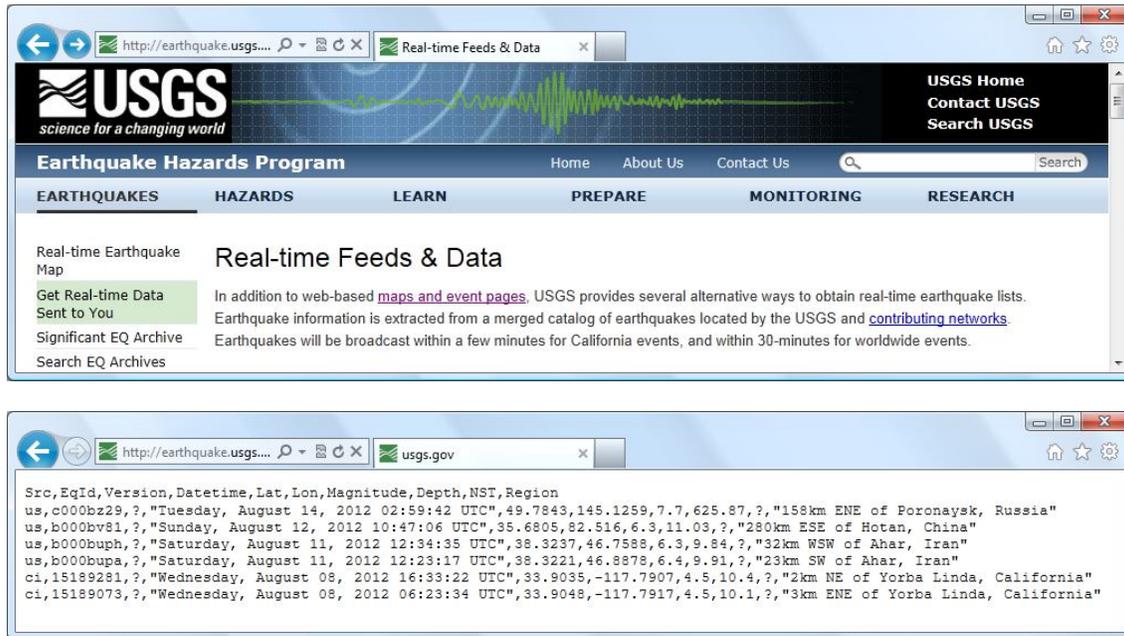


Figura 3 *Página de Internet del USGS con información de los sismos en tiempo real y un ejemplo del formato CVS*

La información de interés es la siguiente:

- a) Datetime: Fecha y hora UTC
- b) Lat y Lon: Localización geográfica
- c) Magnitude: Magnitud
- d) Depth: Profundidad

De manera paralela a este proceso de monitoreo, actualmente se está implementando la opción de realizar consultas a través de la información proporcionada por la Red Sísmica Mexicana. Para tales fines se está coordinando la obtención de la información de interés por medio de la aplicación de cómputo GENMAPS (Alcántara y otros, 2012) que también forma parte de la metodología para la estimación temprana de daños por sismo.

PARTICULARIDADES DEL SISTEMA

La manera como opera este Sistema es muy semejante a un trabajo previo del monitoreo y evaluación de riesgo por huracán en la República Mexicana (Hinojoza y otros, 2011), con la diferencia de que ahora el evento de importancia es un sismo ocurrido en las costas del Pacífico Mexicano con potencial de tsunami.

Para identificar un nuevo evento se realiza la etapa de monitoreo cada cinco minutos comparando la información más reciente con la observada en la revisión anterior. Una vez que se ha determinado la localización y características del nuevo sismo, de acuerdo a los parámetros indicados, el Sistema suspende temporalmente el monitoreo y realiza los siguientes pasos:

1. Genera el archivo de amenaza por tsunami.
2. Estima las consecuencias sobre una base de datos pre-cargada.
3. Obtiene los resultados con todo detalle y ofrece la posibilidad de realizar algunas consultas.
4. Guarda los resultados en una carpeta local para que puedan ser consultados posteriormente.

Al terminar la evaluación y obtención de resultados, el Sistema comienza de nuevo con el proceso de monitoreo en busca de nueva información de sismos.

Cuando el Sistema está en funcionamiento, ya no es necesario que algún usuario permanezca constantemente al pendiente del programa. A partir del momento del inicio, el Sistema es capaz de mantenerse funcionando por sí mismo de tal forma que recibe, descarga y procesa los archivos correspondientes a los eventos de sismo.

Sólo en casos especiales, por ejemplo: falta de suministro de energía eléctrica, o alguna falla técnica de la computadora, será necesaria de nuevo la intervención del usuario, para arrancar nuevamente el Sistema.

Pantalla

El Sistema contiene una sola ventana principal (ver figura 4) que se divide en cinco partes: información del proyecto, zona de monitoreo, área gráfica, información de procesos y zona de resultados.

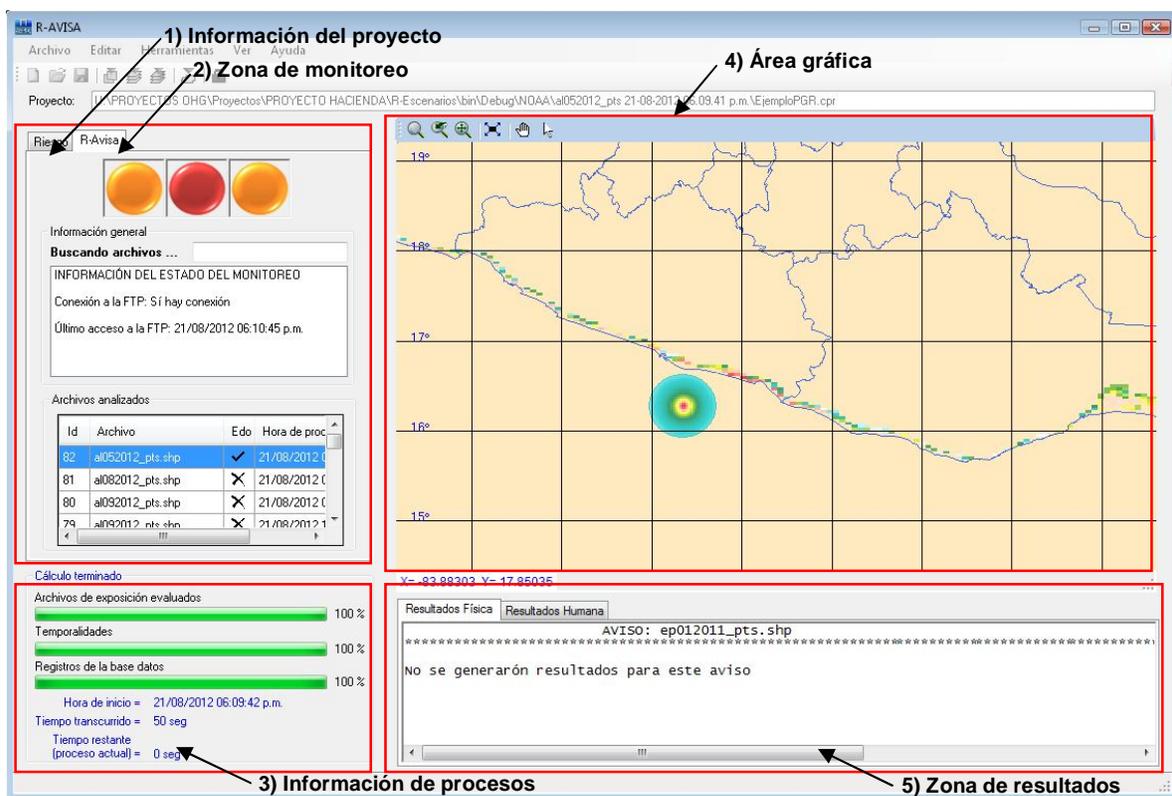


Figura 4 Ventana principal del Sistema

EJEMPLO DE RESULTADOS

Evento

Para mostrar las características de la herramienta hemos simulado la ocurrencia de un sismo crítico cerca de Acapulco (Huerta y Ordaz, 2007), en la zona de Subducción de San Marcos Ometepec con una magnitud de 8.13 y profundidad de 50 kilómetros (ver figura 5). Este evento cumple con las condiciones para producir un tsunami en las costas del Pacífico Mexicano.

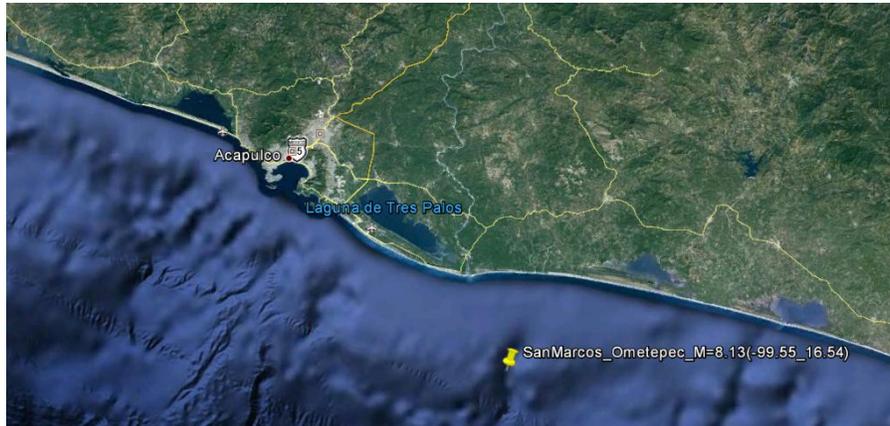


Figura 5 Localización del sismo postulado

Al modelar este evento se obtiene la amenaza con los algoritmos propuestos. Las alturas de ola esperadas que este evento ocasionaría en la costa del estado de Guerrero son de 4.0 metros en la ciudad de Acapulco y de 1.5 metros en Zihuatanejo (ver figura 6). Estos resultados son sin considerar efectos de amplificación local por la morfología de la costa, adicionalmente se han considerando estos efectos de las bahías de manera aproximada, en trabajos futuros se incluirán modelos más detallados para considerar este efecto junto con la velocidad de la onda y establecer el “run-up” de manera formal.

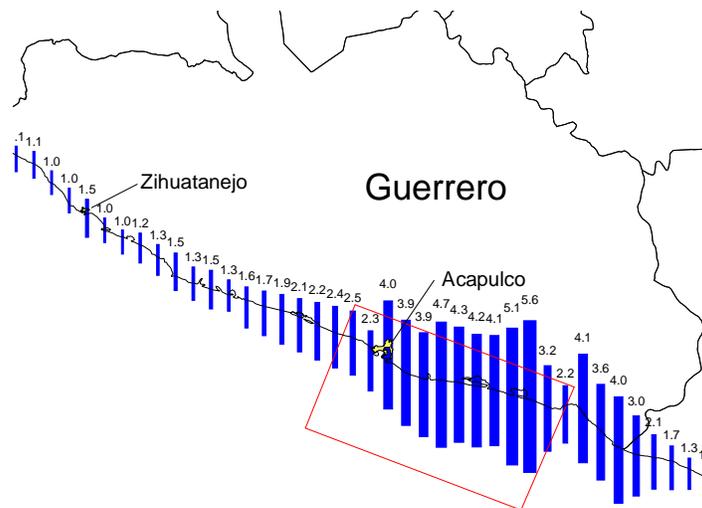


Figura 6 Alturas de ola esperadas en la costa de Guerrero (líneas azules) ocasionadas por el área de ruptura del escenario más desfavorable (rectángulo rojo), un sismo de subducción de 8.2 grados

Resultados

Se obtiene la pérdida esperada total del evento y también para cada inmueble, lo que representa el valor promedio de la pérdida que ocurriría ante ese escenario. Esta información es útil para conocer en tiempo real lo que posiblemente estaría sucediendo ante el impacto de un fenómeno de estas características para así tomar medidas inmediatas respecto al daño estimado en los inmuebles e infraestructura, así como en la población.

Para este ejemplo se ha utilizado información de infraestructura correspondiente a datos representativos de los sectores de vivienda (SEDESOL), salud (SSA), educación (SEP) e infraestructura carretera (SCT) a cargo del gobierno federal. Los resultados por inmueble se escriben en archivos tipo Shape (ver figura 7) los cuales

pueden integrarse en un sistema de información geográfica (SIG) y pueden analizarse para obtener resultados por zona de agrupación, como por ejemplo para cada municipio (ver figura 8).

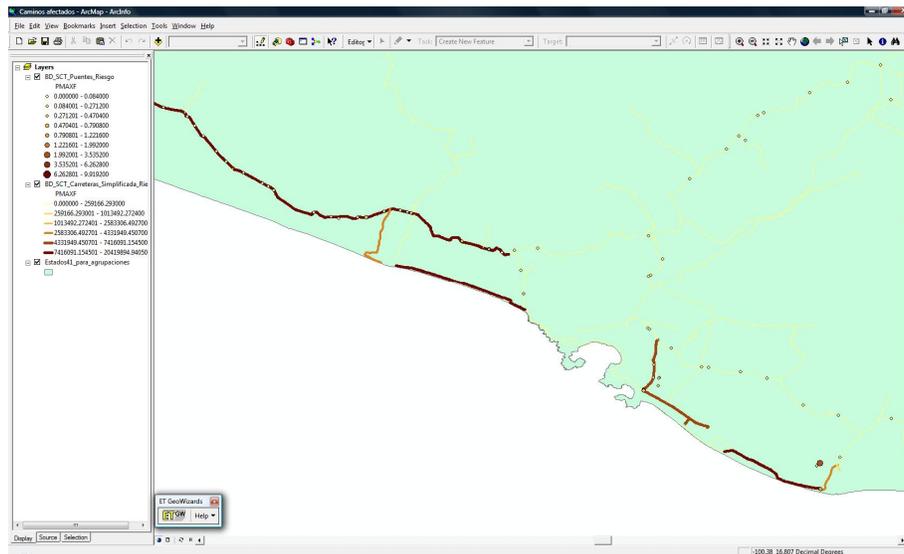


Figura 7 Resultados de pérdida esperada del sismo postulado para carreteras y puentes de SCT visualizado en SIG

Se observa cómo el municipio de Acapulco de Juárez es recurrente en cuanto a las pérdidas con excepción del sector salud, esto puede deberse principalmente a las características de la exposición ya que para la ciudad de Acapulco se tienen pocos centros de salud cercanos a la costa. Es interesante mencionar que el municipio de Manzanillo aparece con pérdidas en los cuatro sectores a pesar de su lejanía al evento propuesto, lo cual podría atribuirse a que la infraestructura en este municipio se encuentra más expuesta que en Acapulco. Estos resultados son particularmente útiles para fines de protección civil, ya que pueden ayudar a crear planes de atención a la emergencia por medio del índice de riesgo que se representa en este estudio como pérdida esperada ante el evento ocurrido.

CONCLUSIONES

Los tsunamis son eventos complejos que consisten en un grupo de olas de gran energía y de tamaño variable que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua.

La predicción de tsunamis sigue siendo poco precisa. Aunque se puede calcular el epicentro de un gran terremoto subacuático y el tiempo que puede tardar en llegar las olas a diferentes puntos, es casi imposible saber si ha habido grandes movimientos verticales del suelo marino. También en ocasiones el terremoto generador puede tener su epicentro muy cerca de la costa, por lo que el lapso entre el sismo y la llegada de la ola será muy reducido. En este caso, las consecuencias son devastadoras, debido a que no se cuenta con tiempo suficiente para evacuar la zona y el terremoto por sí mismo ya ha generado una cierta destrucción y caos previos, lo que hace que resulte muy difícil organizar una evacuación ordenada. Éstos fueron los casos de los maremotos registrados en Sumatra en 2004 y Japón de 2010, ya que aun contando con un sistema adecuado de alerta de tsunamis locales, el tiempo de aviso no es suficiente para escapar del desastre.

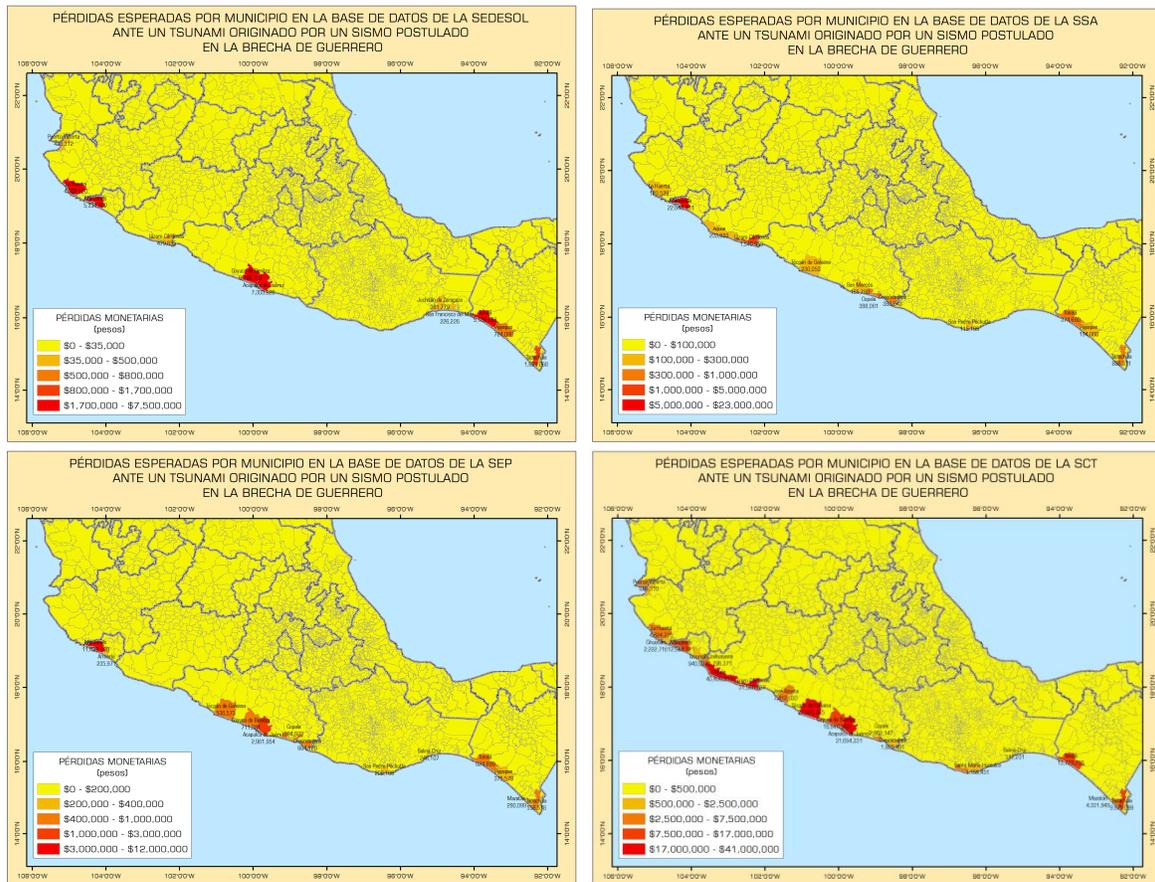


Figura 8 Resultados de pérdidas esperadas por municipio del sismo postulado para los diferentes sectores analizados, SEDESOL, SSA, SEP y SCT

Por ello, las acciones que se tomen inmediatamente después de la emergencia pueden ayudar a reducir los efectos de los daños. Un sistema que proporcione información temprana de los daños como el presentado en este trabajo puede ayudar a diseñar un plan preventivo así como de respuesta a la emergencia.

Este trabajo forma parte de un proyecto de estimación temprana de daños en la infraestructura de México ante los peligros de inundación, huracán (viento, marea y lluvia), sismo y tsunami, por lo que la estimación de los resultados de este Sistema se emplearán de manera conjunta con las estimaciones de sismo.

AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo económico de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público para la realización del proyecto “Integración, análisis y medición de riesgo de sismo, inundación y ciclón tropical en México para establecer los mecanismos financieros eficientes de protección al patrimonio del fideicomiso FONDEN del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS)” que ha permitido la realización de los sistemas de cuantificación de pérdidas, control de recursos y análisis de riesgo para el FONDEN.

REFERENCIAS

Alcántara L., Arroyo D., Delgado M., Ordaz M., Pérez C., Quiroz A., Ruiz A. y Sandoval H. (2012), **“GENMAPS: Herramienta para el cálculo de mapas nacionales de intensidades sísmicas en tiempo real”**, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes.

González R., Ortiz F. y Montoya J.M. (2012), **“Tsunami. Un problema matemáticamente interesante”**, Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones Vol. 19 enero, pag. 107–119.

Hinojoza O., Ordaz M.G., Huerta B., Reinoso E. y Jaimes M.A. (2011), **“Sistema para el monitoreo automático y evaluación de riesgo de huracanes en la República Mexicana”**, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes.

Huerta B., Vega B.E. y Avelar C.E. (2006), **“Caracterización del daño causado a estructuras y contenidos por inundaciones fluviales y costeras”**, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.

Huerta B., Ordaz M.G., Reinoso, E., Avelar C.E., Torres M.A., Zeballos A., Osuna, E., Martínez I. y Hernández J.J. (2007), **“Sistema experto para la evaluación de pérdidas por riesgos hidrometeorológicos en México”**, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.

Huerta B. y Ordaz M.G. (2007), **“Escenarios de tsunami local para la estimación de pérdidas en México”**, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero

Huerta B. y Ordaz, M.G. (2009), **“Modelo paramétrico para la estimación de riesgo por tsunami local en América Central”**, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla.

Jaimes M.A., Reinoso, E., Huerta B., Niño M. y Torres M.A. (2011), **“Estimación de la vulnerabilidad humana en términos del daño estructural debido al impacto de huracanes”**, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes.

Reinoso E., Ordaz M.G., Huerta B., Zeballos A., Avelar C.E. y Hernández J.J. (2006), **“Metodología para el cálculo de pérdidas en edificios y naves industriales ante fenómenos hidrometeorológicos ocurridos en México”**, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.

Reinoso E., Ordaz M.G., Hinojoza O., Huerta B. y Jaimes M.A. (2012), **“Monitoreo automático y evaluación del riesgo de huracanes en México”**, Revista Ingeniería Civil No. 516 abril, CICM.