

MODELAMIENTO NUMÉRICO DE TSUNAMI APLICADO A LA VALIDACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO ASOCIADO AL TERREMOTO DE PISCO 2007 (8.0Mw)

Mansour Ioualalen¹⁾, Hugo Perfettini¹⁾, Sheila Yauri²⁾, Cesar Jimenez³⁾ y Hernando Tavera²⁾

1) Géozur, Université de Nice Sophia Antipolis, IRD, Villefranche-sur – France

2) Université Joseph Fourier, IRD, Grenoble-France

3) Instituto Geofísico del Perú, Lima – Perú

4) Dirección de Hidrografía y Navegación, Lima – Perú

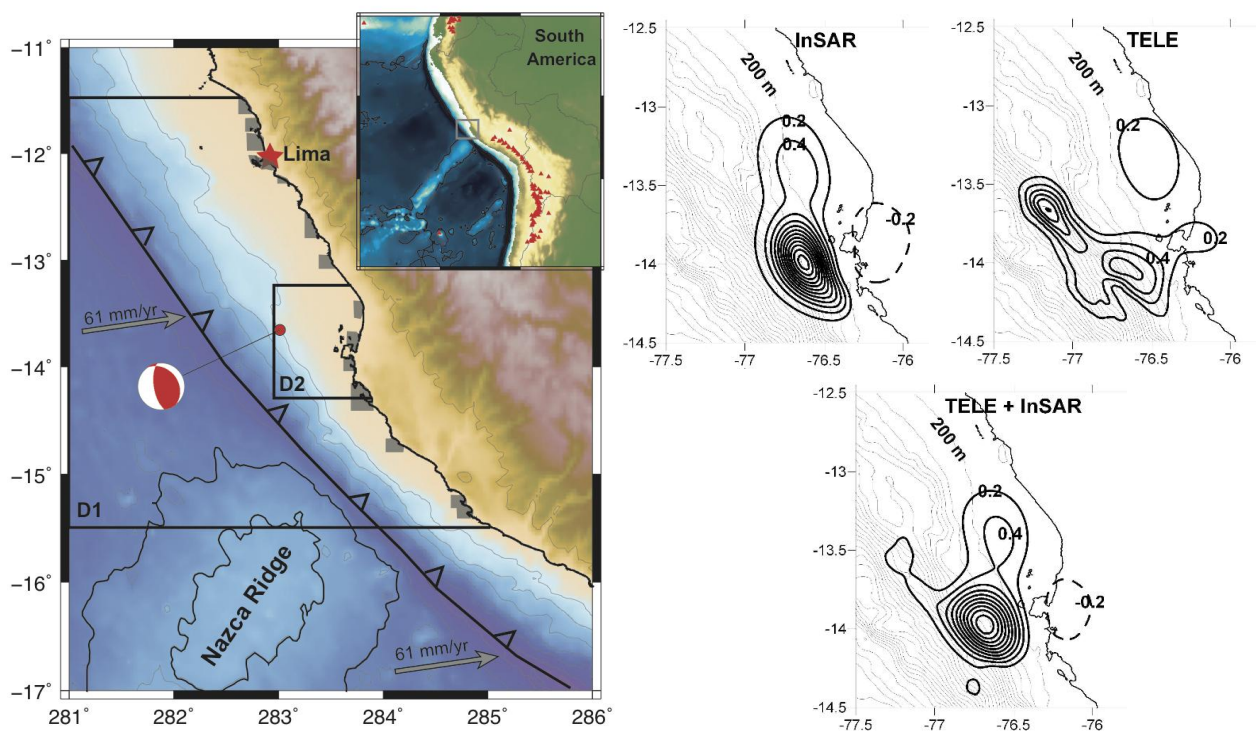
mansour.ioualalen@geoazur.obs-vlfr.fr; sheila.yauri@igp.gob.pe, hernando.tavera@igp.gob.pe

1. INTRODUCCIÓN

Por mucho tiempo los registros Telesísmicos han sido utilizados para determinar el desplazamiento de la fuente sísmica durante un terremoto; debido a que en el campo cercano éstos se saturan con altas frecuencias y para ser modelados se requiere de contar con un buen modelo de velocidad local. Por otro lado, los modelos de InSAR (Interferometric Synthetic Aperture radar), hoy en día parecen ser una buena alternativa ya que permite detectar las pequeñas deformaciones en superficie, aunque carece de resolución temporal. En este sentido, ambos métodos parecen ser complementarios en términos de resolución espacial y temporal. El 15 de Agosto de 2007 un terremoto (8.0Mw) y tsunami ocurre en la costa central de Perú. Sladen et al. (2010) propone tres modelos de desplazamiento de la fuente sísmica a partir de la inversión de datos Telesísmicos, InSAR y de la combinación de ambos. Considerando que estos modelos de fuente sísmica representan la condición inicial para la generación del tsunami; en este estudio, se lleva a cabo su validación mediante el modelamiento numérico del tsunami y se identifica el que mejor se ajusta a los datos mareográficos. Para tal fin, se hace uso de registros mareográficos del Callao, boya DART (32401) y mediciones de run-up. Finalmente, con el mejor modelo de fuente se propone un mapa de run-up y se identifica los procesos responsables de la amplificación y/o atenuación del tsunami en la costa peruana.

2. TERREMOTO DE PISCO - 15 DE AGOSTO DE 2007

El 15 de Agosto del 2007 a las 23:40:57 GMT, un terremoto de magnitud 8.0Mw ocurrió en la zona Central de Perú a 60 km al Este de Pisco (13.35°S, 76.51°O) (Figura 1a). El terremoto habría liberado la energía acumulada dentro del gap sísmico identificado entre la dorsal de Nazca y el área de ruptura del terremoto de 1974 (Beck y Nishenko, 1990, Tavera y Bernal, 2005). La energía liberada a través de ondas sísmicas fue sentida a lo largo de la costa peruana, desde Piura hasta Arequipa, con intensidades entre VII-VIII (MM) en las localidades de Pisco, Chincha y Cañete (Tavera y Bernal, 2008). A fin de explicar la dinámica de ruptura de la fuente sísmica, Sladen et al. (2010) propone tres modelos de fuente mediante la inversión de datos Telesísmicos, imágenes InSAR y de la combinación de ambos (Telesismico+InSAR). Los tres modelos muestran el mismo patrón de deformación con dos asperezas principales, siendo la primera ubicada cerca al epicentro; mientras que, la segunda y más grande ubicada aproximadamente a 60 km hacia el Sur con un desplazamiento máximo de 10 m (Figura 1b). Esta última aspereza habría generado las máximas alturas del tsunami al sur de la península de Paracas, en donde se observó 10 m de run up (Woodman, 2007).



Figuras 1: a) Mapa de localización del terremoto del 15 de agosto del 2007 y b) Modelos de fuente sísmica propuestos por Sladen et al., 2010 a partir de los datos de InSAR, Telesísmico y de su combinación (InSAR+Telesísmico).

3. OBSERVACIONES DEL TSUNAMI

Entre 15 y 20 minutos después de ocurrido el terremoto de Pisco, la costa central de Perú fue afectada por un tsunami que generó daños moderados en las localidades de Chincha, Pisco y Paracas, llegando en menor proporción a la costa de Lima (La Punta, Miraflores, Villa, Conchán y Lurín). Los mayores daños e inundación se presentaron en Lagunillas, localidad ubicada a 43 km al sur del epicentro, el mismo que se caracterizó por el arribo sucesivo de tres a cuatro olas. La máxima altura de ola con 10 m fue observada en la playa Yumaque; mientras que, la mayor distancia de inundación se observó en la playa Lagunillas donde el mar ingresó 1500 m hacia el continente. Este tsunami también presentó olas con alturas centimétricas en algunas costas del océano Pacífico como: Chile, California, Nueva Zelanda, México, Hawai y Japón. La estación mareográfica del Callao y la boya DART (32401) registraron con gran resolución la serie temporal del tsunami. Por otro lado, a través de observaciones de campo se identificaron la distancia de inundación y run up del tsunami (Barrientos et al., 2007, Woodman, 2007, Ocola et al., 2007 y DHN, 2007).

3. MODELAMIENTO DEL TSUNAMI

3.1 Dominio computacional

Para realizar la validación de los modelos de fuente, se realizó el modelamiento numérico de la propagación e inundación del tsunami mediante el uso del código no lineal y dispersivo FUNWAVE. Se consideró un dominio computacional entre 15.5°S y 11.5°S y entre 79°W y 75°W (1082x1480 nodos) con una resolución en dx/dy=300 m. Considerando el criterio CFL (Courat Friedrichs Lewy), se utilizó un intervalo de tiempo computacional $dt=0.4s$ y tiempo de propagación de 3 horas, lo suficiente para realizar la comparación y validación entre los registros modelados

y observados. Asimismo, se consideró una batimetría robusta obtenida de la digitalización de las cartas mareográficas de la DHN complementada con la batimetría obtenida del ETOPO-2, así como, topografía local con resolución de 90m obtenida del SRTM. Para realizar la cross-validación entre el tsunami y los parámetros del sismo de manera robusta, se utiliza la serie temporal del registro mareográfico de la estación Callao ubicada hacia el Norte del epicentro ($12^{\circ}03'55''S$, $77^{\circ}09'52''W$) y la boya DART 32401 ubicada hacia el Sur ($19.297^{\circ}S$, $74.746^{\circ}W$). Procesamientos previos permitieron en ambos registros, eliminar el efecto de mareas (periodos de 1 hora) y oleaje anómalo observado en el registro Callao (periodos de 5 min).

3.2 Comparación y validación de los mareogramas

Para realizar una validación más objetiva a lo largo del tiempo de propagación del tsunami, se realiza la comparación entre el registro mareográfico observado y el calculado para ventanas de tiempo de 30, 60 y 90 min. considerando diferentes parámetros estadísticos y su espectro de frecuencia. El mejor modelo de fuente, será seleccionada en base al coeficiente de cros correlación (*corr*), coeficientes *R2*, la norma *L2*, la *RMSE*, la media (*mean*) y la desviación estándar *STD*. Debido a que no es posible considerar el tiempo de arribo como criterio de validación en los mareogramas (problemas recurrentes del reloj de los mareógrafos), se realiza el ajuste en tiempo a fin de encontrar la mejor cross-correlación, observándose desfases de tiempo de -80s, -40s, -80s cuando se considera la fuente InSAR, Telesísmico y el combinado, respectivamente. Tomando en cuenta la baja resolución de los datos batimétricos fuera de la costa, este desfase de tiempo puede considerarse despreciable, confirmando la buena localización de la fuente de InSAR y telesísmica y el correcto funcionamiento del reloj del mareograma. Considerando el modelo de fuente InSAR, se obtuvo buena correlación entre el registro observado (Callao) y el modelado, especialmente en las tres primeras crestas y valles del tsunami (Figura 2.a). De acuerdo a los cálculos estadísticos, para la ventana de 60 min, este modelo parece reproducir muy bien la secuencia de olas, tanto en periodo como en amplitud con un $corr=0.82$ (y 0.94 para la ventana de 30 min), y un diferencia de $STD=+1\%$, únicamente. La comparación de ambos espectros también muestra una buena similitud, con picos de amplitud similar en 640 y 1280 s (Figura 2.b). Considerando el modelo de fuente Telesísmica, la ventana de tiempo de 30 min presenta una $corr=0.45$ y una diferencia $STD=-67\%$ y en este caso, los registros difieren significativamente, tanto en periodo y amplitud, indicando una pobre representación de la secuencia de olas. De la misma forma, considerando el modelo de fuente InSAR+Telesísmico, el cual teóricamente debería ser el que mejor representa la deformación cosísmica, presenta una pobre comparación, indicando que la data sísmica contribuye a la degradación del modelo InSAR. Esto se debería a que el modelo Telesísmico considera un desplazamiento cosísmico con dos asperezas de importantes desplazamientos; mientras que, el modelo InSAR básicamente considera una aspereza con alto desplazamiento vertical hacia el sur del epicentro. Adicionalmente, con la fuente InSAR se realizó el modelamiento de propagación del tsunami considerando un modelo no dispersivo, cuyos resultados muestran el dominio de bajas frecuencias en zonas costeras, afirmando que es necesario considerar el efecto de dispersión, el cual incrementaría la altura de tsunami a partir de la segunda ola. Para la validación haciendo uso del registro de la boya DART 32401, se consideró el dominio computacional entre $20^{\circ}S$ y $12^{\circ}S$ y entre $80^{\circ}W$ y $70^{\circ}W$, con una resolución $dx/dy=600$ m y un $dt=0.6$ s con un tiempo de propagación de 4 horas. A fin de eliminar el efecto de marea, se aplicó un filtro de 1h; sin embargo, para mantener intacto el registro del tsunami, no ha sido posible eliminar

las oscilaciones claramente visibles después del terremoto, correspondientes a ondas sísmicas superficiales (Sladen et al. 2010).

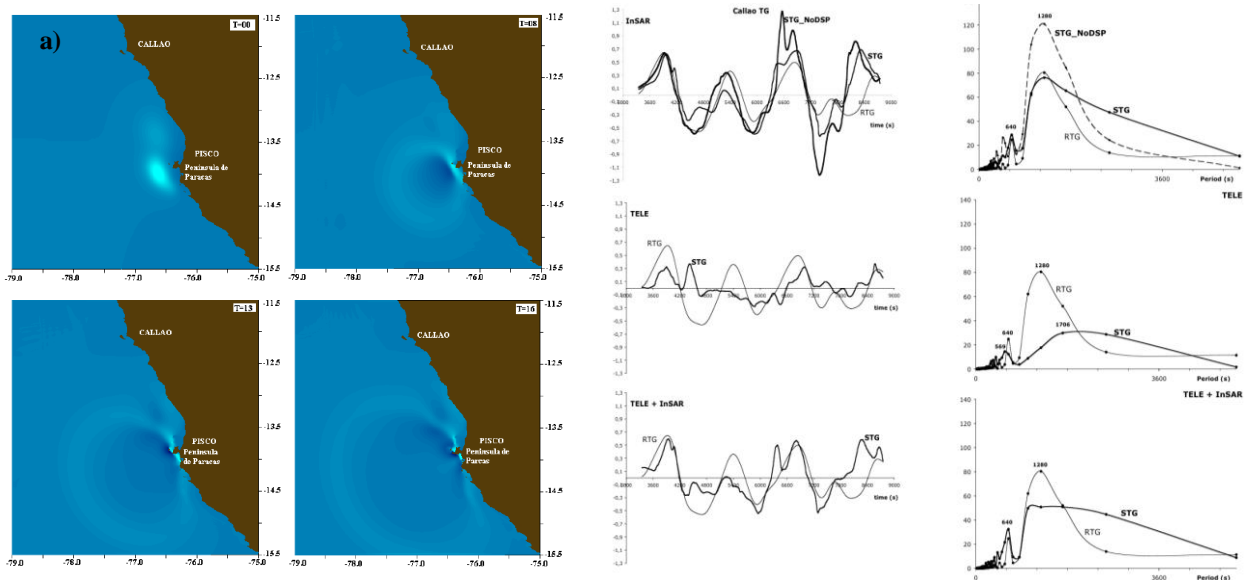


Figura 2: a) Propagación del tsunami a los 0, 8, 13 y 16 minutos, b) comparación entre el registro mareográfico observado y el calculado en la estación Callao considerando la fuente InSAR, Telesísmica y el combinado y c) Espectros de los tres registros mareográficos observados y calculados.

En este caso, el registro de la boya DART parece no ser afectado por efecto de dispersión dado que se encuentra fuera del área de influencia de la directividad del tsunami. La comparación estadística y espectral muestra un razonable ajuste entre los tres modelos, siendo la única diferencia el primer pico de amplitud reproducido por el modelo de InSAR como lo afirma Salden et al. (2010). Esta pobre representación se atribuiría a la baja resolución de la batimetría costa afuera.

3.4 Comparación y validación de mediciones de Run up

El run up representa la altura máxima de inundación del tsunami, medido con respecto al nivel medio del mar y observado durante todo el tiempo de propagación. A fin de evaluar la resolución espacial del modelamiento del tsunami de Pisco, se hace uso de los datos de run up documentados por Barrientos et al. (2007), Woodman, (2007), Ocola et al. (2007) y DHN, (2007). La información que se toma en cuenta, es únicamente el modelo de fuente InSAR y las observaciones de run up en los puntos donde se tiene buena resolución batimétrica (DHN). Adicionalmente, se procedió a realizar el modelamiento con mayor resolución batimétrica considerando un dominio computacional con resolución $dx/dy=50$ m para el área de mayor afectación

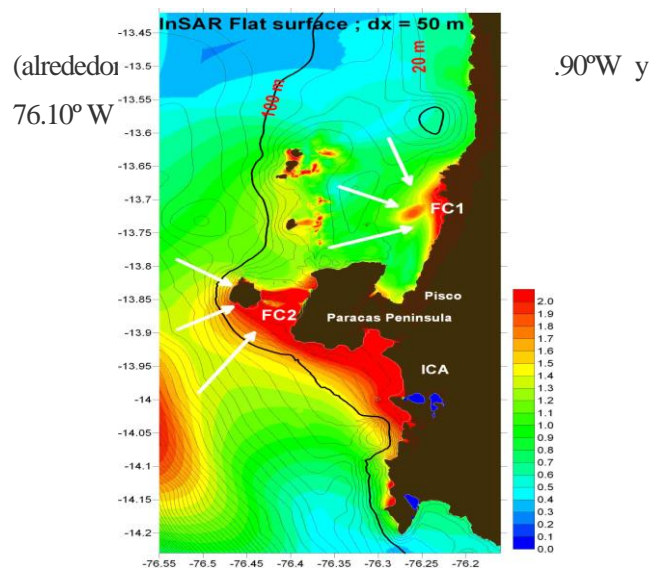


Figura 3: Mapa de distribución del run-up considerando máxima altura de ola y se identifica amplificación del como fuente el modelo InSAR. Se observa las zonas de tsunami en los puntos FC1 y FC2.

En este caso, se consideró un tiempo de propagación de 1 hora con un intervalo de tiempo $dt=0.1s$. De la comparación entre el run-up observado y el modelado considerando una resolución batimétrica de 50 m, se obtiene un factor de $corr=0.95$ y una diferencia de $STD=2\%$; lo cual demuestra la eficiencia del modelo de InSAR y de contar con una buena resolución batimétrica. Finalmente, en la Figura 3, se observa que las alturas máximas del tsunami se dieron frente a la zona de mayor desplazamiento cosísmico y mayor directividad del tsunami. Asimismo, se obtiene un factor de amplificación por focalización del tsunami, debido a la refracción de las olas en las zonas FC1 y FC2 donde se observa una forma convexa en las isobatas de 20 y 100 m.

4. CONCLUSIONES

Considerando los tres modelos de fuente propuestos por Sladen et al. (2010) para el terremoto de Pisco 2007(8.0Mw), se realizó el moldeamiento numérico del tsunami, tomando como condición inicial el desplazamiento vertical asociado a los modelos de fuente sísmica. Para tal objetivo, se consideró batimetría y topografía de alta resolución y modelo no lineal que considera el efecto de dispersión (FUNWAVE). A fin de evaluar el grado de correlación entre los registros y datos del tsunami con los resultados del modelo, se realizó un análisis estadístico y espectral de las series temporales del registro mareográfico del Callao y Boya DART 32401. La información de ambos registros mareográficos, permitió realizar la validación de la serie temporal; es decir, la amplitud y la alternación entre picos y valles de las olas. Asimismo, se determinó que la fuente obtenida por el modelo de InSAR, es el que mejor reproduce la secuencia de olas y el que mejor se ajusta a los datos de run-up. Las observaciones de campo del tsunami sugieren que el desplazamiento cosísmico fue más continuo que el sugerido a partir de data sísmológica (función temporal de la fuente el cual muestra 60 s de ausencia sísmica). La manera razonable de explicar este proceso sería asumiendo que ocurrió un significativo desplazamiento asísmico entre las dos asperezas principales y que en este caso, los datos Telesísmicos no detectan el desplazamiento asísmico tal como lo hace el modelo InSAR. De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que el desplazamiento habría sido del orden de 2 m con respecto al plano de falla. Finalmente, se observa la presencia de amplificaciones de las olas debido a la refracción y focalización del tsunami frente a la península de Paracas.

5. REFERENCIAS

- Barrientos S.E. (2007).** Informe sobre las alturas de “run-up” alcanzadas por el tsunami asociado al sismo $M_w=8.0$ del 15 de Agosto de 2007 en la zona de Pisco, Perú. www.ceresis.org.
- Beck, S.L.; Nishenko S.P. (1990).** Variations in the mode of great earthquake rupture along the central Peru subduction zone, *Geophysical Research Letters* 17 (11): 1969–1972
- Ocola, L. (2007).** Aspectos físicos del maremoto de pisco del 15 de Agosto 2007, y las inundaciones máximas. Dirección de Sismología-CNDG/IGP. Volumen especial, pp. 395-420.
- Sladen, A., H. Tavera, M. Simons, J. P. Avouac, A. O. Konca, H. Perfettini, L. Audin, E. J. Fielding, F. Ortega, and R. Cavagnoud, (2010),** Source model of the 2007 M_w 8.0 Pisco, Peru earthquake: Implications for seismogenic behavior of subduction megathrusts, *J. Geophys. Res.*, 115, B02405, doi: 10.1029/2009JB006429.
- Tavera, H., and Bernal, I. (2005).** Spatial distribution of rupture areas and seismic gaps in the western coast of Peru. Volumen Especial No. 6, Alberto Giesecke Matto, Sociedad Geologica Del Peru, p. 89-102.

Woodman, R. (2007). Observaciones del tsunami asociado con el terremoto de pisco del 15 de Agosto del 2007. Dirección de Sismología-CNDG/IGP. Volumen especial, pp. 351-370.