

ESCENARIO DE SISMO Y TSUNAMI EN EL BORDE OCCIDENTAL DE LA REGIÓN CENTRAL DEL PERÚ

Hernando Tavera

Dr. Manuel Pulgar Vidal
Ministro del Ambiente

Dr. Ronald Woodman
Presidente Ejecutivo IGP

Dr. José Macharé
Director Técnico IGP

Dr. Hernando Tavera
Investigador Científico Principal
Director del Área de Investigación en Sismología

Autor:

Dr. Hernando Tavera

Email: hernando.tavera@igp.gob.pe

Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
IV Etapa - Ate
Teléfono: (511) 3172300

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2014-09000
ISBN: 978-612-45795-8-5



Está prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin la autorización expresa del autor

RESÚMEN

En el presente informe se analiza la información publicada sobre la ocurrencia de grandes sismos en el Perú, con el propósito de consolidar el posible escenario sísmico y de tsunami que pueda presentarse en el borde occidental de la región central del Perú y que afectaría a la ciudad de Lima Metropolitana y a la provincia Constitucional del Callao.

Se considera como fuentes primarias los trabajos de investigación realizados por Tavera y Bernal (2005) "Distribución espacial de área de ruptura y lagunas sísmicas en el Borde Occidental de Perú"; Chlieh et al. (2011) "Interseismic coupling and seismic potential along the central Andes subduction zone"; Pulido et al. (2011) "Estimation of slip scenarios for megathrust earthquakes: a case study of Peru"; PNUD (2011) "Proyecto SIRAD", Pulido et al. (2012) "Mega-earthquake rupture scenarios and strong motion simulations for Lima, Peru"; Condori y Tavera (2012), "Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú, a partir de la variación del parámetro b "; Guardia y Tavera (2012) "Inferencias de la superficie de acoplamiento sísmico interplaca en el borde occidental del Perú", y Flores y Tavera (2012) "Aplicación del algoritmo M8 en el borde occidental del Perú: Incrementos de probabilidad para la ocurrencia de grandes Terremotos".

Los resultados sugieren la existencia de dos zonas de máximo acoplamiento sísmico entre placas que darían origen, frente a la zona costera de la región central del Perú, a un sismo con magnitud del orden de 8,8Mw. De presentarse este sismo, la obtención de registros teóricos de aceleración sugiere que Lima Metropolitana y El Callao soportarían niveles de sacudimiento del suelo mayores a 500 cm/s^2 .

Las simulaciones numéricas realizadas para proponer escenarios de tsunamis producidos por sismos de magnitudes 8,5 y 9,0 Mw en las zonas costeras de Lima Metropolitana y El Callao, muestran que los distritos y/o zonas de alta vulnerabilidad son Ventanilla, El Callao, La Punta, Chorrillos y Lurín. En ambos escenarios, la zona portuaria del Callao y el distrito de La Punta serían afectados en mayor magnitud.

Mw = Magnitud Momento, escala moderna de magnitud basada en el parámetros físico Momento Sísmico.

SIRAD = Sistema de Información sobre Recursos para la atención de Desastres.

PNUD = Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

ÍNDICE

RESÚMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- ESCENARIOS SÍSMICOS

2.1.- Lagunas sísmicas

2.2.- Identificación de asperezas: Valores de "b"

2.3.- Superficies de acoplamiento sísmico

2.4.- Acoplamiento sísmico y escenario de sismo

2.5.- Aceleraciones teóricas máximas

2.6.- Notas del autor

3.- ESCENARIO DE TSUNAMI

3.1.- Proyecto SIRAD

3.2.- Inundación en El Callao y La Punta

3.3.- Inundación por el río Rímac

3.4.- Notas del autor

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1. - INTRODUCCIÓN

En el borde occidental del Perú se desarrolla el proceso de convergencia de la placa de Nazca (oceánica) por debajo de la placa Sudamericana (continental) con velocidades promedio del orden de 7-8 centímetros por año (DeMets et al, 1980; Norabuena et al, 1999), siendo el responsable de la actual geodinámica y geomorfología de todo el territorio peruano. Este proceso genera sismos de diversas magnitudes y focos, ubicados a diferentes profundidades, todos asociados a la fricción de ambas placas (oceánica y continental), a la deformación cortical a niveles superficiales y a la deformación interna de la placa oceánica por debajo de la cordillera (Figura 1).

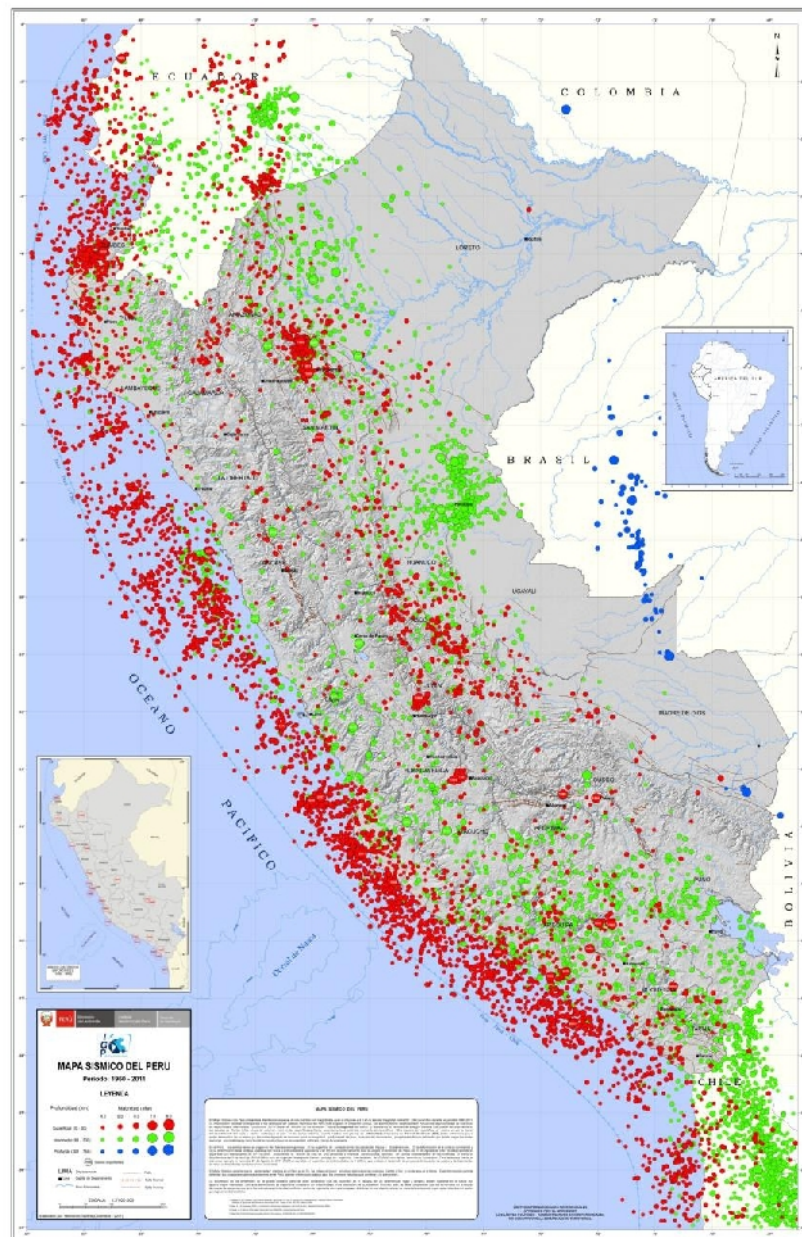


Figura 1: Mapa Sismico del Perú para el periodo 1964 - 2011. La magnitud de los sismos es diferenciado por el tamaño de los círculos y la profundidad de sus focos por el color de los mismos. Los círculos con número inscrito en su interior indican la ubicación y año de ocurrencia de los grandes sismos.

En el Perú, la ocurrencia de sismos es continua en el tiempo y cada año el Instituto Geofísico del Perú reporta en promedio entre 150 a 200 sismos percibidos por la población con intensidades mínimas de II-III (MM) y magnitudes $ML \geq 4,0$. La distribución espacial de esta sismicidad ha permitido definir la existencia de tres principales fuentes sismogénicas (Figura 2):

- *La primera y más importante fuente, la constituye la superficie de fricción entre placas presente en el borde occidental del Perú (entre la fosa y la línea de costa). Esta fuente ha dado origen, en el pasado, a los más importantes sismos, en cuanto a su magnitud, intensidad y niveles de destrucción en superficie. Muchos de estos eventos fueron acompañados de tsunamis que incrementaron el daño, principalmente en zonas costeras.*
- *En este contexto, los sismos con magnitud mayor a 7,0 Mw, son menos frecuentes y cuando ocurren producen importantes niveles de sacudimiento del suelo en áreas costeras relativamente grandes, tal como sucedió en la región sur de Perú el 23 de junio de 2001 (8,2 Mw) y Pisco, el 15 de agosto de 2007 (8,0 Mw). Por lo tanto, es de interés de la sismología conocer los periodos de retorno de estos eventos o en el mejor de los casos, conocer la ubicación espacial de las áreas que se encuentran en actual estado de acumulación de deformación y energía, ya que ellas serían las causantes de un nuevo sismo en el futuro.*

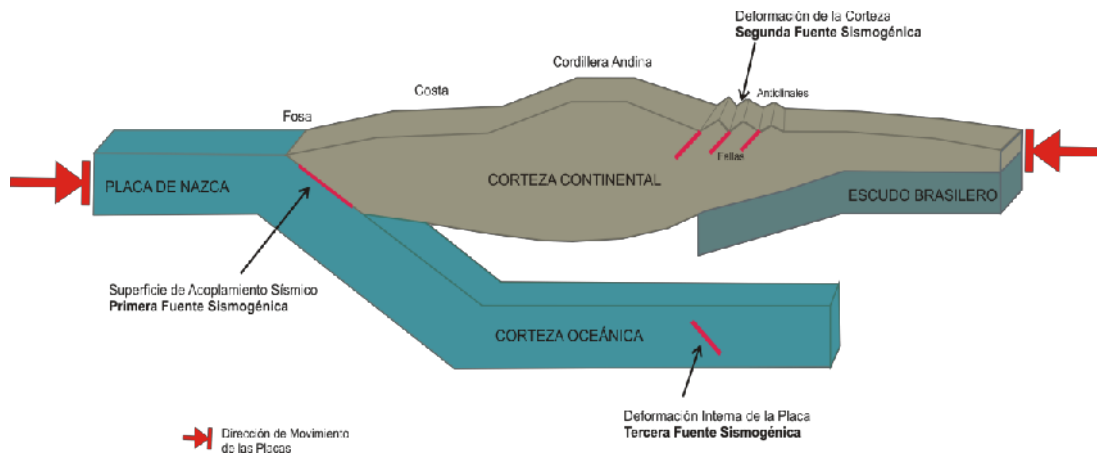


Figura 2: Esquema que muestra la geometría de la subducción y la ubicación de las principales fuentes sismogénicas en el Perú.

ML = Magnitud Local, más conocida como "magnitud de Richter", usada para magnitudes inferiores a 6,4.
MM = Escala de intensidades de Mercalli Modificada.

- *La segunda fuente, considera la deformación superficial de la corteza continental con la presencia de fallas geológicas de diversas geometrías y dimensiones. Esta fuente ha dado origen, en el pasado, a sismos con magnitudes de hasta 6,5 Mw, produciendo daños en áreas reducidas pero con importantes niveles de sacudimiento del suelo. Ejemplos de estos sismos son los ocurridos en 1991 (6,5 Mw) en la región del Alto Mayo (San Martín) y en el año 1969 (6,6 Mw) en la zona del Huaytapallana (Huancayo).*
- *La tercera fuente, corresponde a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo de la cordillera de los Andes a niveles de profundidad del orden de 100 km a más. Esta fuente ha dado origen a sismos con magnitudes hasta de 7,0 Mw y en general, han producido en superficie niveles de sacudimiento que han dado origen a procesos de licuación de suelos en los valles de las zonas andinas y subandinas. Un ejemplo de estos sismos es el ocurrido en el año 2005 (7,0 Mw) en Yurimaguas (Loreto).*

Los estudios orientados a conocer la periodicidad de los sismos de gran magnitud en el mundo y sobre todo en América del Sur no son muchos, debido principalmente a la poca disponibilidad de información, o en todo caso a la no ocurrencia de un gran número de sismos de elevada magnitud, cuya información pueda ser utilizada para dichos estudios. Desde los años 70, la sismología ha propuesto la existencia de métodos de predicción a corto, mediano y largo plazo, siendo este último el que ha encontrado mayor sustento técnico-científico. Entre los métodos a corto y mediano plazo se pueden indicar aquellos que hacen uso de la recolección de datos geofísicos como: la variación del campo eléctrico, variación del campo magnético, variación del campo gravimétrico, variación de la temperatura del agua, presencia o no de eventos precursoros, patrones de sismicidad, contenido de radón, entre otros. Con la aplicación de estos métodos se ha logrado predecir algunos sismos asociados a la reactivación de fallas geológicas (Ejemplo, sismo de Haicheng en China, 1975).

Los métodos a largo plazo son los más confiables y han logrado exitosa aplicación en regiones de convergencia de placas o zonas de subducción (México, Japón, Sumatra, Chile). El método pretende identificar la ubicación geográfica de áreas en las cuales se tiene ausencia de sismos de gran magnitud en las últimas décadas o siglos, siendo comúnmente conocidas como "Lagunas Sísmicas". Para este objetivo, frecuentemente se realiza el análisis espacio-tiempo de la sismicidad en una determinada región o se aplican técnicas estadísticas; en ambos casos, se hace uso de catálogos sísmicos actualizados. El resultado final permite conocer la ubicación geográfica de las lagunas sísmicas y/o asperezas que tienen la mayor probabilidad de dar origen a sismos de gran magnitud en el futuro.

Sismo de Haicheng = Primer sismo que la ciencia ha logrado predecir. Sismo de magnitud 7.3 Mw. En la ciudad murieron 2,000 personas. Pero de no haberse decretado la evacuación de la población, la cifra habría superado las 100 mil víctimas.

Recientemente, la disponibilidad de datos de GPS (Global Positioning System) provenientes de estaciones de monitoreo instaladas en zonas costeras, han permitido recolectar información sobre la dinámica de las placas tectónicas y con ella, conocer y/o identificar las zonas donde no existen movimientos o desplazamientos de las placas, lo cual indicaría que son zonas donde se estaría acumulando energía o deformación que sería liberada con la ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Esta técnica ha sido aplicada en Sumatra, Japón y Chile, logrando en todos los casos identificar, previos a la ocurrencia de los sismos, la ubicación geográfica de las asperezas o de las "zonas de acoplamiento máximo". Recientemente, esta técnica ha sido aplicada al borde occidental del Perú y Chile.

En todos los casos, por la historia sísmica y por el tamaño de los posibles sismos a ocurrir, ellos darían origen a tsunamis que afectarían localmente a las zonas costeras de Perú.

2. - ESCENARIOS SÍSMICOS

2.1. - Lagunas sísmicas

El concepto de laguna sísmica considera aquellas zonas que en el pasado han experimentado la ocurrencia de grandes sismos y que a la fecha, después de haber transcurrido varias décadas o siglos, estos aún no se repiten, situación temporal que incrementa su probabilidad de ocurrencia. Para el caso del borde occidental del Perú, existen estudios iniciales propuestos por Kelleher (1972), Kelleher y McCann (1976), McCann et al. (1979), Nishenko (1985), Kagan y Jacson (1991) utilizando la información histórica contenida en Silgado (1978) y recientemente, Dorbath et al. (1990). Posteriormente, Tavera y Bernal (2005) recopilan y actualizan la información sobre las áreas de ruptura asociadas a la ocurrencia de grandes sismos en el borde occidental de Perú y Chile. Los resultados de este trabajo actualizados a la fecha, se presentan en la Figura 3 y de ella, se extrae las siguientes interpretaciones:

- *Durante el Siglo XIX, la distribución espacial de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde occidental de Perú-Chile (áreas de color rojo), muestra la existencia de algunas zonas en las cuales no habrían ocurrido sismos, por ejemplo las zonas sur y centro de Chile, zonas centro y norte de Perú. Estas zonas son identificadas como "lagunas sísmicas".*
- *Durante el Siglo XX, en la región sur de Chile, la laguna sísmica de mayor tamaño dio origen al gran sismo de 1960 (9,5 Mw). Luego ocurrieron otros sismos con menores áreas, desde la zona costera de la ciudad de Concepción hasta Antofagasta (Chile), para luego mostrar un notable vacío o laguna sísmica que se extiende hasta la región sur de Perú. Esta laguna sísmica corresponde a los sismos de 1868 y 1877, ambos con magnitudes mayores a 8,5 Mw. Al norte de la zona costera del departamento de Arequipa se tienen áreas pequeñas de ruptura distribuidas hasta la zona costera del departamento de Ancash, para luego presentarse una nueva laguna sísmica que viene del siglo pasado y que considera, además, la zona costera de Ecuador.*
- *Durante el Siglo XXI, ocurrieron los sismos de Arequipa del 2001 (8,2 Mw), Pisco del 2007 (8,0 Mw), Chile del 2010 (8,8 Mw) y Chile del 2014 (8,0 Mw). De todos ellos, solo el ocurrido en el año 2010 es considerado como repetitivo del sismo del año 1835, el resto solo habrían liberado parcialmente la energía acumulada en cada región desde la fecha de ocurrencia del último gran sismo.*

De acuerdo a la distribución espacial de las áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde occidental del Perú, para la región centro se ha identificado la presencia de una laguna sísmica que viene acumulando energía desde el año 1746 (268 años a la

fecha). Los sismos ocurridos en los años 1940, 1966, 1970 y 1974 presentaron magnitudes igual o menores a 8,0 Mw (terremoto de Pisco, 2007); por lo tanto, no habrían liberado el total de la energía aún acumulada en dicha región.

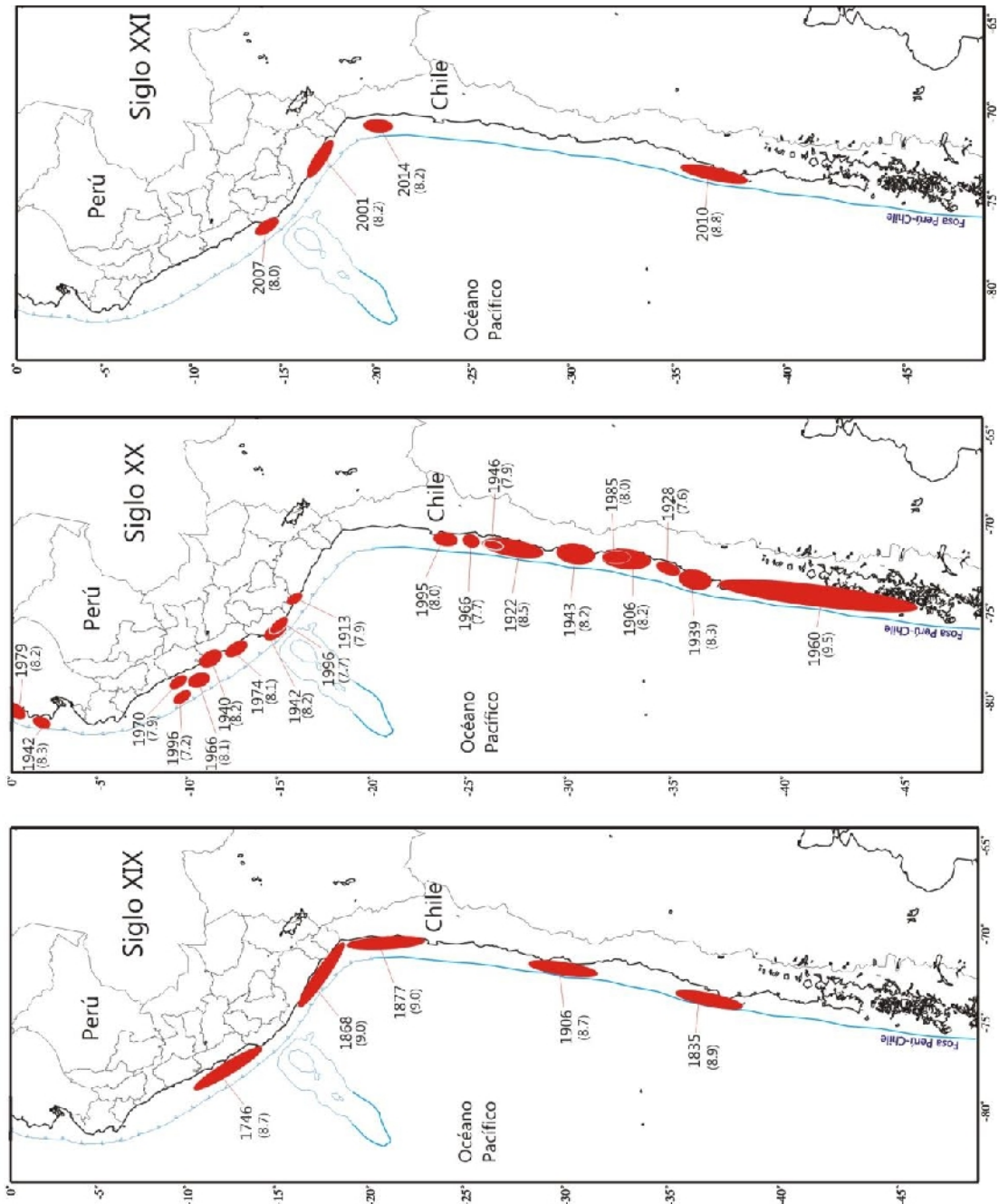


Figura 3: Bordo occidental de Perú y Chile, y distribución de áreas de ruptura y lagunas sísmicas durante los siglos XIX, XX y XXI. La magnitud de los sismos está expresada en la escala de magnitud momento (Mw). (Tavera y Bernal, 2005).

En la región sur del Perú, la laguna sísmica viene del año 1868 (146 años a la fecha) y según la información histórica, éste habría sido el sismo de mayor magnitud que afectó esta región y aún no se repite. El sismo del 2001 (8,2 Mw) habría liberado parte de la energía acumulada en esta región (~60%).

Para la región norte de Chile, la laguna sísmica está presente desde el año 1877 (137 años a la fecha), siendo el único evento sísmico histórico identificado para esta región. El reciente sismo del 1 de abril del 2014 (8,0 Mw) habría liberado parte de la energía que se venía acumulando en la región.

2.2.- Identificación de asperezas: Valores de "b"

Debe entenderse que la superficie de contacto entre dos placas no se encuentra en un estado uniforme de distribución de esfuerzos y energía acumulada, sino que existe una continua liberación de los mismos en forma de sismos sobre algunas partes de dicha superficie dejando otras con mayor acumulación de energía llamadas asperezas. El siguiente sismo debe originarse en esta aspereza o zona de mayor acumulación de energía. A raíz de estas observaciones, Wiemer y Wyss (1997) desarrollaron una metodología netamente estadística para identificar la presencia y ubicación geográfica de dichas asperezas haciendo uso de la información contenida en los catálogos sísmicos.

El método consiste en resolver la ecuación de frecuencia sísmica propuesta por Richter (1954): $\log N = a - b.M$ (donde, N es el número de sismos y M , la magnitud); es decir, conocer el número de sismos para un determinado rango de magnitud que ocurren en una región durante un periodo de tiempo previamente establecido (Ishimoto e Iida, 1939; Gutenberg y Richter, 1944). El parámetro crítico de esta relación viene a ser el valor de "b" que define la pendiente de la recta para la distribución frecuencia-magnitud de los sismos, y que a la vez permite conocer los niveles de esfuerzos acumulados y liberados en una región. Para tal objetivo, Wiemer y Zuñiga (1994) propusieron el programa ZMAP (A software package to analyze seismicity) para calcular los valores de "a" y "b" para áreas pequeñas como parte de otra mayor que fue previamente discretizada en una malla. El espaciamiento de los nodos de la malla dependerá de la densidad de los datos del catálogo sísmico y de las dimensiones del área en estudio.

Para la aplicación de esta metodología, en el Perú se ha hecho uso del catálogo sísmico para el periodo de 1960 a 2012 (Condori y Tavera, 2012), y los resultados son presentados en la Figura 4. Para el borde occidental del Perú se han identificado la existencia de hasta 5 áreas anómalas para el valor de "b"; es decir, 5 asperezas cuyas dimensiones permitieron estimar la magnitud de dichos eventos.

- *La primera aspereza se encuentra en la región sur (A1), frente a la zona costera de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, posiblemente asociada con el terremoto de 1868. De acuerdo a las dimensiones de la aspereza, el sismo podría alcanzar una magnitud de 8.8 Mw. El reciente sismo del año 2001 (8.0 Mw) habría liberado parte de esta energía y la restante posiblemente sea la causante de otro sismo de magnitud del orden de 8,2 Mw.*

Asperezas: Define al área en donde se vienen acumulando esfuerzos y energía, siendo el punto de inicio de un evento sísmico.
Valor de "b": Valor constante de la ley de Gutenberg-Richter que define la naturaleza sísmica de una región.

- La segunda aspereza (A2) se encuentra ubicada frente a la zona costera del extremo noroeste del departamento de Arequipa (Yauca - Acari), estando asociado al terremoto de 1913. El área de esta aspereza permite estimar la posible ocurrencia de un sismo con magnitud del orden de 7,5 Mw.

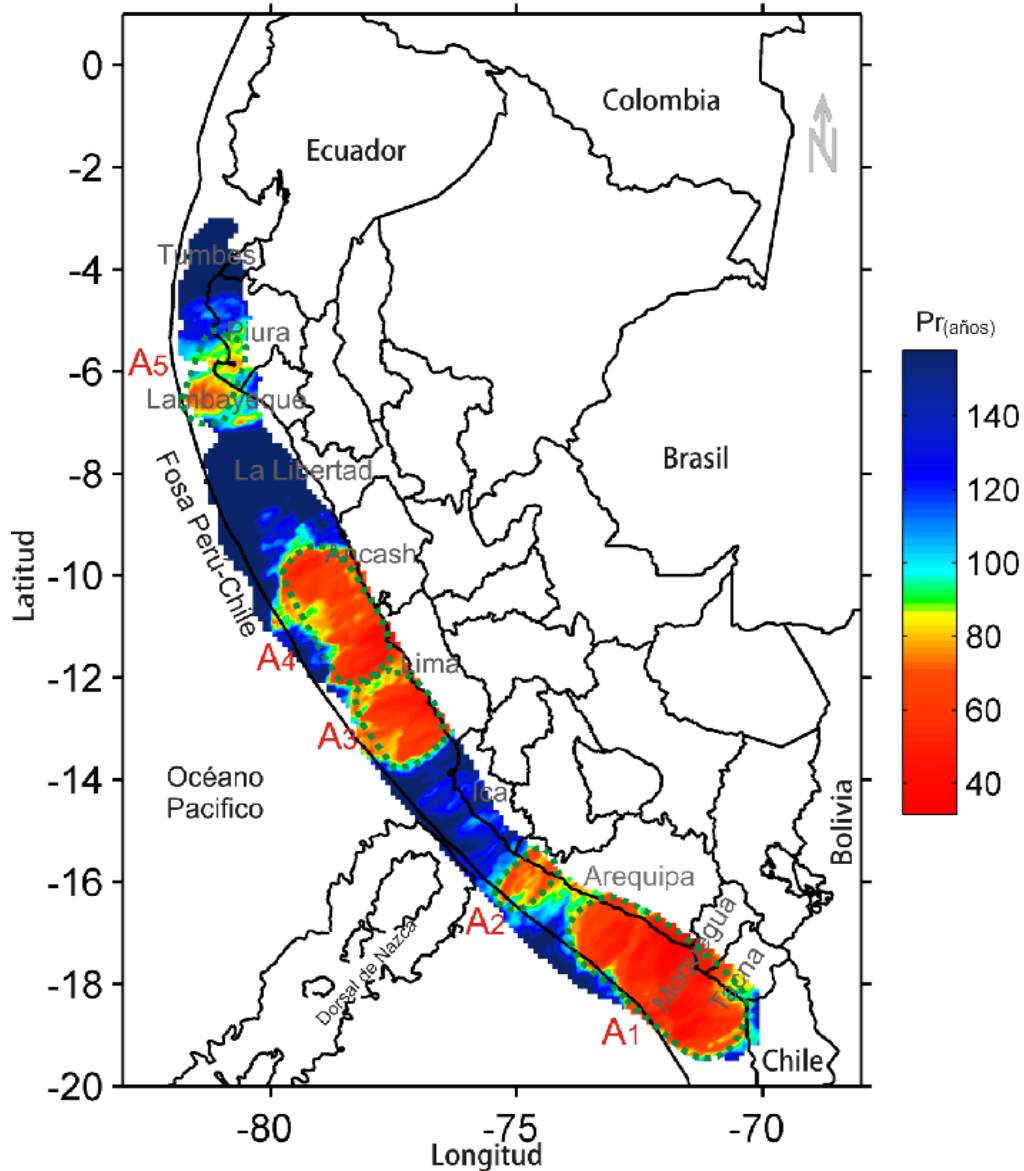


Figura 4: Mapa de períodos de retorno local para las principales asperezas identificadas en el borde occidental de Perú, obtenido a partir de la variación espacial del valor de "b" y la metodología propuesta por Wiemer y Zuñiga (1994), (Condori y Tavera, 2012)

- La tercera y cuarta aspereza (A3, A4) se encuentran en la zona costera del departamento de Lima y estarían asociadas al terremoto de 1746. De acuerdo a las dimensiones de dichas áreas, el sismo podría presentar una magnitud de 8,8 Mw.
- La quinta aspereza (A5), se encuentra frente a la zona costera de Chiclayo y podría estar asociado al terremoto de 1619. Esta aspereza de menor tamaño correspondería a un sismo con magnitud del orden de 7,7 Mw.

Todos los eventos históricos con los cuales están asociadas estas asperezas, produjeron importantes tsunamis que afectaron a la población costera de cada región.

De acuerdo a la metodología utilizada, las asperezas tienen una probabilidad mayor a 70% de producir sismos importantes en los próximos 75 años.

2.3.- Área de acoplamiento sísmico

Con el desarrollo de la instrumentación geofísica se ha logrado diseñar equipos de GPS (Global Positioning System) capaces de registrar con precisión los desplazamientos mínimos de la corteza terrestre. Paralelamente, se han desarrollado nuevas metodologías de investigación que han permitido utilizar dicha información. Debe entenderse que dentro del proceso de convergencia de placas, la Sudamericana se desplaza milimétricamente sobre la de Nazca en dirección Oeste (hacia el mar), siendo los desplazamientos mayores debido a la ocurrencia de sismos de gran magnitud. En este contexto, de instalarse una estación de GPS en un punto costero (por ejemplo, en el distrito de La Punta), las mediciones continuas deberían indicar el desplazamiento de la placa Sudamericana en dirección Oeste a una determinada velocidad por año. Si en alguna zona no se evidencian desplazamientos o éstos son menores que en las zonas adyacentes, debe entenderse que la tensión y la energía se vienen acumulando, y que al liberarse darían origen a un sismo de gran magnitud.

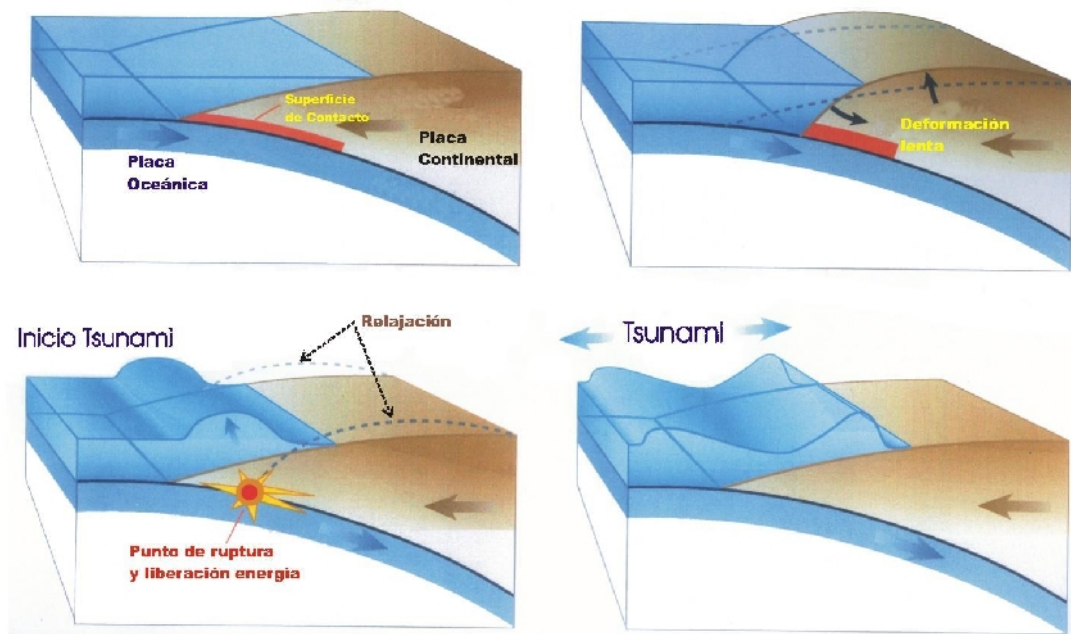


Figura 5: Esquema que muestra la convergencia de placas en el borde occidental del Perú y el proceso de generación de sismos y tsunamis. La línea en rojo representa al área de acoplamiento sísmico o de acumulación de energía. El proceso de subducción deforma el borde continental hasta un máximo de acumulación de energía que luego es liberada produciendo el sismo y tsunami.

Área de Acoplamiento Sísmico: Define a la superficie en la cual dos placas tectónicas se encuentran trabadas con la consecuente acumulación de deformación y energía.

La Figura 5 permite tener una mejor ilustración de lo descrito anteriormente. Ambas placas -Nazca y Sudamericana- se encuentran en convergencia y acumulando energía de deformación sobre su superficie de fricción o aspereza que evita el desplazamiento de las placas; es decir, ambas placas están trabadas (línea roja). Este proceso permite que la zona costera de repliegue y se incremente la acumulación de deformación y energía tratando de vencer la resistencia de las rocas. Al no lograr este objetivo, simplemente la corteza salta sobre la placa oceánica produciendo el sismo y el consecuente tsunami. Entonces, se debe identificar en qué región de la zona costera de Perú se encuentra la aspereza y/o zona de acoplamiento máximo (línea roja), porque ahí se produciría el próximo sismo. Las dimensiones de las asperezas son proporcionales al tamaño de los sismos. Asimismo, a mayor periodo de acumulación de deformación, mayor será la energía liberada por el sismo., y por ende el sismo tendría mayor magnitud.

Esta metodología ha sido aplicada en varias regiones del mundo con notable éxito para la identificación de zonas de mayor acoplamiento sísmico o de acumulación de energía (aspereza). Por ejemplo, Ruegg et al. (2009) propuso el escenario sísmico a presentarse en la zona costera de la ciudad de Concepción prácticamente un año antes de que ocurra el terremoto del año 2010 (8.8 Mw). En el Perú, los primeros estudios sobre GPS fueron desarrollados por Norabuena et al. (1998), Ocola y Ellis (1998), Ruegg et al. (2002), Ocola (2008) post-sismos de Nazca de 1996 y Arequipa 2001. Recientemente, Chlieh et al. (2011) recolecta información de diversas campañas de GPS -(1998-2005)- realizadas entre la ciudad de Lima (Perú) y Antofagasta (Chile) a fin de analizarla y proceder a identificar zonas de acoplamiento sísmico o acumulación de energía, asociado a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana. El análisis de la información y posterior estudio permitió a Chlieh et al. (2011) identificar, en el área de interés, la existencia de 4 zonas de máximo acoplamiento sísmico (Figura 6), todas con variadas geometrías y tamaños, siendo sus principales características las siguientes:

- *En la región central (A-1), existen dos áreas de acoplamiento sísmico, siendo la ubicada al norte, la de mayor tamaño. Ambas áreas son parte de otra, cuyo eje mayor, paralelo a la costa, tiene una longitud de 350 km. La magnitud del sismo ha sido estimada en 8.5-8.7 Mw. Las áreas estarían asociadas al terremoto de 1746.*
- *En la región sur (A-2), el área de acoplamiento sísmico se encuentra ubicada frente a la zona costera de las ciudades de Nazca y Yauca, y daría origen a un sismo de magnitud de 8.0 Mw. El área estaría asociada al terremoto de 1913.*
- *En la región sur (A-3), el área de acoplamiento sísmico considera a la zona costera de los departamentos de Moquegua y Tacna, y correspondería a un sismo de magnitud 8,1 - 8,5 Mw. Esta aspereza estaría asociada al terremoto de 1868.*

- En la región norte de Chile (A-4), el área de acoplamiento sísmico es mayor, ya que prácticamente considera la zona costera entre las ciudades de Arica y Antofagasta en Chile. El sismo tendría una magnitud superior a 8,6 Mw y estaría asociado al terremoto de 1877. Recientemente, el extremo norte del área, cerca de la ciudad de Iquique, dio origen a un sismo de magnitud 8,0 Mw (abril del 2014), lo que significa que dicho evento habría liberado parte de la energía acumulada, principalmente en el extremo norte del área de acoplamiento sísmico.

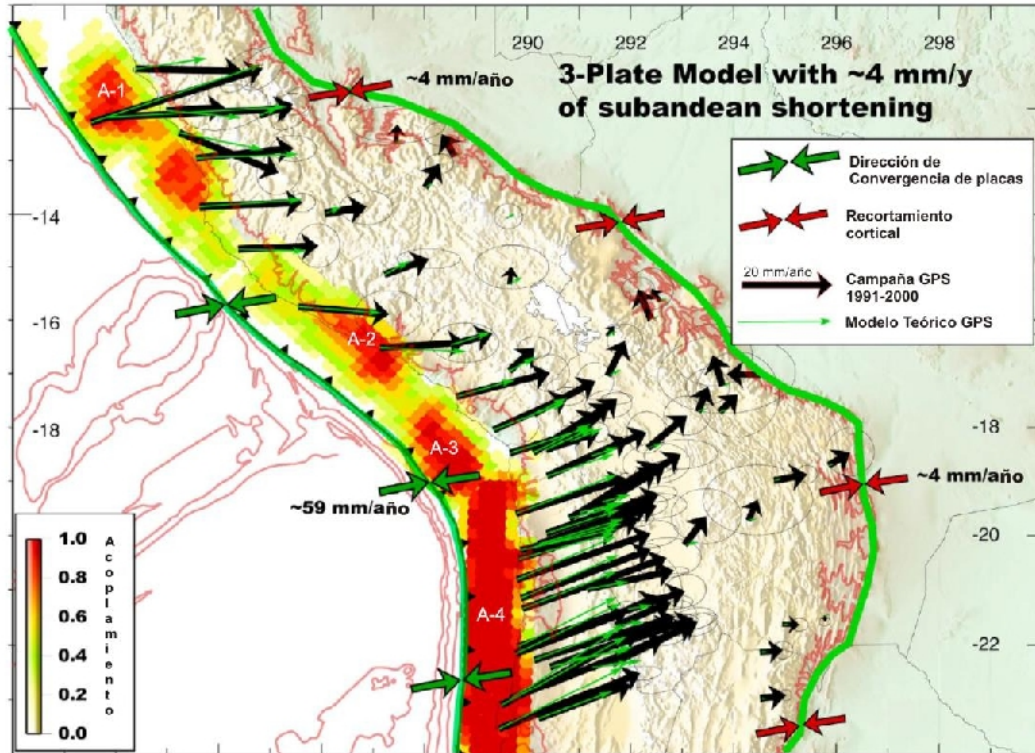


Figura 6: Mapa de zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS. Las flechas negras corresponden a las medidas in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta 4 zonas de acoplamiento sísmico (Chlieh et al, 2011).

2.4.- Acoplamiento sísmico y escenario de sismo

En la Sección 2.3 se propuso un modelo de acoplamiento sísmico para el borde occidental de la región central del Perú, obtenido a partir de mediciones geodésicas (GPS). Este modelo indica la existencia de dos áreas fuertemente acopladas o de mayor acumulación de energía frente al borde occidental de la región, la primera ubicada al norte de la costa de Lima y la segunda en su extremo sur. Suponiendo que el terremoto de 1746 representa ser el de mayor magnitud ocurrido en esta región, hasta el año 2010 se tendría un periodo intersísmico de 265 años, lo cual corresponde a una tasa de déficit de deslizamiento entre placas equivalente a un terremoto de magnitud de 8.8 Mw (Figura 7).

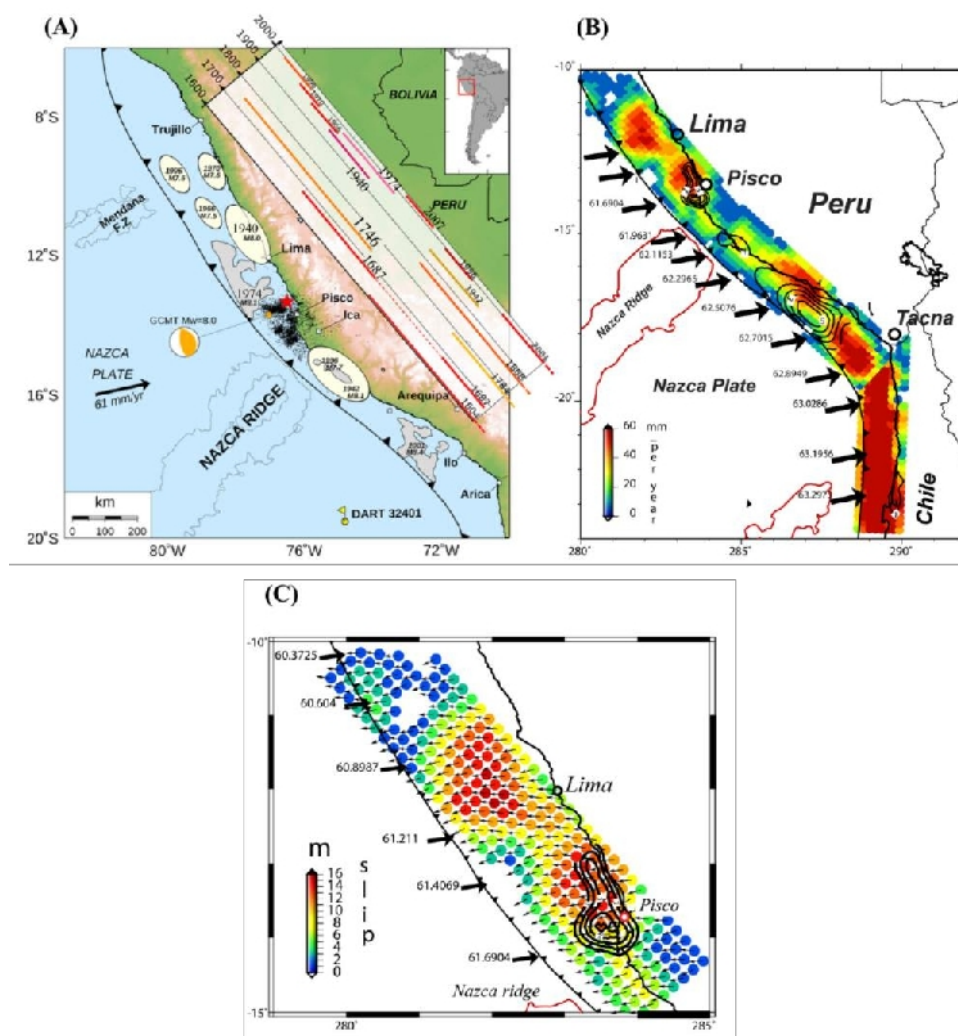


Figura 7: A) Sismos históricos en el borde occidental de Perú (Sladen et al., 2010). B) Modelo de déficit de deslizamiento en Perú y Chile. C) Distribución del vector deslizamiento obtenido al combinar la tasa de déficit de deslizamiento con un período intersísmico de 265 años correspondiente al terremoto de 1746 (Pulido et al, 2012).

2.5.- Aceleraciones teóricas máximas

Una vez conocido el escenario del posible sismo a ocurrir en el borde occidental de la región central del Perú, surge la inquietud de saber cuáles serían los niveles de sacudimiento del suelo que podría experimentarse en Lima Metropolitana y El Callao. En tal sentido, es importante conocer las características físicas de los suelos sobre el cual se encuentran ambas ciudades y para ello, el CISMID como parte del proyecto peruano-japonés conocido por las siglas "SATREPS" (Calderón et al, 2012), realizó varios ensayos geofísicos a fin de conocer la velocidad de las ondas sísmicas y los espesores de la capa sedimentaria en diversos distritos de Lima Metropolitana y El Callao. Para tener en cuenta la velocidad de las ondas a mayores niveles de profundidad, se han tomado los resultados obtenidos por Krabbenhoft et al. (2004) dentro del proyecto alemán de sismica marina conocido con las siglas "GEOMAR".

CISMID: Centro peruano japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.

SATREPS: Proyecto Fortalecimiento de Tecnologías para la Mitigación de daños por terremoto y Tsunamis en Lima.

GEOMAR: Proyecto de estudios de reflexión sísmica del Centro de Investigaciones del Océano de Kiel, Alemania.

Posteriormente, se construyó una malla teórica de estaciones acelerométricas separadas cada 5 km para el registro del evento a darse lugar en el escenario sísmico propuesto. Los valores de aceleración (PGA) y velocidad (PGV) de sacudimiento del suelo medido en cada punto de la malla, fueron interpolados a fin de construir los mapas de las Figuras 8a, b. Los resultados obtenidos son:

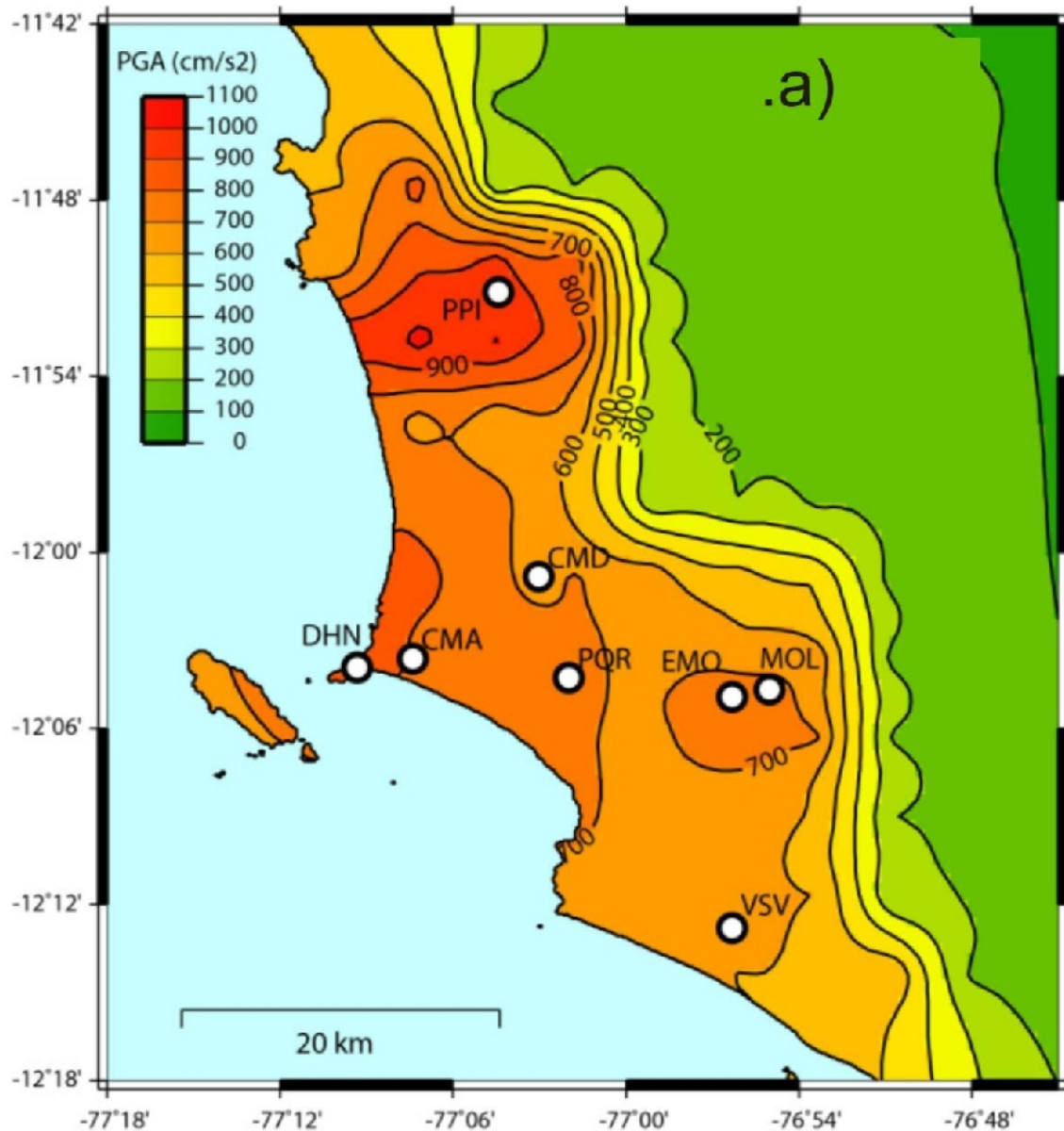


Figura 8a: Valores máximos de aceleración PGA para el sacudimiento del suelo obtenido en la simulación numérica. Los círculos y códigos corresponden a los puntos en donde se realizaron ensayos geofísicos para conocer las propiedades físicas del suelo. PPI= Puente Piedra, CMA= El Callao, MOL= La Molina, VSV= Villa el Salvador, PQR= Parque de la Reserva (Pulido et al, 2012).

PGA = Aceleración del suelo medido en roca
PGV = Velocidad del suelo medido en roca

- En la ciudad de Lima Metropolitana se tendrían aceleraciones mayores a 500 cm/s^2 y en El Callao, desde Ventanilla hasta la zona portuaria, del orden de 900 cm/s^2 . En el distrito de Chorrillos serían de 800 cm/s^2 .
- En cuanto a las velocidades de sacudimiento del suelo, estas serían del orden de 80 cm/s en Villa el Salvador y el Callao.

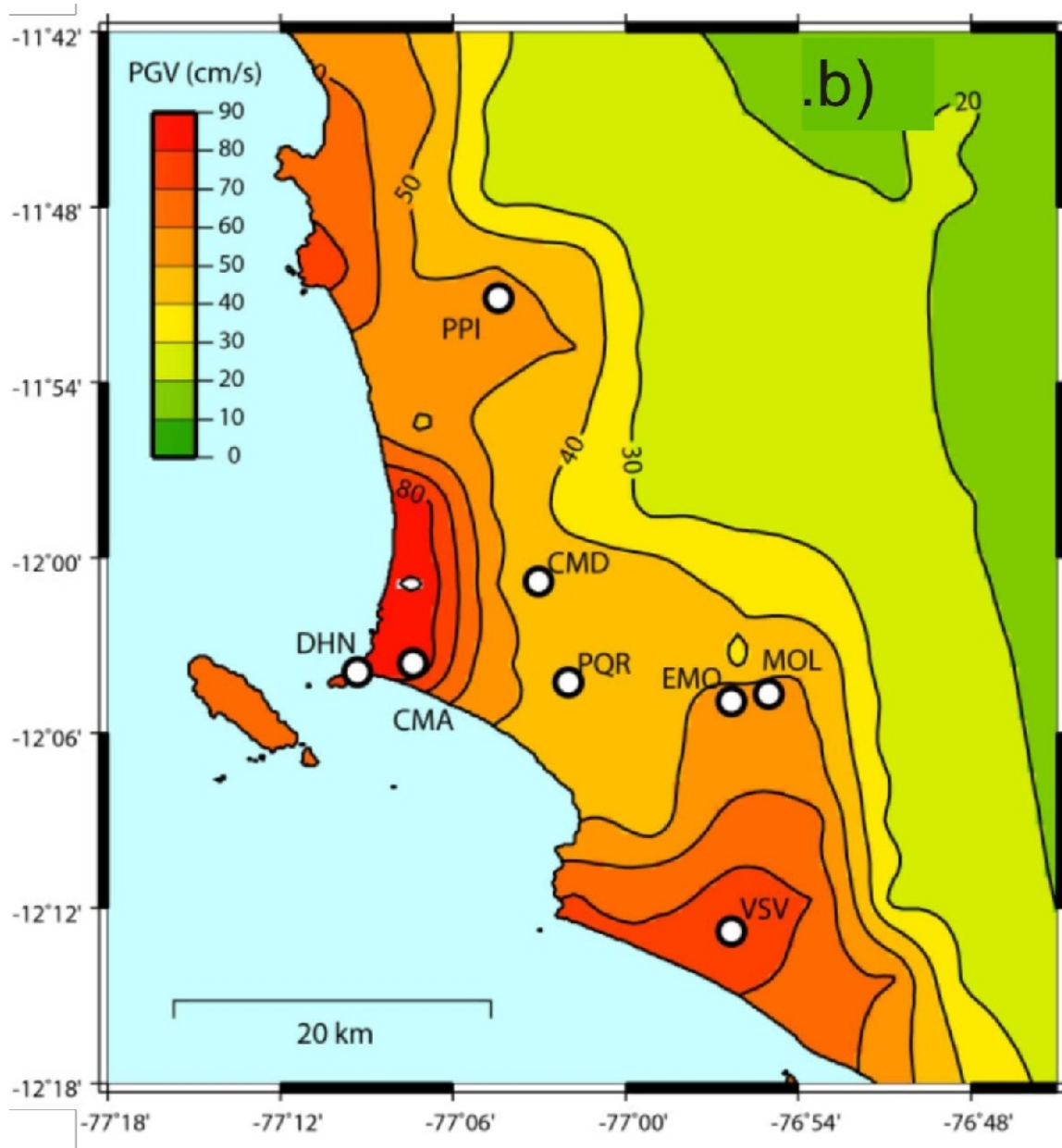


Figura 8b: Valores máximos de velocidad del suelo (PGV). En los mapas, los círculos y códigos corresponden a los puntos en donde se realizaron ensayos geofísicos para conocer las propiedades físicas del suelo. PPI= Puente Piedra, CMA= El Callao, MOL= La Molina, VSV= Villa el Salvador, PQR= Parque de la Reserva (Pulido et al, 2012).

A fin de analizar y cuantificar los registros teóricos de aceleración obtenidos para Lima Metropolitana y El Callao, en la Figura 9 se muestra los correspondientes al punto Parque de la Reserva - PQR (ver Figura 8) considerando diversos escenarios para el frente de ruptura. También se muestran los registros obtenidos en roca (PGA) y otros considerando los efectos de sitio (velocidad de ondas y espesor de la capa sedimentaria). Del mismo modo, se presenta el registro de los sismos de 1966 y 1974, tanto en aceleración como en velocidades obtenidas en el mismo punto PQR. En los espectros de respuesta se observa que los picos de frecuencias predominantes teóricos obtenidos en la estación Parque de la Reserva - PQR (PGA), al ser comparados con los correspondientes a los sismos de 1966 y 1974 son coherentes, es decir, sobresalen los mismos picos de frecuencias. Al considerar los efectos de sitio, las amplitudes son mayores pero prevalecen los mismos picos de frecuencia. Las diferencias en amplitud, con respecto a los registros de los terremotos de 1966 y 1974, son debidos a que éstos no alcanzaron la magnitud de 8,0 Mw. Tal como se indicó anteriormente, los registros teóricos de aceleración en la estación Parque de la Reserva (PQR) sugieren valores mayores a 500 cm/s^2 .

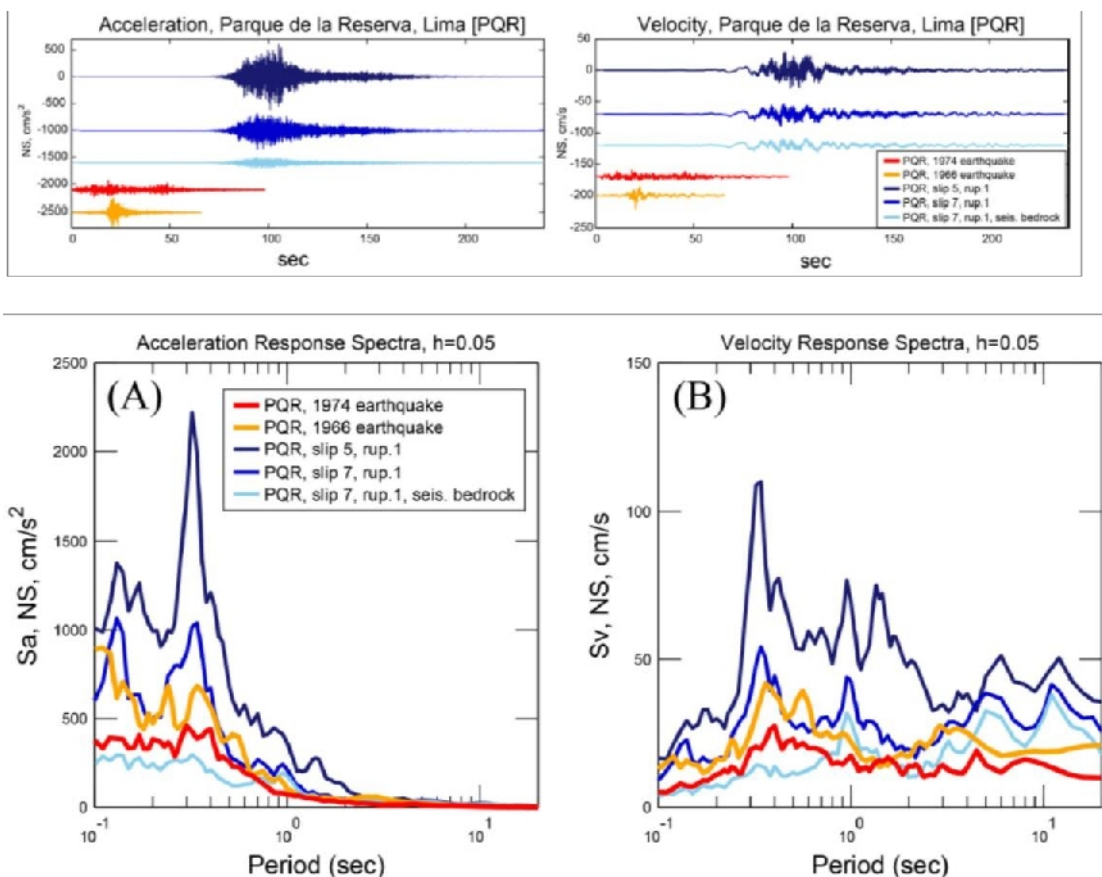


Figura 9: Fig. Superior: Registros de aceleración teórico considerando diferentes puntos de inicio de ruptura y los efectos de sitio. Los registros en celeste corresponden a aceleraciones en roca. Fig. Inferior: Espectros de respuesta en aceleración (A) y velocidad (B) para los sismos de 1966 y 1974 en comparación con los espectros teóricos para los escenarios sísmicos analizados por Pulido et al. (2012). Obsérvese la coherencia entre los picos de frecuencias predominantes.

2.6.- Notas del autor

En los años 60 a 70, la comunidad científica mundial se dedicó a buscar los procedimientos más óptimos para lograr predecir la ocurrencia de los grandes sismos. La primera comunidad que comprendió que este no era el mejor camino fue Japón y desde entonces, con el apoyo del Gobierno orientaron sus esfuerzos a la gestión del riesgo de desastre por sismo y tsunami, pero sin dejar de lado la investigación sobre la ocurrencia de terremotos. Hoy en día, dicha tarea tiene sus frutos, un adecuado desarrollo estructural y un respetable nivel de cultura de prevención y mitigación de daños.

Sin embargo, el hombre no cesa en su empeño de lograr "predecir" la ocurrencia de terremotos (conocer lugar, magnitud y fecha de ocurrencia del sismo) y a la fecha, a pesar de haberse logrado el desarrollo de la instrumentación geofísica y la propuesta de nuevas metodologías de investigación, sólo se ha logrado "pronosticar" los terremotos; es decir, conocer la ubicación geográfica del área que daría origen al terremoto y su posible magnitud, más no la fecha de ocurrencia. Pero aun así, éste resulta ser un importante aporte de la ciencia.

Dentro de este contexto, el analizar la distribución espacial de las áreas de ruptura asociadas a grandes sismos, el disponer de catálogos sísmicos cada vez más completos y contar con información geofísica más confiable, han permitido conocer con exactitud la ubicación de las áreas que darían origen a un nuevo terremoto en el futuro. Este es el caso de la región central del Perú, donde no ocurre un terremoto de gran magnitud desde el año 1746, y cuya área de acumulación de energía podría dar origen a un evento de magnitud superior a 8,5 Mw. Conociendo las características de la fuente sísmica y las propiedades físicas de los suelos sobre la cual se propagan las ondas sísmicas y/o se encuentran las ciudades como Lima Metropolitana y El Callao, es posible generar escenarios sísmicos para conocer los niveles de sacudimiento del suelo. Esta investigación se ha realizado en Lima Metropolitana y El Callao, lográndose estimar para Lima niveles de sacudimiento del suelo mayores a 500 cm/s^2 y para El Callao del orden de 900 cm/s^2 .

Para tener una idea de estos valores, durante el terremoto de Pisco 2007 (8,0 Mw), en la ciudad de Ica se registraron niveles de sacudimiento del suelo del orden de 400 cm/s^2 , y en Lima se registró en promedio valores de 80 cm/s^2 , es decir, cinco veces menor. En la ciudad de Santiago de Chile, durante el sismo del 2010 (8,8 Mw), las aceleraciones o niveles de sacudimiento del suelo llegaron a 900 cm/s^2 y en Japón, durante el terremoto del 2011 (9,0 Mw), en algunas zonas se registraron aceleraciones del orden de 1200 cm/s^2 .

Antes de la ocurrencia de los terremotos de Chile del 2010 y Japón del 2011, no era posible pensar que eventos de esas características podrían producir niveles de sacudimiento del suelo tan altos; por lo que, muchos países han iniciado proyectos acelerados de prevención y tareas dentro de acertadas políticas de gestión de riesgo de desastre, que permitan un mejor desarrollo estructural y educación para la población.

3.- ESCENARIO DE TSUNAMI

La ocurrencia de sismos de gran magnitud generan dos efectos secundarios, que se presentan de manera frecuente: 1) tsunamis en zonas costeras, cuando el epicentro del sismo está asociado a zonas de subducción, tal como se presenta en el borde occidental de América del Sur, 2) deslizamientos en áreas circundantes al epicentro con pendientes elevadas y 3) procesos de licuación de suelos. Históricamente, los tsunamis han tenido su origen, en mayor porcentaje, debido a la ocurrencia de sismos en zonas de subducción, de ahí que es importante conocer los escenarios sísmicos para que en segunda instancia, se pueda proponer escenarios para los posibles tsunamis.

Para generar un escenario para tsunami es importante disponer de información básica como es: el modelo de fuente sísmica a emplear, y los datos batimétricos y topográficos con la mayor resolución posible, a efectos de caracterizar con precisión el comportamiento del mar posterior a la ocurrencia del terremoto. El algoritmo de mayor uso en los modelamientos numéricos y posterior construcción del escenario de tsunamis es el TUNAMI-N2 desarrollado y aplicado con éxito por investigadores japoneses.

3.1.- Proyecto SIRAD

Para la zona costera del Callao existen diversos estudios sobre escenarios de tsunamis que han proporcionado variados mapas de inundación, por ejemplo: INDECI, DHN, CISMID, (Tavera, 2010), pero de todos ellos, el que ha considerado además, la zona costera de Lima Metropolitana es el elaborado por la ONG Cooperazione Internazionale (COOPI) como parte del proyecto SIRAD. El mapa de inundación por tsunami obtenido en este estudio se presenta en la Figura 10 y corresponde a dos escenarios propuestos ante la ocurrencia de sismos de magnitud 8,5 y 9,0 Mw, este último considerado como evento extremo poco probable. Los principales aportes de este estudio son:

- *Los distritos y/o zonas altamente vulnerables a la ocurrencia de un tsunami debido a su topografía y densidad poblacional serían: Ventanilla, Callao, La Punta, Chorrillos y Lurín. En estas zonas la inundación horizontal sería del orden de 1 a 2 km en el caso del tsunami generado por un sismo de magnitud 8,5 Mw. Para un sismo de magnitud 9,0 Mw, el tsunami alcanzaría distancias máximas de 2 km en Chorrillos y de 3 km en Lurín.*
- *Los distritos y/o zonas medianamente vulnerables ante la ocurrencia de un tsunami serían Ancón, Santa Rosa, Villa El Salvador y Punta Negra. Los niveles de inundación son menores a 500 metros. La vulnerabilidad podría ser mayor si el peligro se hace presente en verano por el incremento de población visitante.*

- Los distritos y/o zonas menos vulnerables ante la ocurrencia de tsunami debido a su topografía serían: San Bartolo, Santa María, Pucusana. Este escenario podría variar en temporadas de verano debido al incremento de la población visitante.

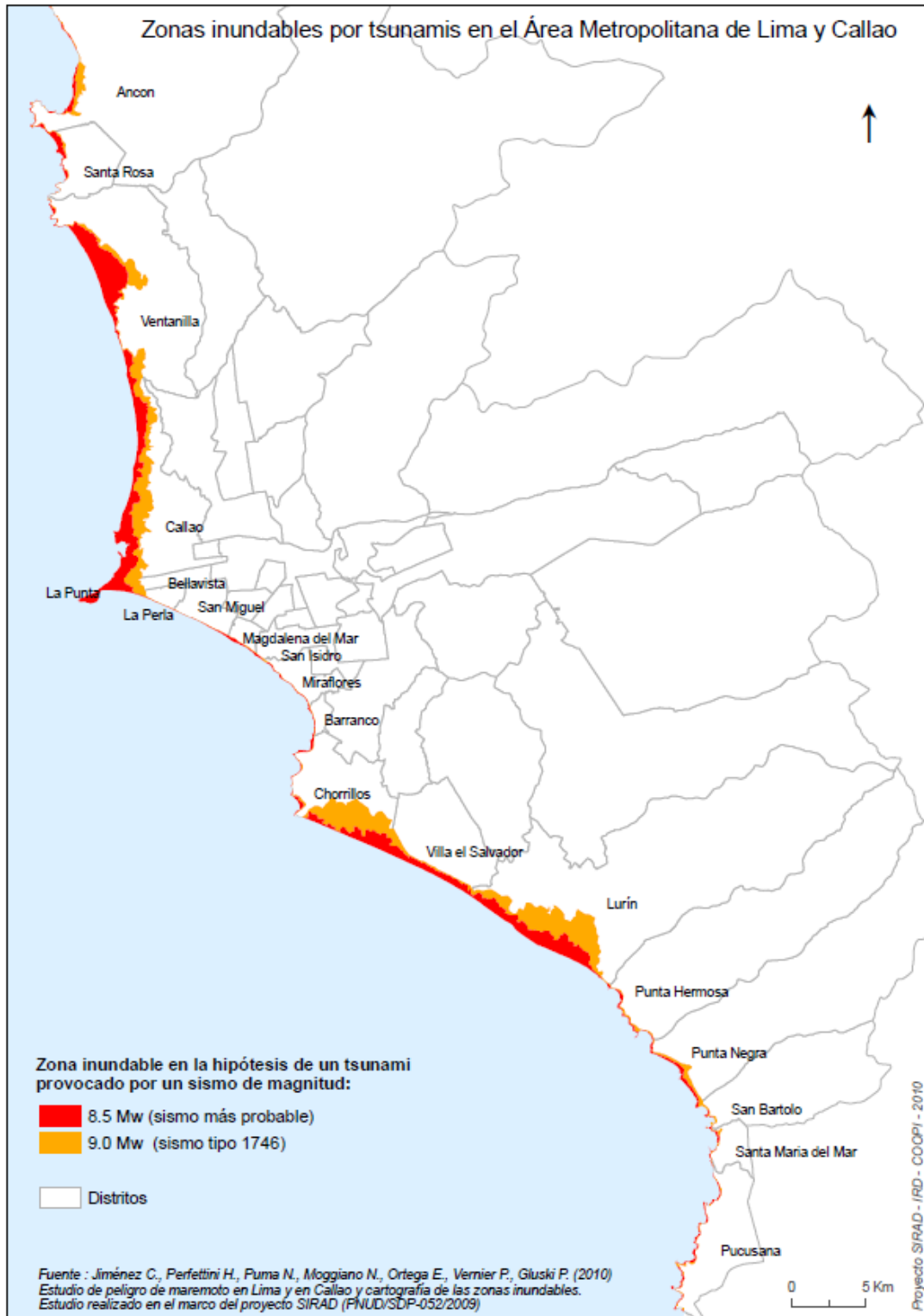


Figura 10.- Mapa de escenario de inundación por tsunami para la zona costera de Lima Metropolitana y El Callao considerando la ocurrencia de sismos de magnitud 8,5 y 9,0 Mw (COOPI, 2010).

- *Los distritos y/o zonas no vulnerables ante la ocurrencia de un tsunami debido básicamente a su topografía serían: La Perla, San Miguel, Magdalena del Mar, San Isidro, Miraflores y Barranco. Sin embargo, habría que considerar que en las zonas de playa se tiene afluencia de público por la presencia de clubes privados, restaurantes, campos deportivos, tránsito en la Av. Costanera y eventualmente afluencia de público en temporada de verano y durante el desarrollo de actividades recreativas. En la zona de playa, el modelo numérico indica que la altura de inundación podría llegar a valores de 12 metros cuando se considera un tsunami provocado por un sismo de magnitud 8,5 Mw.*

3.2.- Inundación en El Callao y La Punta

Otro de los recientes estudios que hace referencia a escenarios de tsunamis para la zona costera de los distritos de La Punta y El Callao, es el desarrollado por Adriano et al. (2013). Los autores realizan el modelado numérico utilizando datos batimétricos y topográficos de mayor resolución, además de considerar un factor de rugosidad para el frente de inundación que aproxime la presencia de estructuras por encima de la zona costera sobre el cual se desarrolla el proceso de inundación. En este caso, los autores consideran como primer escenario la fuente sísmica propuesta por Chlieh et al. (2011), es decir, la ocurrencia de un sismo de magnitud 8,8 Mw en el borde occidental de la región central del Perú. Asimismo, para un segundo escenario los autores consideran un sismo de magnitud 9,0 Mw similar al ocurrido en el año 1746 en la misma región. La diferencia básica radica en considera mayor área de ruptura, lo cual permite estimar mayores valores de desplazamiento en la fuente sísmica. Los resultados obtenidos por los autores se presentan en la Figura 11 y sus principales aportes son:

- *Primer escenario, tsunami producido por un sismo de magnitud 8,8 Mw, se esperaría que en Ventanilla, Zona Portuaria del Callao y La Punta se presenten niveles de inundación horizontal de hasta 1500 metros con alturas de 5 metros para el volumen de agua.*
- *Segundo escenario, tsunami producido por un sismo de magnitud 9,0 Mw, similar al ocurrido en 1746. En este caso, los niveles de inundación horizontal podrían alcanzar distancias de hasta 2000 metros con alturas del orden de 11 m en las mismas zonas antes indicadas.*

Para el distrito de La Punta y Callao zona centro, el escenario construido se presente en la Figura 12 y sus principales aportes son:

- *Primer escenario, tsunami producido por un sismo de magnitud 8,8 Mw; la inundación horizontal alcanzaría distancias de al menos 1 km con alturas de 4-5 metros en promedio.*

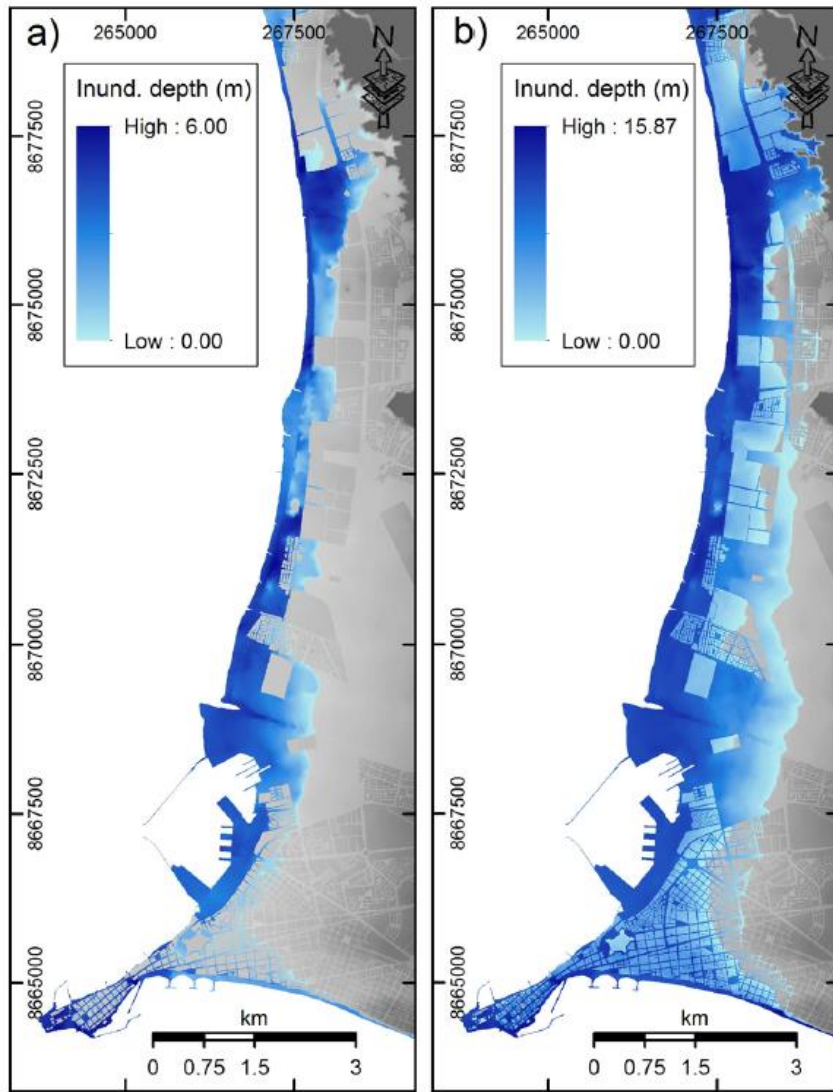


Figura 11: Escenarios regionales de niveles de inundación horizontal y vertical en la zona costera de los distritos de La Punta y El Callao debido a un tsunami producido por un sismo de magnitud 8,8, Mw y 9,0 Mw (Adriano et al. 2013).

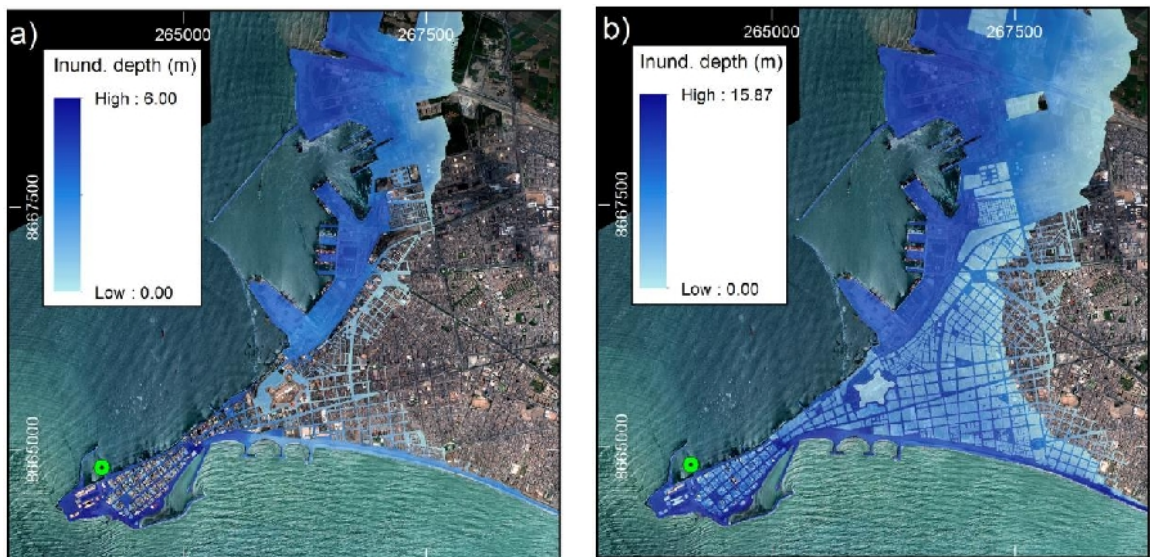


Figura 12: Escenarios locales de niveles de inundación horizontal y vertical en la zona costera de los distritos de La Punta y El Callao debido a un tsunami producido por un sismo de magnitud 8,8 Mw y 9,0 Mw (Adriano et al. 2013).

- *Segundo escenario, tsunami producido por un sismo de 9,0 Mw; la inundación horizontal alcanzaría distancias de 2 km con alturas de 15 metros, con lo que el 90% de las viviendas y edificios del distrito de La Punta quedarían completamente inundados.*
- *En ambos escenarios, el distrito de La Punta sería afectado considerablemente.*

3.3.- Inundación por el río Rímac

Finalmente, el estudio realizado por Martínez y Tavera (2014) ha permitido proponer un nuevo escenario de inundación por tsunami para la zona portuaria del Callao y el río Rímac (Figura 13) teniendo como fuente de origen un sismo de magnitud 8,5 Mw. Los principales resultados obtenidos en este estudio son:

- *La primera ola del tsunami llegaría al puerto del Callao en un tiempo de 18 minutos con olas del orden de 7-8 metros.*
- *La inundación horizontal en la zona portuaria sería del orden de 1400 metros.*
- *Sobre el cauce del río Rímac, el tsunami ingresaría hasta una distancia de 2100 metros produciendo embalses con el material arrastrado por el tren de olas.*
- *La velocidad de propagación del frente de tsunami en la zona portuaria del Callao sería de 36km/h, sobre el cauce del río Rímac de 32km/h. En la zona de la Base Naval del Callao la velocidad sería de 27km/h. En general, estas velocidades, sugieren que el tsunami fácilmente trasladaría hacia la zona costera material pesado como contenedores y barcos.*

3.4.- Notas del autor

Los estudios realizados para la propuesta de escenarios de tsunamis en la zona costera del Callao y Lima Metropolitana sugieren resultados similares entre ellos, tal como se ha mostrado con los estudios presentados en este informe. Es importante remarcar que el mayor peligro de tsunami está directamente relacionado a condiciones como:

- *La batimetría del fondo oceánico que prácticamente acondicionaría el desarrollo del tsunami antes de su llegada a la zona costera, de ello depende la velocidad del frente de ola y su altura. El tsunami que se generó después de ocurrido el terremoto de Japón de 9,0 Mw en el año 2011, produjo el avance del tsunami con volúmenes de agua que alcanzaron, en algunas bahías, alturas del orden de 45 metros.*



Figura 13: Escenario de inundación por tsunami producido por un sismo de magnitud 8.5 Mw en la zona portuaria del Callao y el río Rímac (Martínez y Tavera, 2014)

- La topografía de la zona continental controla los niveles de inundación, zonas con topografía cercanas al nivel medio del mar facilitan el avance del frente del tsunami. En Japón, después de ocurrido un sismo de magnitud 9,0 Mw en el año 2011, el tsunami avanzó hasta 4 km en zonas con topografía cercana al nivel medio del mar, llegando a destruir completamente varios barrios residenciales.
- La velocidad de avance del frente del tsunami del orden de 36km/h es bastante alta y ello explicaría que los contenedores y barcos de gran tonelaje puedan ser

transportados con facilidad tierra adentro. Este tipo de escenario fue frecuente durante el último tsunami que afectó a Japón en el año 2011.

- *Los efectos del tsunami en estructuras y personas dependerán de la cercanía de ambos a la zona costera, si el índice de población y la precariedad de las construcciones es elevado, el desastre se incrementará en pérdidas de vidas y económicas.*

La falta de una adecuada gestión de riesgo ante la real situación de vulnerabilidad de la provincia Constitucional del Callao y Lima Metropolitana, hace que ambas sean susceptibles a escenarios críticos de desastre.

NOTA:

Para el Perú, la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú ha elaborado cerca de un centenar de mapas de inundación por tsunami para la costa peruana, los mismos que pueden ser consultados en la siguiente dirección:

https://www.dhn.mil.pe/app/menu/tsunami/cartastsunamis/tsunamis_prevenccion/tsunamis_inundacion.htm

Estos mapas muestran para cada localidad/ciudad en detalle las distancias de inundación y las rutas de evacuación peatonal y vehicular, información que debe ser tomada en cuenta por las respectivas autoridades.

CONCLUSIONES

Considerando que el borde occidental de la región central del Perú no es ajeno a la ocurrencia de grandes sismos, surge la inquietud de conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud y posterior tsunami que pueda afectar a las principales ciudades costeras del Perú.

Dentro de este contexto, se han realizado varios estudios utilizando diversos tipos de datos y metodologías para conocer, a priori, la geometría y ubicación geográfica del área de mayor acumulación de energía que pueda dar origen a un sismo de gran magnitud. El estudio que cuantifica mejor este escenario sísmico, es el desarrollado por Chlieh et al. (2011), el mismo que propone la existencia de hasta 4 áreas de máximo acoplamiento sísmico o de mayor acumulación de energía entre la zona costera de Lima (Perú) y Antofagasta (Chile).

En el caso de la región central del Perú, el área de mayor acoplamiento sísmico daría origen a un sismo de magnitud del orden de 8.8 Mw y según Pulido et al. (2012), del orden de 8,9 Mw. En ambos casos, el sismo tendría un área de ruptura del orden de 500 x 160 km, con el eje mayor paralelo a la línea de costa; es decir, similar al sismo de Chile de 2010 y Japón del 2011. En este escenario, toda la zona costera entre Pisco y Chimbote se vería afectada con los mayores niveles de aceleración y/o niveles de sacudimiento del suelo, pudiendo llegar éstos hasta el borde occidental de la cordillera.

Considerando las características del escenario sísmico propuesto y las propiedades físicas de los suelos de Lima Metropolitana y El Callao, se han obtenido registros teóricos de aceleración a fin de estimar los posibles niveles de sacudimiento del suelo ante la ocurrencia del escenario de sismo propuesto por Chlieh et al. (2011). El análisis y cuantificación de la información obtenida permite proponer para Lima Metropolitana y El Callao niveles de sacudimiento del suelo mayores a 500 cm/s^2 , siendo el máximo de 900 cm/s^2 en la zona costera, entre Ventanilla y Chorrillos.

En el escenario propuesto, toda el área urbana de Lima Metropolitana y El Callao, podrían ser afectados con niveles de sacudimiento para los suelos superiores a los percibidos en Ica durante el sismo del 2007 (8,0 Mw) y los máximos similares a los niveles percibido en Santiago de Chile durante el sismo del 2010 (8,8 Mw).

Las simulaciones numéricas realizadas para proponer escenarios de tsunamis producidos por sismos de magnitudes 8,5 y 9,0 Mw en las zonas costeras de Lima Metropolitana y el Callao, muestran que la primera ola del tsunami llegaría a la zona de costa en un tiempo de 18 minutos y con alturas probables de 8 metros. Los niveles de inundación varían, hasta un máximo de 1400 metros frente a la zona portuaria del Callao. Sobre el cauce del río Rímac, el tsunami avanzaría hasta distancias de 2100 metros. En

ambos escenarios, la zona portuaria del Callao y el distrito de La Punta serían afectados en mayor porcentaje.

Para una correcta gestión del riesgo ante tsunamis, es necesario considerar escenarios similares a los presentados en Chile y el Japón después de ocurridos los terremotos del 2010 y 2011 respectivamente. En Japón, sobre zonas planas con topografía cercana al nivel medio del mar el tsunami avanzó hasta 4 km en superficie y en otras zonas, la altura del volumen de agua sobrepasó los 45 metros. Las altas velocidades de propagación del tsunami en tierra, facilitaron el traslado de contenedores, buques y yates para dejarlos encallados a varias centenas de metros tierra adentro o sobre los techos de las casas que soportaron al terremoto y tsunami.

Finalmente, recomendar que los escenarios de sismo y tsunamis analizados y discutidos en este documento, sean considerados en todas las acciones de gestión de riesgo de desastre que se desee realizar ante la posible ocurrencia de estos peligros. No se debe olvidar que en este momento, no es importante conocer dónde ocurrirá el siguiente terremoto, ni tampoco su magnitud, mucho menos la fecha, sino el saber qué estamos haciendo como personas y como sociedad para no ser dañados por ese terremoto que de todas manera va a ocurrir.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Arq. Mercedes de Guadalupe Masana García, Jefa del CENEPRED, por la iniciativa de preparar este documento que esperamos sea de utilidad para las tareas de gestión de riesgo que se vienen desarrollando en nuestro país. A la Dra. Yamina Silva por sus comentarios y revisión del manuscrito. Del mismo modo, a Patricia Guardia y Julio Martínez por su apoyo en la elaboración de los mapas y figuras que acompañan a este informe.

BIBLIOGRAFIA

- Adriano, B., Mas, E., Koshima, S., Fujii, Y. (2013). Tsunami inundation mapping in Lima for two tsunami source scenarios. *JDR*, Vol 8, 2.
- Beck, S. y Nishenko, P. (1990). Variations in the mode of great earthquake rupture along the central Peru subductions zona. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1969-1972.
- Calderon, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., Aguilar, Z. (2012). Study of soil amplification base microtremors and seismic records in Lima, Peru., *Jour Japan Assoc. Earthq. Eng.* 12, 1-20.
- Carpio, J. y Tavera, H. (2002). Estructura de un catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catalogo de Gustakov (2002). *BSGP*, V94, 45-59.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avoac, J-P. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along Central Andes subduction zone. *J. G. R.* Vol 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166
- Condori, C., Tavera, H. (2012) Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú a partir de la variación del parámetro "b". *Bol. Soc. Geol. Perú* 106: 23-36.
- De Mets, C., Gordon, R., Aarhus, A., y Stein, S. (1980). Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- Dorbath, L., Cisternas, A. y Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
- Flores, C. y Tavera, H. (2012). Aplicación del algoritmo M8 en el borde occidental del Perú: Incrementos de probabilidad para la ocurrencia de grandes terremotos, *Bol. Soc. Geol. Perú* 106: 11-21.
- Guardia, P. y Tavera, H. (2012). Inferencias de la superficie de acoplamiento sísmico interplaca en el borde occidental del Perú. *Bol. Soc. Geol. Peru*, 106: 37-48.
- Gutenberg, R. y Richter, F. (1944).-Frequency of earthquakes in California. *Bul. Seism. Soc. Am.* 34, 185-188
- Ishimoto, M. e Ida, K. (1939). Observations sur les seism enregistres par le microseismograph construit dernièrement (I). *Bull. Earthquake Res. Inst*, 17, 443-478.
- Kagan. Y. y Jackson, D. (1991) Seismic gap hypothesis: Ten years after. *JGR*, 96, 21419-21431
- Kelleher, J. (1972). Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *JGR*, 77, 2087-2103.
- Kelleher, J., y W. McCann (1976), Buoyant zones, great earthquakes, and some predictions, *J. Geophys. Res.*, 81, 4885-4896.
- Krabbenhöft A., Bialas J., Kopp H., Kukowski N., Hübscher C. (2004). Crustal structure of the Peruvian continental margin from wide-angle seismic studies: *Geophysical Journal International*, v. 159, p. 749–764, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02425.x.
- Martinez, J. y Tavera, H. (2014). Dinámica y modelado numérico de tsunami en el terminal portuario del Callao y río Rímac. *Dirección de Sismología, Instituto Geofísico del Perú*, 50 pag.
- McCann, W., S. Nishenko, L. Sykes y J. Krause, (1979). Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries, *PAGEOPH*, 117, pp. 1,082 - 1,147
- Nishenko, S. (1985). Seismic potential for large and great interpolate earthquakes along the Chilean and Sourthen Peruvian margin of South America: a quantitative reappraisal. *JGR*, 90, 3589-3615.
- Nishenko, S. (1999). Circum-Pacific seismic potential 1989-1999., *PAGEOPH*, 135, 169-259.
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A. Dixon, T. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America Convergence. *Science*, 279, 358-362.

- Norabuena, E., Dixon, T., Stein S. y Harrison, C. (1999). Decelerating Nazca_south America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 26, 3405-3408.
- Ocola, L. (2008). Southern Peru coseismic subsidence: 23 June 2001, 8,4 Mw earthquake. *Advance in Geosciences*, 14, 79-83.
- Pararas-Carayannis, G. (1974). An investigation of tsunami source mechanism of the coast of central Peru. *Marine Geology*, V17, 235-247.
- PNUD (2011). Proyecto SIRAD: Recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima Metropolitana y Callao. INDECI, 200 p.
- PREDES (2009). Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y el Callao, Perú. INDECI, 60 p.
- Pulido, N., Tavera, H., Perfettini, H., M. Chlief (2010). Estimation of slip scenarios for megathrust earthquake. A case study for Peru. *IASPEI / IAEE International Symposium*.
- Pulido, N., Tavera, H., Aguilar, Z., Calderón, D. (2012). Mega-earthquakes ruptures scenarios and strong motion simulations for Lima, Perú. *International Symposium CISMID, TS-6-2*. Lima, Perú.
- Ruegg, J., Olcay, M., Armijo, R. (2002). Coseismic and aseismic slip observed from continuous GPS measurements for the 2001 southern Peru earthquake. *ISAG*.
- Ruegg, J., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R. (2009). Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepcion in Chile. *PEPI*, 175, 78-85.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en Perú, 1513-1974. *Inst. Geol. Minero de Perú*, 131 pag.
- Sladen, A., Tavera, H., Simons, M. Avouac, J-M. (2010), Source model of the 2007 Mw 8.0 Pisco, Peru earthquake: Implications for seismogenic behavior of subduction megathrusts, *J. Geophys. Res.*, 115, B02405, doi: 10.1029/2009JB006429
- Soloviev, S. y Go, Ch. (1975). A catalogue of tsunami on the eastern shore of the Pacific Ocean. Moscow, Nauca Publiishing Hpuse, 202 p.
- Tavera, H. (2010). Estudio de tsunamis en el distrito del Callao. Informe Técnico, COOPI., PNUD/SDP-049/2009.
- Tavera, H. y Bernal, I. (2005). Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste de Perú. Vol. 6, *SGP*, 89-102.
- Wiemer, S. y F. R. Zúñiga (1994). ZMAP, *EOS Transactions*, 75, American Geophysical Union.
- Wiemer S. y Wyss, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times? *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.