

IMPLEMENTACIÓN DE NUEVOS MODELOS DE SISMO Y TSUNAMI A UN SISTEMA EXPERTO DE ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE

Benjamín Huerta Garnica⁽¹⁾, Mario Ordaz Schroeder^(1,2), Eduardo Reinoso Angulo^(1,2), Mario Salgado Gálvez⁽³⁾, Juan Rodríguez Pomposo⁽¹⁾, Alejandro Aguado Sandoval⁽¹⁾, Octavio Hinojoza Gabriel⁽¹⁾

¹ ERN-Evaluación de Riesgos Naturales. Vito Alessio Robles No.179, México, D.F, 01050, benjamin_huerta@ern.com.mx

² Instituto de Ingeniería UNAM. Ciudad Universitaria, México, DF, 04510, MOrdazS@ingen.unam.mx

³ CIMNE. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, mario.sal.gal@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo muestra las características de nuevos modelos de sismo y tsunami los cuales han sido desarrollados para implementarse a un sistema que realiza estimaciones de riesgo en bienes asegurados; la característica particular de estos modelos es que homogeniza las metodologías y la información básica obteniendo resultados para todo Latinoamérica y el Caribe, evitando discontinuidades en las fronteras políticas de los países. Estos modelos emplean la información más reciente para la estimación de la amenaza y permite tener compatibilidad de ambos peligros para las evaluaciones simultáneas en toda la región.

ABSTRACT

This work shows the characteristics of new models of earthquake and tsunami, they are developed to implement a system that makes the risk estimates in the insured assets; the characteristic of these models is that the homogenization of methodologies and basic information obtaining results for all Latin America and the Caribbean, avoiding discontinuities in the political borders of the countries. These models use the most recent information for hazard estimation and have the compatibility of both perils for simultaneous assessments across the region.

INTRODUCCIÓN

Para la mayoría de los países de la región de América Latina y el Caribe (ALC), desde hace más de 30 años se han realizado análisis probabilísticos de riesgo sísmico y por tsunami. La mayoría de ellos se desarrollaron con un alcance nacional y la estimación de las intensidades del movimiento del suelo y las alturas de ola muy pocas veces sobrepasa las fronteras políticas de cada país. Aunque se reconoce que estos estudios son de alta calidad, han utilizado enfoques diferentes al momento de su desarrollo y, en la mayoría de los casos, se consideraron para las condiciones locales del comportamiento esperado de las construcciones de cada país.

Estas características ocasionan que existan discontinuidades en las cercanías de las fronteras políticas debido a la falta de integración de las fallas geológicas transnacionales o a otras características de los modelos como el uso de calibraciones locales con información de instrumentos del movimiento del suelo con diferentes características o de datos de altura de ola en el océano. Por ejemplo, la Figura 1 muestra una imagen con las diferencias que pueden observarse en los mapas oficiales de riesgo sísmico de Venezuela (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas), Colombia (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) y de Ecuador (Norma Ecuatoriana de la Construcción), definidos en términos de aceleración máxima del suelo (PGA) de 475 años de período de retorno.

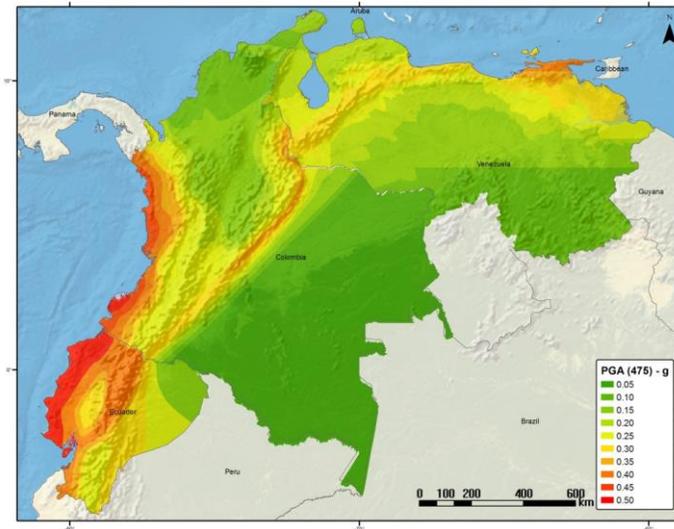
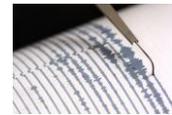


Figura 1 Discontinuidades en las fronteras de los modelos de riesgo sísmico de Venezuela, Colombia y Ecuador

Se observan importantes discontinuidades en las fronteras de los países que evidentemente no son justificables, razón por la cual se deben desarrollar modelos unificados de amenaza que tengan homogeneidad. Este trabajo trata de considerar este punto y aplicarlo a estimaciones probabilistas de pérdida en varios países de la región para los modelos de Sismo y Tsunami.

MODELO DE SISMO

A continuación se presentará de manera resumida el enfoque, la metodología, las fuentes de datos y los resultados utilizados para el desarrollo del primer modelo de riesgo sísmico armonizado y completamente probabilístico para la región de ALC (modelo ASLAC). A pesar de que Tanner y Shedlock (2004) habían desarrollado previamente mapas de riesgo sísmico para la región, el modelo ASLAC emplea una resolución más alta, además de utilizar metodologías completas y de última generación que proporcionan información actualizada para toda la región.

Datos de sismicidad y entorno tectónico

La zonación tectónica y el procesamiento de los datos de sismicidad para la región de análisis son tareas que se desarrollaron en paralelo ya que están evidentemente relacionadas. En primer lugar, se hizo una diferenciación de la actividad de catálogo basada en el entorno tectónico, es decir, interfase, corteza, intraplaca, etc., utilizando los niveles de contorno de las zonas de subducción para Centro y Sudamérica desarrolladas por Hayes et al. (2012) y también considerando la ubicación y profundidad de cada evento en el catálogo. Este proceso permitió la definición de la geometría final de cada fuente sísmica, una vez definida, cada evento se asoció a una fuente sísmica única para estimar los parámetros de sismicidad que aplicarían a la actividad sísmica futura de cada una de las fuentes.

Catálogo

El catálogo elaborado para el modelo ASLAC se basó principalmente en datos de fuentes internacionales (Storchak et al., 2013, USGS-NEIC, 2015), que posteriormente se complementaron y revisaron con información regional y nacional. Se seleccionó una magnitud de umbral, M_0 , igual a 4.0, el primer evento en el catálogo de ASLAC se remonta al 29 de octubre de 1900 y el corte se realizó el 31 de diciembre de 2015. Por lo tanto, el catálogo ASLAC contiene sismicidad histórica e instrumental que representa una oportunidad y un reto en la combinación de subcategorías con diferentes intervalos de completéz para utilizar todos los datos disponibles.

También se utilizaron los estudios de eventos específicos para fines de validación y verificación y con ellos fueron reubicados algunos terremotos históricos incluidos en el catálogo, principalmente en México. Con el fin de tener todos los eventos del catálogo reportados en el mismo tipo de magnitud se realizó la unificación de la misma, para aquellos en magnitudes diferentes a M_w se utilizaron las relaciones globales propuestas por Scordilis (2006) para M_s y m_b .

En la versión final del catálogo ASLAC permanecieron un total de 56,953 eventos, en la Figura 2 se muestra la distribución geográfica y por magnitudes. La mayor magnitud reportada, en M_w , corresponde al evento de 9.6 en Chile asociado al megaterremoto de Valdivia.

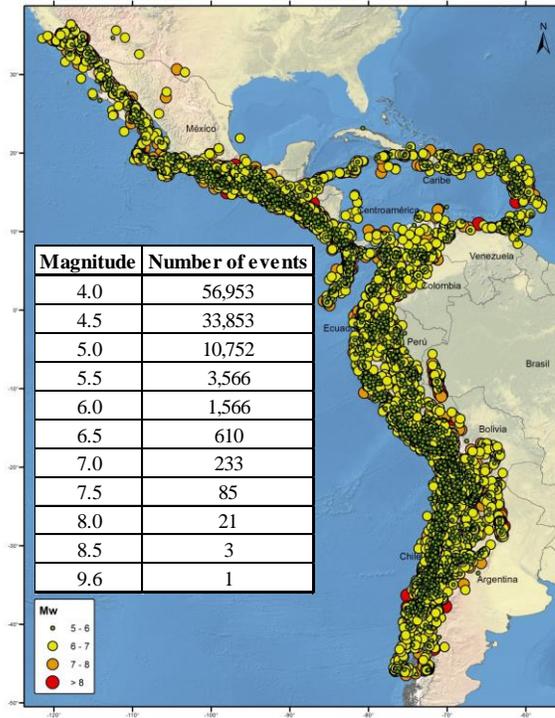


Figura 2 Magnitudes y localización de epicentros del catálogo empleado

Los terremotos del catálogo se clasifican en dos grandes categorías: subducción y corteza. El primero agrupa la interfase, la interplaca y los eventos de falla normal, mientras que el segundo agrupa la intraplaca y la sismicidad superficial.

Fuentes sísmicas

Como ya se mencionó, el proceso de zonificación tectónica del modelo ASLAC requirió de la definición de fuentes detalladas para garantizar su nivel nacional. En todos los casos, el proceso de zonificación se basó únicamente en las características del entorno sismo-tectónico ignorando en todos los casos las fronteras políticas y por tanto teniendo continuidad en el área de estudio. En la Figura 3 se muestran a manera de ejemplo las fuentes sísmicas propuestas.

Se utilizaron dos modelos geométricos diferentes: planos y área, ambos permiten una representación tridimensional de las fuentes con la diferencia de que el segundo caso, el “dip” y “strike” de las áreas de ruptura pueden ser definidas; este segundo modelo se utilizó en zonas septentrionales de la Cordillera de los Andes donde existen fallas con caída casi verticales. Otra característica interesante relacionada con la geometría de las fuentes es la definición de relaciones de aspecto de falla que permite considerar rupturas elípticas. Esto es de importancia en las fuentes de subducción donde se esperan eventos con altas magnitudes y donde las rupturas circulares no representan adecuadamente el fenómeno físico.

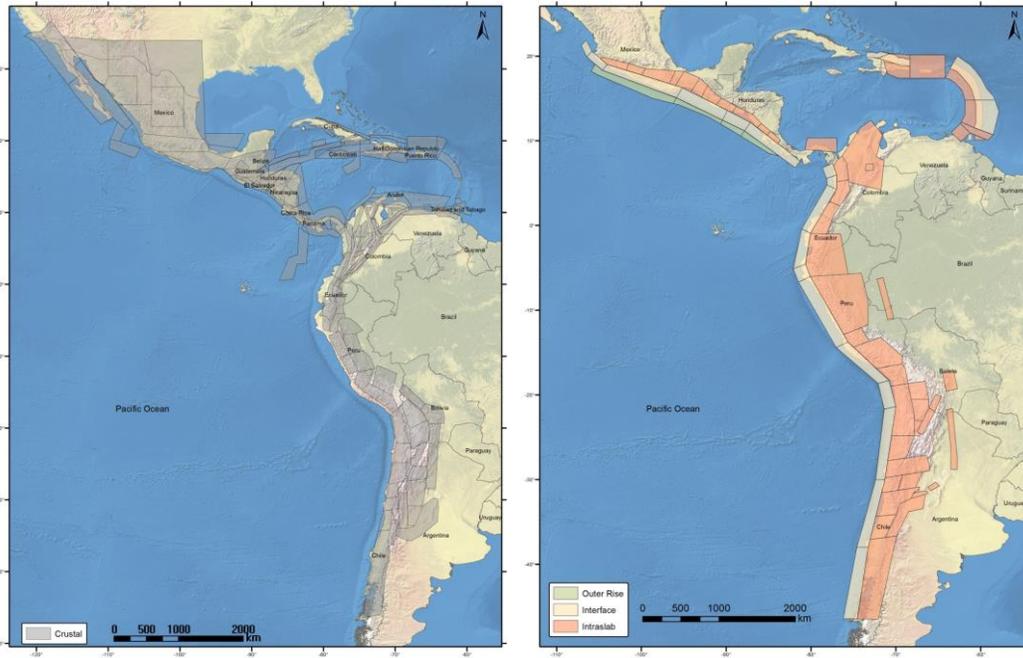
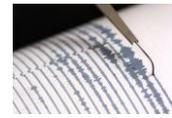


Figura 3 Fuentes sísmicas propuestas a) Izquierda fuentes de Corteza; b) Derecha fuentes de Subducción

Modelos de sismicidad

Para la estimación de la actividad sísmica en cada fuente del modelo ASLAC se usó un proceso de ocurrencia de terremotos de tipo Poisson, dependiendo de los patrones de sismicidad. Se usa el modelo de Gutenberg-Richter (GR) modificado (Cornell y Vanmarke, 1969) o una combinación de éste con el modelo de terremoto característico (Youngs y Coppersmith, 1985).

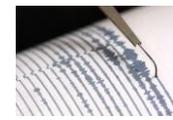
Dependiendo del modelo de sismicidad utilizado en cada fuente, se necesita un conjunto de parámetros para la definición de las relaciones magnitud-recurrencia. Cuando se describe la sismicidad mediante el modelo G-R modificado se utiliza la siguiente relación de recurrencia de magnitud:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{\exp(-\beta M) - \exp(-\beta M_U)}{\exp(-\beta M_0) - \exp(-\beta M_U)} \quad (1)$$

donde λ_0 es la tasa de excedencia de la magnitud umbral, M_0 ; β es un parámetro equivalente al "valor b" para la fuente con excepción de que se da en términos de su logaritmo natural y M_U es la magnitud máxima para la fuente. Los parámetros λ_0 y β (a y b) se calcularon utilizando un enfoque de máxima verosimilitud pero dado que las ventanas de completitud varían en función de M_0 , estas subcategorías se combinaron utilizando la metodología basada en Arboleda y Ordaz (1993).

Para los casos en los que se utilizó el modelo de sismicidad de Youngs y Coppersmith (1985), se utilizó la relación G-R entre M_0 y M_U^{GR} y a partir de ese valor, se empleó el modelo característico, que sigue la siguiente relación de recurrencia de magnitud.

$$\lambda(M) = \lambda_{OCH} \frac{\Phi\left[\frac{M_U - EM}{s}\right] - \Phi\left[\frac{M - EM}{s}\right]}{\Phi\left[\frac{M_U - EM}{s}\right] - \Phi\left[\frac{M_{OCH} - EM}{s}\right]} \quad (2)$$



donde $\Phi [\cdot]$ es la función normal estándar acumulada, M_0 y M_U son las magnitudes mínimas y máximas respectivamente; EM y s son parámetros que definen la distribución de M . EM puede interpretarse como el valor esperado del sismo característico y s como su desviación estándar. λ_{0CH} es la tasa de excedencia de magnitud M_0 . Este modelo fue utilizado para fuentes donde el modelo G-R subestima la ocurrencia del terremoto de grandes magnitudes como las zonas de subducción. En esos casos se combinó con el modelo G-R modificado como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.

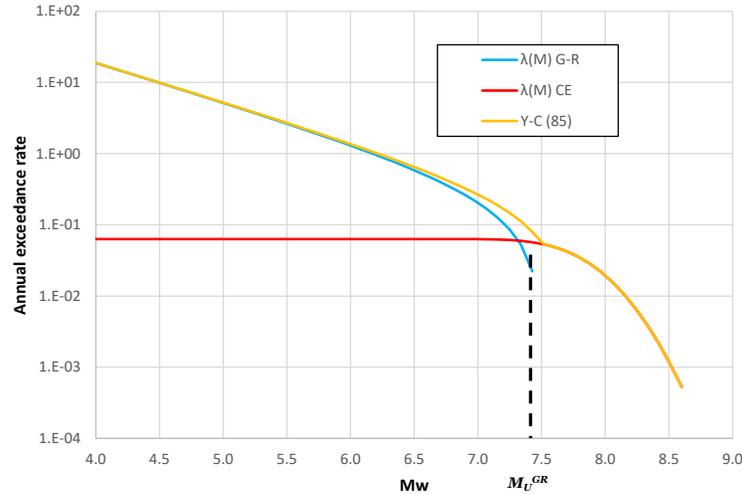


Figura 4 Ejemplo del modelo de sismicidad de Youngs y Coppersmith (1985)

Para todas las fuentes, M_U se definió por medio de estudios geológicos, estudios previos de análisis probabilistas de amenaza sísmica, criterios de expertos y datos históricos.

Relaciones de atenuación

Se utilizaron diferentes relaciones de atenuación (GMPM por sus siglas en inglés) dependiendo del entorno tectónico de cada fuente sísmica, es decir, subducción, corteza; y segundo, la disponibilidad de GMPMs desarrolladas usando datos locales en cada lugar. Como en el caso de la zonificación tectónica, se realizó una primera clasificación en categorías de subducción y corteza. Dado que la salida del modelo se va a utilizar en análisis de riesgo sísmico probabilístico que normalmente se realizan en carteras que tienen activos con características diferentes, sólo se consideraron GMPMs que cubren, por lo menos, el rango espectral de 0.0-5.0s.

Las GMPMs de Zhao et al. (2006) y Chiou y Youngs (2014) fueron asignados inicialmente a las fuentes de subducción y corteza respectivamente y luego, para cada país, estos modelos fueron combinados usando un enfoque GMPM híbrido (compuesto) que produce los mismos resultados que los árboles lógicos (Bommer et al., 2005) con diferencia en la forma en que se manejan las incertidumbres que resultan en discrepancias menores en las varianzas.

Una GMPM híbrida es el resultado de la combinación ponderada de dos o más modelos que tienen diferentes valores medios, desviaciones estándar o ambos. Por lo tanto, la probabilidad condicional de superar una medida de intensidad A se calcula mediante:

$$P(A > a) = \sum_{i=1}^N w_i \left\{ 1 - \Phi \frac{a - \mu_i}{\sigma_i} \right\} \quad (3)$$

donde w_i es el peso asignado a la i -ésima GMPM, Φ es la distribución normal y μ_i y σ_i son los valores medios y de desviación estándar respectivamente de la i -ésima GMPM. La Figura 5 muestra una representación esquemática de la función de probabilidad resultante de una GMPM híbrida generada, usando tres GMPMs denominadas Mod1, Mod2 y Mod3 junto con sus densidades de probabilidad ponderadas.

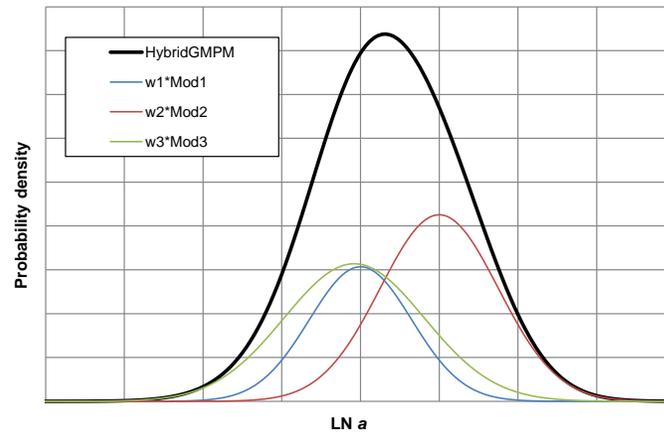


Figura 5 Función de densidad de probabilidad de GMPMs híbridas

Estas GMPMs híbridas son útiles en casos en que las distribuciones normales no encajan bien con los datos de terremotos registrados, es decir, las observaciones muestran que hay probabilidades más altas en los extremos que las proporcionadas por las distribuciones normales.

Resultados

Con la información anterior se pueden desarrollar mapas de riesgo sísmico como los que se muestran en la Figura 6 para PGA de 475 y 2,475 años de período de retorno. Los resultados obtenidos son congruentes con los análisis probabilistas de amenaza sísmica nacionales y regionales, teniendo en cuenta que ya no existen discontinuidades a lo largo de las fronteras políticas y por lo tanto, se ha logrado el objetivo principal para el desarrollo de este modelo.

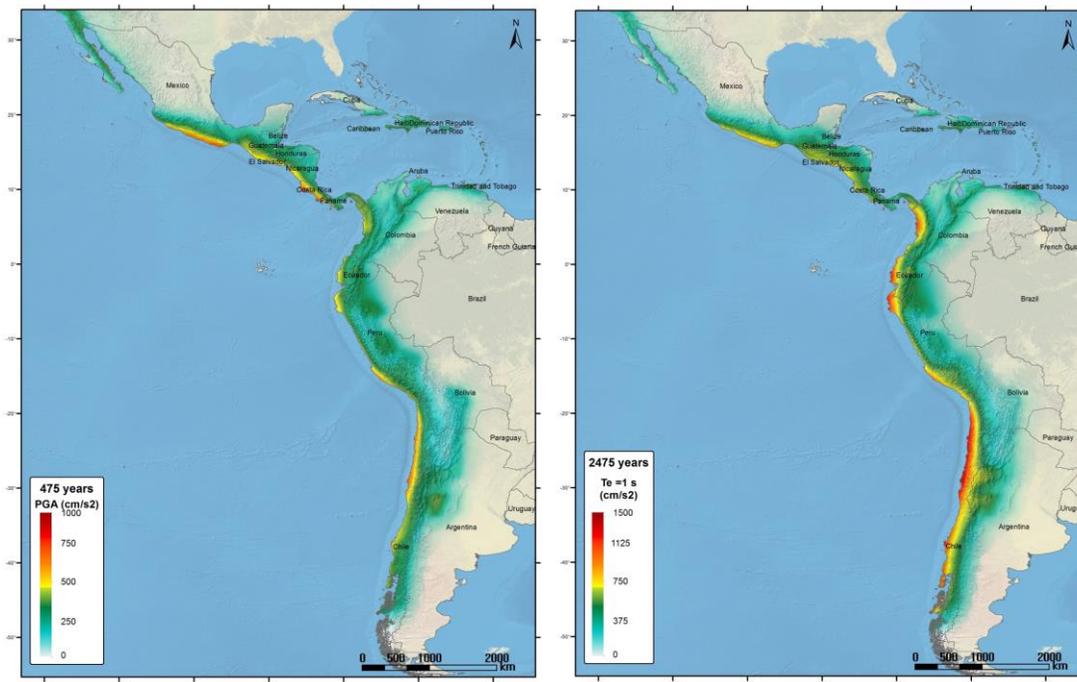
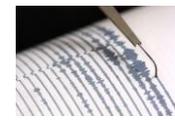


Figura 6 Mapas de amenaza sísmica de PGA para periodos de retorno de 475 y 2475 años



Los resultados finales corresponden a un conjunto de eventos estocásticos en formato * .AME, que es un tipo de archivo conveniente para evaluaciones de riesgo completamente probabilísticas y compatible con varios módulos de evaluación de riesgos. El archivo cuenta con un total de 310,707 eventos incluidos en el conjunto estocástico final. Una vez más, dado que estos eventos están directamente relacionados con cada fuente sísmica modelada y que garantizan la continuidad a lo largo de las fronteras políticas, el conjunto de eventos se considera adecuado para el desarrollo de análisis de riesgo sísmico en carteras ubicadas en diferentes países.

MODELO DE TSUNAMI

En resumen, se comienza definiendo los sismos a estudiar partiendo de los conocimientos ya existentes de la sismicidad de la región y asignando propiedades de geometría, y magnitud de dichos casos. Para cada caso se calcula la deformación vertical que se produce en el suelo oceánico y con esta, se modela la propagación del tsunami y se calcula la altura de ola máxima en costa en una serie de puntos predeterminados sobre la línea de costa. A cada tsunami se le asigna la misma frecuencia anual del evento que lo genera, se calcula la inundación tierra adentro en varios puntos también predefinidos tomando en cuenta la topografía.

Selección de casos

En un principio se buscó realizar corridas partiendo del AME de sismo obtenido como se indicó en la sección anterior. Para simplificar los cálculos se utilizaron solo las fuentes que se encontraban total o parcialmente en mar y que producen sismos de subducción mayores a $M_w=6.9$ grados. Al filtrar sólo los casos que cumplen con los criterios propuestos, resultaron menos de 200 eventos que cumplían con la capacidad de ser tsunamigénicos, los cuales son muy pocos para representar el universo de casos posibles a tomar en cuenta en este trabajo pues en algunas regiones se tiene registros de sismos de 8.5 o más grados pero no se tienen datos de eventos de menor magnitud que, aunque son menos dañinos, deberían ser más frecuentes por lo que pueden implicar un riesgo importante, además estos eventos pequeños pueden provocar distintas alturas de ola si se mueven ligeramente de ubicación aunque estuvieran en la misma fuente o simplemente provocar efectos similares pero en lugares distintos. Es por eso que se propusieron un mayor número de eventos posibles basados en las magnitudes máximas que pueden tener los sismos de cada fuente y en la geometría de la misma buscando cubrir los casos de poca magnitud que puedan tener afectaciones locales importantes.

Fuentes consideradas

Para tomar en cuenta todas las posibilidades se utilizaron todas las fuentes de subducción buscando representar todos los posibles sismos tsunamigénicos. En la Figura 7 se muestran las fuentes modeladas asignando un número a manera de identificador a cada fuente. Obsérvese que la fuente con numeral 27 tiene partes en tierra, parte en continente y parte en mar caribe. De corridas anteriores se ha observado que los sismos cuya área de ruptura se encuentra en su mayor parte en tierra pueden afectar de manera local, pero difícilmente de manera regional. Es de señalar que las fuentes con número 70 al 74 en la región de Magallanes son excluidas debido al poco conocimiento que se tiene de la zona, además dichas zonas corresponden a lugares donde existen muy pocos asentamientos humanos por lo que no representan pérdidas monetarias importantes.

Distribución de casos

Cada fuente ha sido descompuesta en celdas de 30 x 30 km, se asume que cada celda representa el área de ruptura de un sismo posible y está orientada de tal manera que uno de sus lados es paralela a la línea de subducción y otra es perpendicular a la misma, estas celdas sirven para discretizar la fuente. Los eventos con mayores áreas de ruptura se generan al combinar las celdas en áreas más grandes y siempre rectangulares.

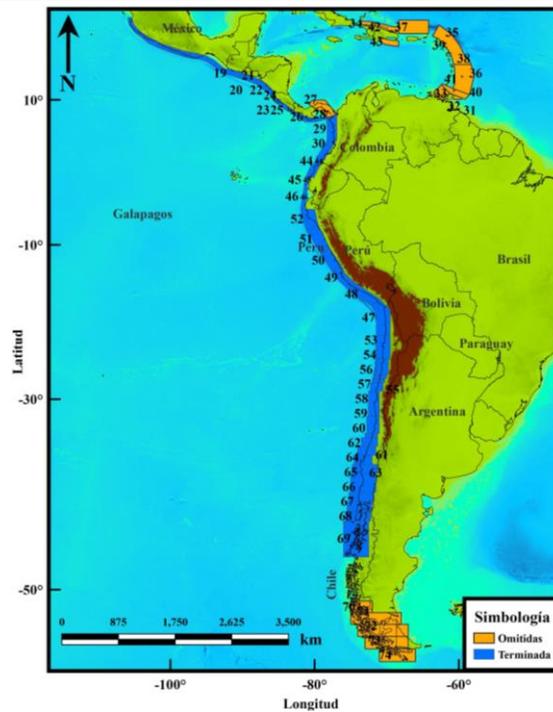


Figura 7 Fuentes tsunamigénicas utilizadas en este estudio

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de la discretización de una fuente, como se observa, las celdas se ajustan lo más posible a la fuente. La mayor parte de las celdas pueden asumirse en una sola dirección en toda la fuente, pero hay fuentes donde la dirección de las celdas se va girando para seguir la geometría. Existen celdas que quedan dentro de tierra por lo que se puede suponer que los sismos en esas celdas no producirán tsunamis al provocar deformación vertical fuera del océano, en general se buscó evitar correr estas celdas si bien existirán sismos más grandes que incluirán celdas en el mar y celdas en tierra o sismos que producirán deformación vertical en un área mucho mayor al área de ruptura.

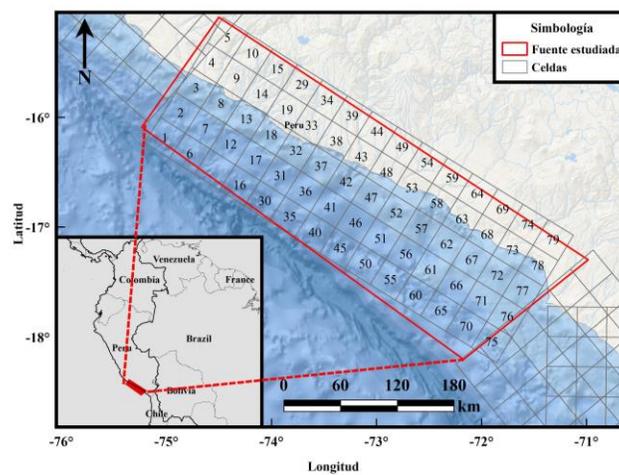


Figura 8 Discretización de fuentes tsunamigénicas en celdas de 30 x 30 Km

La magnitud de cada evento modelado ha sido determinada a partir del modelo de Hanks y Kanamori (1979) que calcula la magnitud con la ecuación 4.

$$A_E = 10^{M_w - 4} \rightarrow M_w = \log_{10} A_E + 4 \quad (4)$$

donde A_E es el área del evento modelado y M_w es la magnitud del evento. Con esta ecuación se determina que cada celda representa un sismo de 6.9 grados. También se generarán sismos más grandes combinando las celdas en rectángulos.

Calculo de desplazamiento vertical

En la modelación de tsunamis de origen sísmico se considera que la deformación cosísmica en dirección de la vertical en el fondo marino es igual a la perturbación inicial en el agua, por ello, el primer paso es obtener la deformación vertical correspondiente a un sismo en el fondo marino.

En este trabajo se utilizó el algoritmo de Okada (1985) el cual es el más extendido para determinar la deformación del suelo marino al asumir un medio isotrópico donde se propagan las ondas y deformaciones.

Asumir que los sismos que ocurren más lejos de la línea de subducción son más profundos, implica que las deformaciones verticales son menores aunque se manifiestan en un área mayor. En los mapas de la Figura 9 se muestra la deformación positiva de dos eventos de la misma magnitud, de geometría igual, pero ubicados en distintos puntos de la fuente. Obsérvese que el caso de la izquierda que se encuentra más cercana a la línea de subducción se calcularon deformaciones verticales positivas de hasta 0.30 m, en tanto en el caso de la derecha se calcularon hasta 0.05 m aunque sobre un área más extensa.

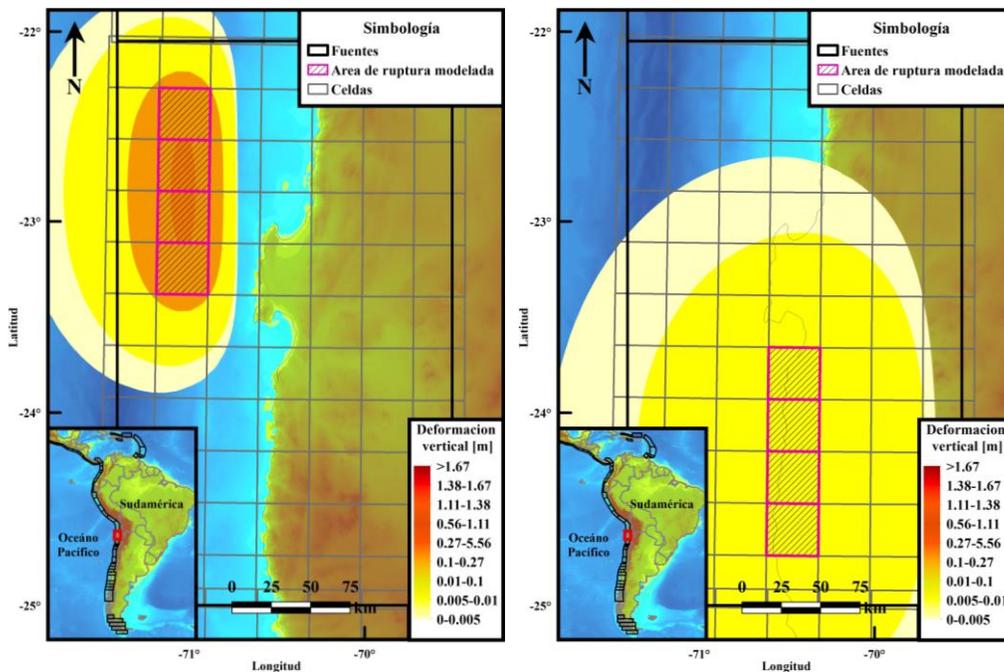
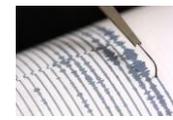


Figura 9 Deformación vertical modelada ante dos eventos de $M_w=7.43$



Propagación

La propagación es la parte del proceso que lleva más tiempo en modelarse y requiere más recursos computacionales. Existen varios modelos de propagación e inundación disponibles, con fines informativos, se enumeran algunos:

- El NOAA Center of Tsunami Research, (NCTR) utiliza el modelo de propagación e inundación MOST (Method of Splitting Tsunami) desarrollado por Titov y Synolakis. MOST es capaz de simular la generación, propagación y run-up
- Geoclaw es un modelo de propagación e inundación de tsunami desarrollado por Randall J. LeVeque, Jan Olav Langseth y Marsha Berger. Es un código de abierto que utiliza Fortran para los cálculos numéricos y Python para la representación gráfica
- Tsunami. Es un modelo desarrollado por “Tsunami Development” con interfaz gráfica y convertidores de formato a ASCII enfocada a la industria petrolera. Utiliza ecuaciones lineales para modelar la propagación y ecuaciones no lineales para aguas someras
- TOAST software totalmente comercial de simulación de Tsunamis como parte del programa de alertamiento temprano OSOP que permite una estimación rápida y verificación de eventos
- Delft3D Desarrollado en Holanda por el instituto independiente Deltares
- Tsunami travel time es un software desarrollado por el Dr. Paul Wessel que modela propagación y permite generar mapas de tiempo de llegada
- Tsunami Tsoftware Inc. Simula la evolución del tsunami en un radar. Este programa es ejecutable en Windows

Todos los modelos requieren datos de la batimetría y topografía del terreno, estos se proporcionan mediante Modelos de Elevación Digital (MED) en formato raster donde se presenta una serie de valores que representan el valor de la elevación en celdas de una malla cuadrada. El tamaño de las celdas es la resolución.

En el presente trabajo se utilizó el modelo Geoclaw, debido a que modela la parte no lineal en todo el dominio, y permite utilizar distintos niveles de resolución con lo cual se puede optimizar el tiempo de computo, además de ser un software libre.

Resolución y puntos de medición

Se realizaron evaluaciones a diferentes niveles de resolución ya que Geoclaw establece sus propias mallas de cálculo a partir de los datos de topografía proporcionados por el usuario. En la Figura 10 de la izquierda se muestran los diferentes niveles empleados los cuales se realizaron hasta 15” (aproximadamente 500 m en el ecuador) para llegar a un estado óptimo entre precisión y tiempo.

Aunque el sistema permite calcular el run-up e inundación. La resolución es insuficiente para obtener resultados válidos de run-up. Por ello es que solo se calculó la altura de ola máxima en costa. Para obtener dicha altura se establecieron puntos de medición donde se obtuvo la altura más alta del punto en cada evento. Los puntos se ubican con el intervalo de la resolución más pequeña disponible como se observa en la Figura 10 (derecha), en el acercamiento que se muestra los puntos de medición en la zona de costa en un gris claro y en negro varios puntos excluidos del análisis. Se consiguió que los puntos más cercanos a la línea de costa sean puntos de medición, algunos puntos se encuentran dentro de tierra porque el punto en mar quedaría demasiado lejos.

Factores de amplificación

Una ola que se propaga en aguas someras incrementará su altura conforme avance en la playa y una parte de la onda sea reflejada hacia mar abierto. Si la ola se encuentra con un cambio abrupto de batimetría simplemente no tiene el espacio suficiente para incrementar su altura disminuyendo su periodo, así que cuando llega a la costa llega con poca altura y la mayor parte de su energía simplemente se refleja hacia el mar abierto, este tipo de perfiles se conocen como reflejantes. Cuando la ola se propaga en una pendiente intermedia una parte de su energía se refleja hacia el océano con un efecto de someramiento. Cuando la ola se propaga en un ambiente con pendiente suave se encuentra en un ambiente disipativo, este ambiente permite que la ola incremente su altura conforme avanza conservando la mayor parte de su energía, esta condición es la ideal para que se presente una amplificación importante.

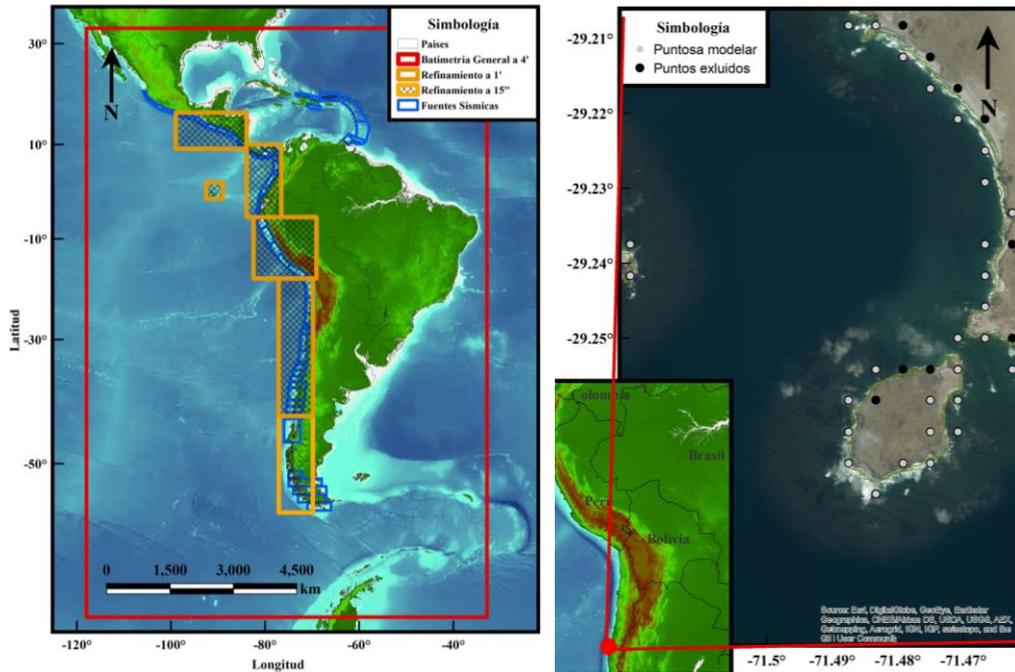
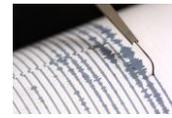


Figura 10 Diferentes niveles de resolución empleados hasta 15" y ejemplo de puntos de medición @ 500 metros

La forma más común de calcular la amplificación es con la ley de Green que permite calcular la altura de ola que se alcanzará en un punto cercano a la costa en base a la altura que alcanza en un punto más lejano utilizando la profundidad de ambos. Originalmente la ley de Green se formuló para bahías con forma de "u" donde mediante cálculos con sistemas lineales se obtiene la altura de ola a la entrada de la bahía y se estima que conforme la ola avanza disminuye la profundidad del medio y se estrecha la bahía, esta ley es válida solo en pendiente suave. En este trabajo se empleó una derivación de la función de Green donde se asume que no hay estrechamiento, y se calcula la amplificación entre el punto de medición y un punto en costa con una profundidad de un metro. Por ello el factor de amplificación solo se tomó en cuenta en los puntos en que se tienen una profundidad mayor a un metro y pendiente menor a 10% con la siguiente expresión.

$$F_A = \sqrt[4]{z} \quad (5)$$

donde z es la profundidad del punto de medición. A los puntos que tienen una pendiente mayor o están en tierra se les asigno un factor de uno.

Consideraciones finales y resultados

Con los puntos anteriores se realizaron evaluaciones para obtener resultados de cada uno de los eventos sísmicos considerados, cabe mencionar que estas evaluaciones son muy tardadas por lo que se han dispuesto de varias computadoras durante varios meses para llevarlas a cabo, por lo que a la fecha no se han concluido los resultados para toda la región.

Uno de los resultados relevantes es la obtención de las alturas de ola en la costa; la Figura 11 muestra comparaciones de altura de ola calculada contra registrada para dos eventos recientes, el sismo de Maule 2010 y el sismo de Coquimbo 2015, en ambos eventos se observa muy buena coincidencia.

El producto final es la obtención de un archivo en formato *.AME, donde de forma similar que para al peligro de sismo se puedan obtener los valores de inundación en cualquier punto de la costa al hacer intervenir la topografía.

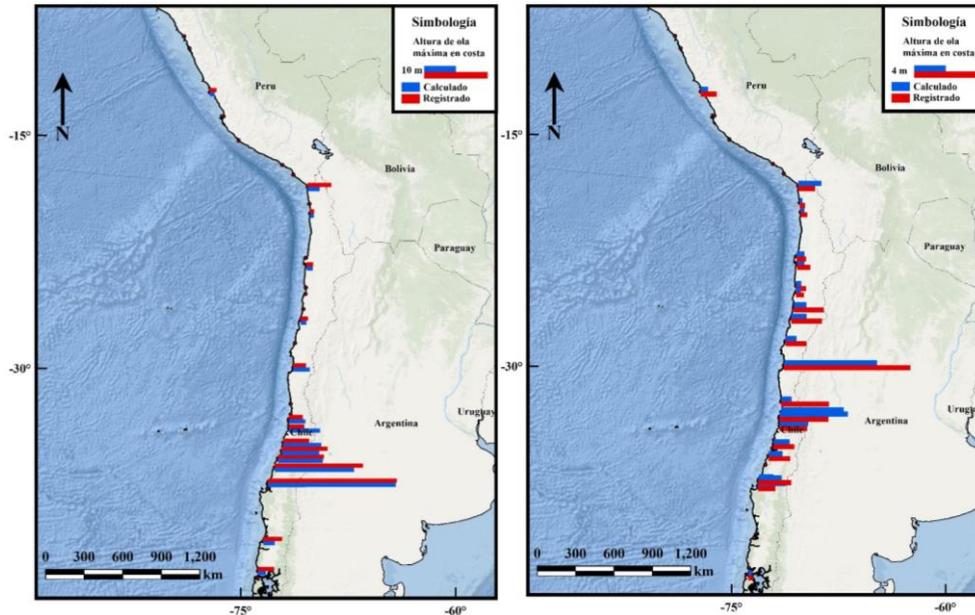


Figura 11 Comparación de resultados calculados y registrados para dos sismos (Maule 2010 y Coquimbo 2015)

IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS A HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE RIESGO

Como se ha mencionado en trabajos previos, se ha avanzado mucho en los sistemas para la estimación de riesgo que emplean plataformas modulares y que permite la implementación de la información de diversas regiones y peligros de forma rápida y muy eficiente (Huerta *et al.*, 2015).

El proceso de implementación de los modelos comentados anteriormente a la plataforma de riesgo consistió básicamente en obtener los archivos necesarios y acoplarlos en la plataforma modular empleando mucha de la información desarrollada para esa región a través de varios años de estudio. A continuación se enumeran algunos puntos relevantes de cada componente del riesgo.

Amenaza: Se usó esta información para crear archivos tipo *.AME (Huerta *et al.*, 2008, Huerta *et al.*, 2013), este archivo permite obtener las intensidades sísmicas y de inundación por tsunami en cualquier punto para un evento de interés. Para la elaboración de los archivos *.AME se utilizó el programa CRISIS (Ordaz *et al.*, 2015) y herramientas desarrolladas para estos fines (Hinojosa *et al.*, 2017). Este formato es necesario para el uso de metodologías de evaluación de riesgos basadas en eventos ya que permite obtener tasas de excedencia de pérdidas y otras métricas de riesgo de interés en la gestión del riesgo de desastres, seguros y reaseguros como la pérdida máxima probable, la prima de riesgo y la pérdida ante eventos específicos.

Efectos de sitio: Se usaron dos tipos de formatos desarrollados de estudios previos, funciones de amplificación de ciudades microzonificadas (Huerta *et al.*, 2011) en donde se contaba con la información suficiente y para el resto de la región el uso del parámetro Vs30 para la obtención de los factores de amplificación (Chiou y Youngs, 2014). En la Figura 12 se muestran las principales ciudades de LAC donde se tienen estudios de microzonificación que se han incluido a este modelo.

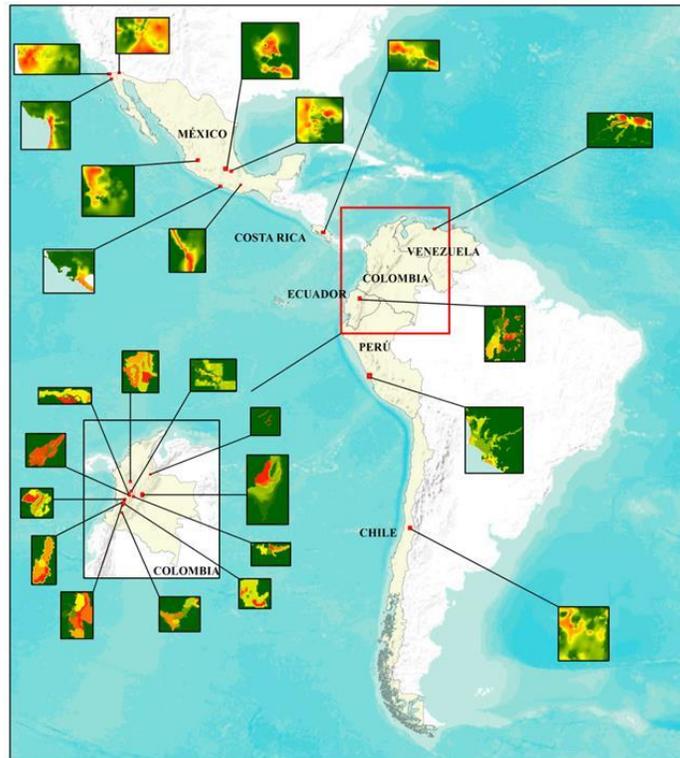
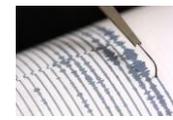


Figura 12 Ciudades de LAC donde se cuenta con estudios de microzonificación

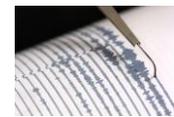
Funciones de Vulnerabilidad: Se emplearon dos tipos de formatos, funciones paramétricas y por puntos, estas funciones son implementadas a la plataforma modular por medio de herramientas internas desarrolladas para estos fines (Hinojoza *et al.*, 2017). Las funciones paramétricas consideran funciones por tipos estructurales que pueden modificarse con el número de pisos, la localización que también toma en cuenta los coeficientes de diseño sísmico en los códigos de construcción y múltiples factores que modifican el riesgo. Las funciones por puntos se definen para un tipo de construcción en particular y son recurrentemente empleadas en infraestructura.

Exposición: La plataforma modular se ha desarrollado en dos versiones, una que exige el uso de bases de datos en archivos Access y otra que permite el uso de archivos Shape. Los primeros son empleados para las compañías de seguros donde son relevantes los datos de las pólizas y otros datos opcionales de los edificios que modifican su vulnerabilidad y los segundos donde es indispensable la localización por medio de coordenadas geográficas y no son indispensables los parámetros financieros de las pólizas. En ambos casos esta información debe ser proporcionada por el usuario.

CONCLUSIONES

Se mostraron las características de la actualización de los modelos de sismo y tsunami en LAC que han sido implementados a modelos de estimación de pérdidas con la finalidad de que las compañías de seguros de esos países puedan contar con información técnica para el análisis y la transferencia del riesgo a mercados internacionales aunque se reconocen también sus aplicaciones en las áreas de protección civil.

Esta actualización permitirá realizar evaluaciones de bienes localizados en varios países de LAC sin que se deban emplear modelos independientes por país y también cuenta con la posibilidad de evaluar ambos peligros de forma simultánea.



Estos nuevos modelos formarán parte del sistema empleado por los organismos reguladores de diferentes países, entre ellos, México, Perú y Colombia, para el cálculo de las reservas que una compañía debe contemplar ante los eventos catastróficos. Además de contemplar su aplicación para las coberturas de aseguramiento del CCRIF (Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility) que funciona como un seguro colectivo para que los países de Centroamérica y el Caribe accedan a protección financiera ante escenarios catastróficos.

Ya que la plataforma permite la evaluación de eventos históricos o postulados, aportan un punto importante en la calibración detallada con los daños observados de cada país y dan las bases para herramientas de monitoreo de amenazas y de estimación temprana de daños en estas regiones.

El proyecto aún no está concluido ya que se tiene pendiente la implementación del modelo de tsunami y la revisión completa de sismo para todos los países de LAC para este año.

REFERENCIAS

Arboleda J. y Ordaz M. (1993). “Un mejor uso de los datos estadísticos para estimación de la sismicidad local”. *X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Puerto Vallarta, Mexico.

Bommer J.J., Scherbaum F., Bungum H., Cotton F., Sabetta F. And Abrahamson N.A. (2005). “On the use of logic trees for ground-motion prediction equations in seismic-hazard analysis”. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **95(2)**:377-389.

Chiou B. y Youngs R. (2014). “Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra”. *Earthquake Spectra*: **Vol. 30, No. 3**, pp. 1117-1153.

Cornell C.A. y Vanmarke E.H. (1969). “The major influences on seismic risk”. *Proceedings of the 3rd World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago, Chile.

ERN, Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina. (2009), “Evaluación Probabilística de Riesgos para América Central”, Banco Mundial, ONU/EIRD, CEPREDENAC.

Hanks, T.C. y Kanamori, H. (1979) “A Moment Magnitude Scale”. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 2348-2350

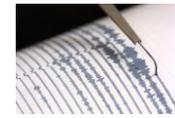
Hayes G.P., Wald D.J. y Johnson R.L. (2012). “Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries”. *Journal of geophysical research*. 113, B01302.

Hinojoza O., Ordaz, M.G. y Huerta B. (2017) “Herramientas para la implementación y revisión de modelos de estimación de pérdidas”. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Guadalajara, Jalisco (en estas memorias).

Huerta B., Ordaz, M.G. y Avelar C.E. (2008). “Sistema para la evaluación de riesgos naturales en América Central”. *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Veracruz, Veracruz.

Huerta B., Ordaz, M.G. y Reinoso, E. (2011), “Propuesta de formato estándar para estudios de microzonificación sísmica y la experiencia de su aplicación en sistemas computacionales”, *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Aguascalientes, Aguascalientes.

Huerta B., Ordaz, M.G. Hinojoza, O., Reinoso, E. y Jaimes, M.A. (2013). “Sistema experto para la evaluación de riesgos naturales en la infraestructura en México”. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Boca del Río, Veracruz.



Huerta B., Ordaz, M.G., Bazzurro P., Faga E., Hinojoza, O. y Algalán, H. (2015). “Sistema experto para la evaluación de riesgo sísmico en bienes asegurados de los países de Europa”. *XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, Guerrero.

Okada, Y. [1985]. “Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space”. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **Vol. 75**, pp. 1135-1154

Ordaz, M.G., Miranda E., Reinoso E. y Mendoza C. (1999). “Sistema experto para la evaluación de pérdidas por sismo en México”, *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Morelia-México, **13(5)**, pp 982-991.

Ordaz, M.G. (2000), “Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros para terremoto”, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.

Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C. y D’Amico, V. (2015), “Crisis 2015: Programa para el cálculo de peligro sísmico”, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Reinoso E., Ordaz M.G., Jaimes M.A., Niño M. y Huerta B. (2012). “Modelos de ingeniería para estimación de pérdidas por fenómenos naturales”. *Revista Thrive*, **volúmen 1 número 2**.

Scordilis E.M. (2006). “Empirical global Relations converting Ms and mb to moment magnitude”. *Journal of seismology*. **10**:225-236.

Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I., Engdahl E.R., Harris J., Lee W.H.K., Villaseñor A. y Bormann P. (2013). “Public release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)”.

Tanner J.G. y Shedlock K.M. (2004). “Seismic hazard maps of Mexico, the Caribbean and Central and South America”. *Revista Tectonophysics*. **390(1-4)**:159-175.

USGS-NEIC (2015). “Earthquake catalogue search. Earthquakes archives; earthquake hazards program”. *United States Geological Survey*.

UNAM, Instituto de Ingeniería (2012), “Actualización del modelo y programa de cómputo para el cálculo de primas y PML de terremoto”, CNSF.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H.K., Somerville, P.G. and Fukushima, Y. (2006). “Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96(3)**:898-913.