

**SGP**
FUNDADA 1924**Boletín de la Sociedad Geológica del Perú**Journal homepage: www.sgp.org.pe

ISSN 0079-1091

Aplicación de la transformada de wavelet para identificar eventos sísmicos generadores de tsunamis

Wilfredo Sulla, Hernando Tavera

Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, Instituto Geofísico del Perú, Calle Calatrava 216 – La Molina, Perú.
(wsulla@igp.gob.pe, hernando.tavera@igp.gob.pe)

ABSTRACT

Historically, Peru has been affected by earthquakes and tsunamis of distant local and regional type, with the latter, which can be alerted before affecting the coastal population; therefore, it is important transfer of procedures for meeting these objectives using information minimum required.

In this study, we intend to use Continuous Wavelet Transform (TCW) for the analysis of frequency content and energy released in the records of earthquakes to distances greater than 15° to the epicenter of the earthquake. The results show that earthquakes with records of low frequencies, low levels of radiation energy and long in the process of breaking, meet the characteristics to be considered as earthquakes generating tsunamis. The methodology was applied to several earthquakes originated from subduction processes with promising results.

RESUMEN

Históricamente, el Perú ha sido afectado por sismos y tsunamis de tipo local, regional y lejano, siendo estos últimos, los que pueden ser alertados antes que afecten a la población costera; por lo tanto, es importante disponer de procedimientos que permitan cumplir estos objetivos usando la información mínima necesaria.

En este estudio, se propone usar la Transformada Continua de Wavelet (TCW), para el análisis del contenido frecuencial y energía liberada contenida en los registros de sismos, registrados a distancias mayores a 15° con respecto al epicentro del sismo. Los resultados muestran que los sismos cuyos registros presentan bajas frecuencias, bajos niveles de radiación de energía y larga duración en el proceso de ruptura, reúnen las características para ser considerados como sismos generadores de tsunamis. La metodología fue aplicada a varios sismos con origen en los procesos de subducción con resultados favorables.

Palabras claves: Tsunami, sismos generadores de tsunamis, Transformada de Wavelet, frecuencia.

1. Introducción

Las grandes ciudades en el mundo se han concentrado en zonas costeras, debido a la importancia de la pesca y el comercio, situación que aumenta el riesgo de estas poblaciones ante fenómenos naturales como los tsunamis. Un tsunami, es una ola o serie de olas en un tren de ondas generadas por el desplazamiento vertical de una columna de agua a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Las olas del tsunamis a medida que se acercan hacia la costa y

dependiendo de la batimetría y topografía, pueden aumentar en altura dando lugar a grandes inundaciones en zonas costeras.

Dentro de este contexto, la margen costera del Perú ha sido sacudida por sismos de gran magnitud que han generado tsunamis que han causado considerables daños materiales y pérdidas de vidas humanas. Los últimos eventos sísmicos mayores ocurridos en Perú fueron: los sismos de Nazca en 1996 (7.6 Mw), Arequipa en el 2001 (8.2 Mw) y Pisco en el 2007 (8.0 Mw), todos ellos generaron tsunamis con olas de alturas del orden de 3 a 8

metros que causaron daños leves a moderados en las zonas costeras. De acuerdo a este escenario, es necesario establecer sistemas de alerta que sean muy efectivos en situaciones prácticas. Esta necesidad, ha llevado a muchos investigadores a buscar y proponer técnicas y metodologías que permitan reconocer eventos generadores de tsunami, haciendo uso de un número mínimo de información.

Teniendo en cuenta que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el interior de la tierra es mucho mayor que las ondas generadas por el tsunami, es posible desarrollar sistemas de alerta basados únicamente en el análisis de los registros de las ondas sísmicas. Una de las técnicas recientemente evaluadas para este fin, es la Transformada Continua de Wavelet (TCW). Muchos investigadores (Chew y Kuenza, 2009; Chamoli y Swaroopa, 2010); han hecho uso de esta técnica para evaluar el contenido frecuencial en registros de grandes sismos, proponiendo que la energía liberada y la duración de ruptura, pueden ser usados como identificadores de sismos que reúnan condiciones físicas para generar tsunamis.

Esta metodología es evaluada y aplicada a sismos regionales ($\Delta > 15^\circ$) registrados con la red Sísmica Nacional del Perú a cargo del Instituto Geofísico Perú a fin de identificar eventos generadores de tsunamis que puedan afectar a ciudades y poblaciones costeras.

2. Método de análisis

La TCW permite mejorar el procedimiento de análisis de señales en el dominio de tiempo y frecuencia de manera simultánea. El valor frecuencial, es obtenido a partir de la relación inversa con los rangos de niveles denominados "escala"; por lo tanto, la TCW analiza las señales en el dominio de tiempo y escala, tal como se muestra en la Figura 1.

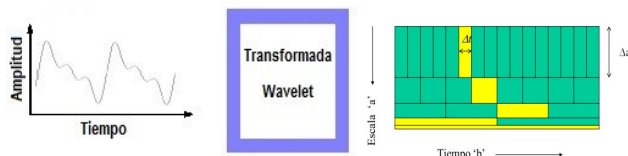


Figura 1: Esquema de la Transformada de Wavelet.

Para aplicar la TCW se utiliza como función base, $\psi_{a,b}$ (wavelet madre) definida como:

$$\psi_{a,b}^*(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$

De esta manera, la TCW es expresado como:

$$CW(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$

dónde el parámetro "a" es el factor de escala o dilatación y el parámetro "b" de traslación que en realidad proporciona la posición del tiempo. A medida que el valor de "a" aumenta, se produce el efecto de dilatación en tiempo "b" y por tanto, su contracción en el caso inverso; es decir, eventos de alta escala suelen durar en el tiempo;

mientras que, los de escala baja son breves (Figura 1). Por otro lado, para cualquier señal de frecuencia fundamental ω_0 , existe relación entre la escala y la frecuencia " ω " dada por:

$$a = \frac{\omega_0}{\omega}$$

Por ejemplo, la señal no estacionaria convolucionada a diferentes frecuencias e intervalos de tiempo y su respectivo análisis de la TCW, son mostrados en la Figura 2. Donde, la TCW en el dominio tiempo y frecuencia es el resultado de la aplicación de la ecuación anterior al dominio de la escala "a".

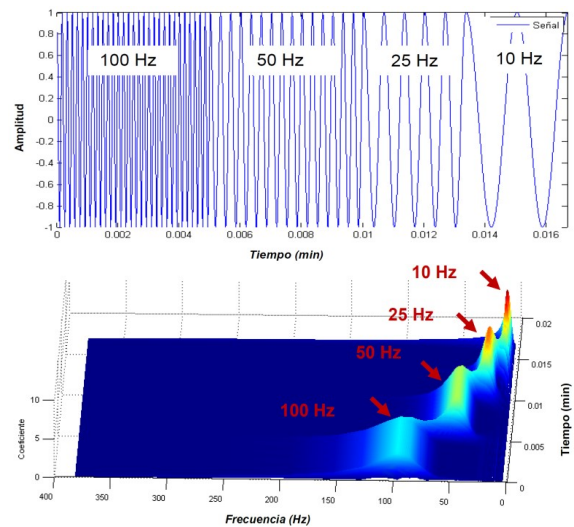


Figura 2: Señal no estacionaria (a) y su respectiva TCW (b).

Para el desarrollo de esta metodología, se ha utilizado el Wavelet madre de Morlet, por ser este la más cercana a la forma de una onda sísmica. Por otro lado, se debe comprender que el total de la energía sísmica irradiada (E_a) está contenida en los primeros minutos de la señal sísmica y es cuantificado con el cuadrado de la variación de la amplitud en diferentes intervalos de tiempo, E_a puede ser representada como:

$$E_a = \sum_a |w|^2$$

El parámetro utilizado para evaluar la amplitud espectral es "maxEa", y para su efectividad, la TCW requiere registros sísmicos que considera todo el grupo de la onda P registrado en estaciones ubicadas a distancia epicentral $> 15^\circ$. Asimismo, el grupo de la onda P permite conocer la duración del proceso de ruptura (Lomax y Michelini, 2009; Kuenza et al, 2010), y para ello a la señal se le aplica el filtro de pasabanda de 2 – 4 Hz, se le eleva el cuadrado su amplitud, se suaviza y normaliza a la unidad.

Finalmente, la duración de ruptura es considerado desde el inicio de la onda P, hasta el valor que corresponde al decaimiento de la amplitud con el intercepto al 20% con respecto a la amplitud normalizada.

3. Aplicación de la TCW al análisis espectral

Según Venkataraman y Kanamori (2004), la radiación de energía observada en la mayoría de los terremotos no generadores de tsunami (NGT) son mayores en comparación con los que generan tsunamis (GT).

Asimismo, Newman y Okal (1998), sugieren que los terremotos GT son deficientes en energía de alta frecuencia contenida en el grupo de ondas P; mientras que, el alto contenido de frecuencia (> 0.33 Hz) define a los sismos NGT (Chamoli y Swaroopa, 2010; Kumar et al., 2012). Por otro lado, según Lomax y Michelini (2009), los terremotos GT presentan procesos de ruptura que suelen durar más de 50 segundos.

En estas condiciones, los parámetros como frecuencia, energía y duración de ruptura, pueden ser usados para discriminar entre eventos sísmicos GT o NGT registrados a distancias regionales.

4. Validación

A fin de validar la metodología de la TCW propuesta en este estudio, se ha procedido a realizar el cálculo del contenido frecuencial, la máxima radiación de energía (maxEa) y la duración de ruptura para los registros de componente vertical obtenidos a distancias regionales para los sismos de la Tabla 1.

Tabla 1: Eventos sísmicos utilizados para la validación de método de la TCW.

N°	Fecha	Region	Epícentro		Mw	Prof. (Km)
			Lat (°)	Long (°)		
1	11/03/2011	Japón	38.29	142.37	9.1	20
2	29/09/2009	Samoa	-15.49	-172.09	8.1	12
3	01/04/2007	Salomón	-8.43	157.06	8.1	14
4	13/01/2007	Kuril	46.23	154.55	8.1	12
5	26/12/2006	Sur Taiwan	21.83	120.54	7.0	20
6	17/07/2006	Java	-9.28	107.42	7.7	20
7	28/03/2005	Nias, Indonesia	2.08	97.10	8.6	26
8	26/12/2004	Aceh, Indonesia	3.31	95.85	9.0	29
9	31/03/2002	N-E Taiwan	24.41	122.21	7.1	39
10	04/06/2000	Sur Sumatra	-4.72	102.09	7.8	44

Por ejemplo, para el terremoto de Sumatra del 2000, con foco superficial y magnitud 7.8 Mw, presentó su epicentro a 85 Km de la costa oeste de la región de Bengkulu y del terremoto de Java del 2006, con foco superficial y magnitud 7.7 Mw, presentó su epicentro a 190 km de la costa oeste de la región de Java. Para ambos terremotos se hace uso de los registros de la estación de CHTO (Chiang, Tailandia) y PMG (Port Moresby, New Guinea), tal como muestra al Figura 3. Los resultados para la duración de ruptura y análisis de la TCW son mostrados en la Figura 4 y 5.

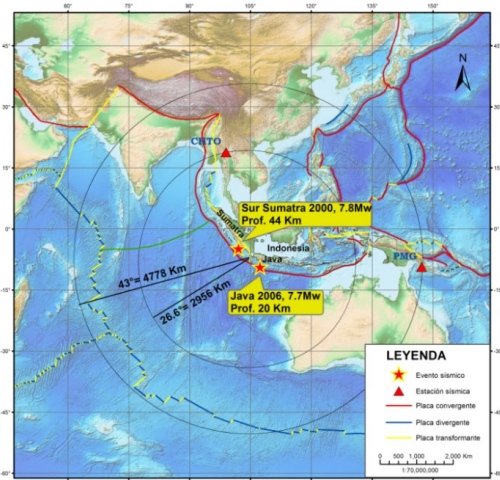


Figura 3: Terremotos ocurridos en Indonesia (estrellas) y estaciones sísmicas utilizadas en este estudio (CHTO y PMG).

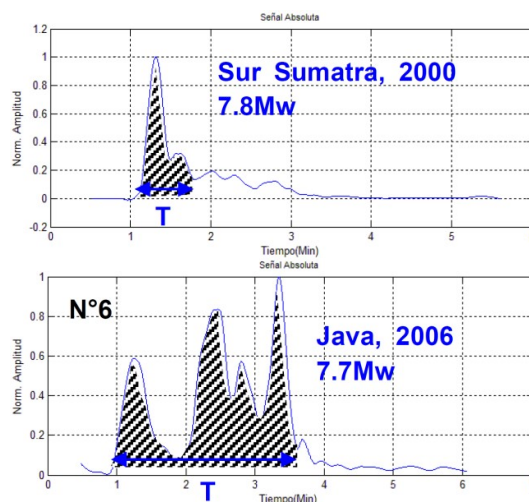


Figura 4: Duración de ruptura para los terremotos de Sumatra (2000) y Java (2006).

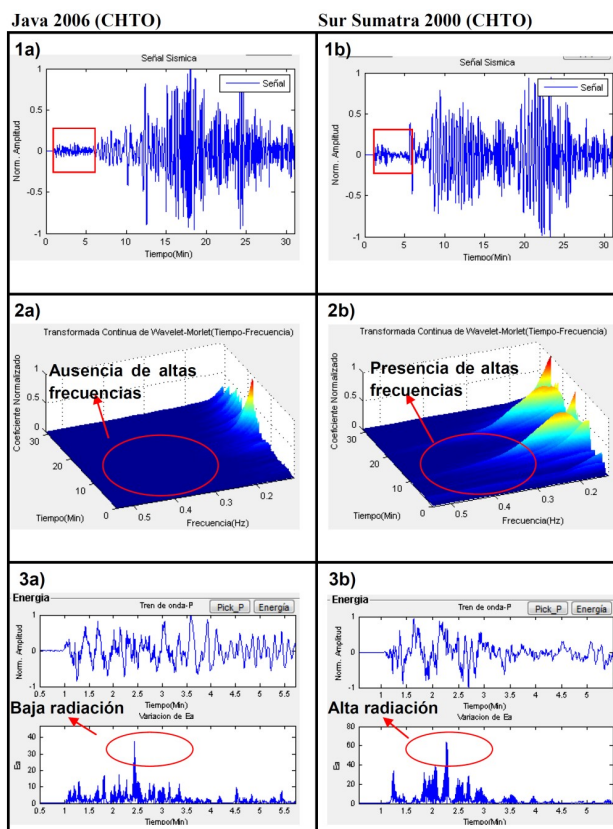


Figura 5: Análisis TWC para los terremotos de Indonesia: Señal sísmica del terremoto del 17 de julio del 2006, Java (1a), análisis frecuencial (2a) y el cálculo de radiación de energía (3a). Asimismo, la señal sísmica del terremoto del 04 de junio del 2000, Sur de Sumatra (1b), análisis frecuencial (2b) y el cálculo de radiación de energía (3b).

Según sus parámetros hipocentrales, ambos eventos sísmicos fueron reportados como generadores de tsunami; sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, el terremoto de Java (2006), presenta bajas frecuencias, baja radiación de energía y larga duración de ruptura; por lo tanto es considerado como evento GT.

Después de ocurrido el sismo, se produjo un tsunami con olas de ~10 metros de altura que inundó la costa oeste de la región de Java y dejó como saldo la muerte de más de 700 personas. También produjo daños en 40% de los edificios en las ciudades de Dara Payung, BulakLaut, Pameungpeuk, BatuHitu, Pangandaran y Sindongkarta. Para el sismo de Sumatra (2000), se observa la presencia de altas frecuencias, alta radiación de energía y corta duración de ruptura, siendo definido como evento NGT. Después de ocurrido el sismo, no generó tsunami.

El análisis de la TCW se aplico para el total de eventos ocurridos en la Tabla 1 y su correlación se muestra en la Tabla 2, se observa que existe correspondencia entre los parámetros evaluados de sismos GT y NGT.

Tabla 2: Parámetros sísmicos de Frecuencia, máxima radiación de energía y duración de ruptura para los terremotos utilizados en este estudio.

N°	Fecha	Region	Frecuencia (Hz)	Max. Energía irradiada	Duración Rup. (seg)	Comentario
1	11/03/2011	Japón	0.27	17.96	109.6	GT
2	29/09/2009	Samoa	0.25	5.92	116.5	GT
3	01/04/2007	Salomón	0.20	41.53	106.7	GT
4	13/01/2007	Kuril	0.25	36.14	84.8	GT
5	26/12/2006	Sur Taiwan	0.30	48.52	74.5	GT
6	17/07/2006	Java	0.23	36.65	155.8	GT
7	28/03/2005	Nias, Indonesia	0.45	55.73	130.8	NGT
8	26/12/2004	Aceh, Indonesia	0.30	11.94	478.2	GT
9	31/03/2002	N-E Taiwan	0.50	118.72	47.3	NGT
10	04/06/2000	Sur Sumatra	0.45	63.07	43.6	NGT

GT = Genera Tsunami
NGT = No Genera Tsunami

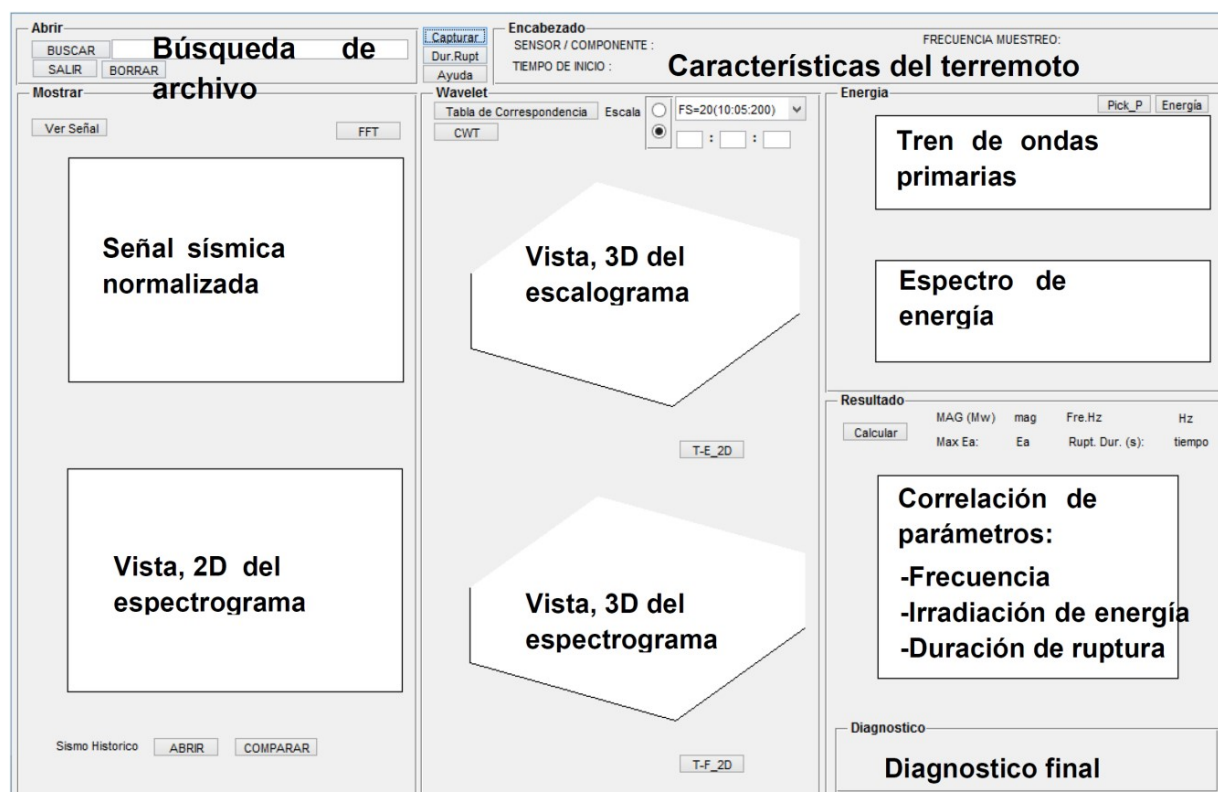


Figura 6: Interfaz del algoritmo "AlerTsun".

En conclusión, cualquier sismo regional GT debe cumplir las siguientes características:

Hipocentro ubicado en el fondo oceánico.

Magnitud $M_w \geq 7.0$.

Contenido frecuencial $F < 0.3$ Hz.

Radiación de energía $\max E_a > 50$.

Duración de ruptura > 50 seg.

La metodología propuesta, ha permitido discernir de manera efectiva entre eventos GT y NGT, su integración en un algoritmo será una importante herramienta a ser usada en la alerta temprana de tsunamis.

5. Aplicación al Perú

Para la aplicación de AlerTsun en Perú, se propone dos escenarios:

- Sismos ocurridos en el litoral peruano y registrados por estaciones de la Red Sísmica Mundial ubicados a distancias $\Delta > 15^\circ$.
- Sismos ocurridos a distancias $\Delta > 15^\circ$ y registrados por la estaciones de la Red Sísmica del Perú.

La metodología es aplicada a dos eventos sísmicos. El terremoto de Guerrero (México) del 18 de abril del 2014, con epicentro en el mar y magnitud 7.3 Mw, y el terremoto de Chimbote (Perú) del 21 de febrero de 1996, con epicentro en el mar y magnitud 7.7 Mw. El primero registrado en la estación de NNA (Lima, Perú) y el segundo en la estación SDV (Santo Domingo, Venezuela). En la Tabla 2, se muestra los parámetros hipocentrales de cada evento sísmico y en la Figura 7, su ubicación epicentral y las estaciones sísmicas usadas en este estudio.

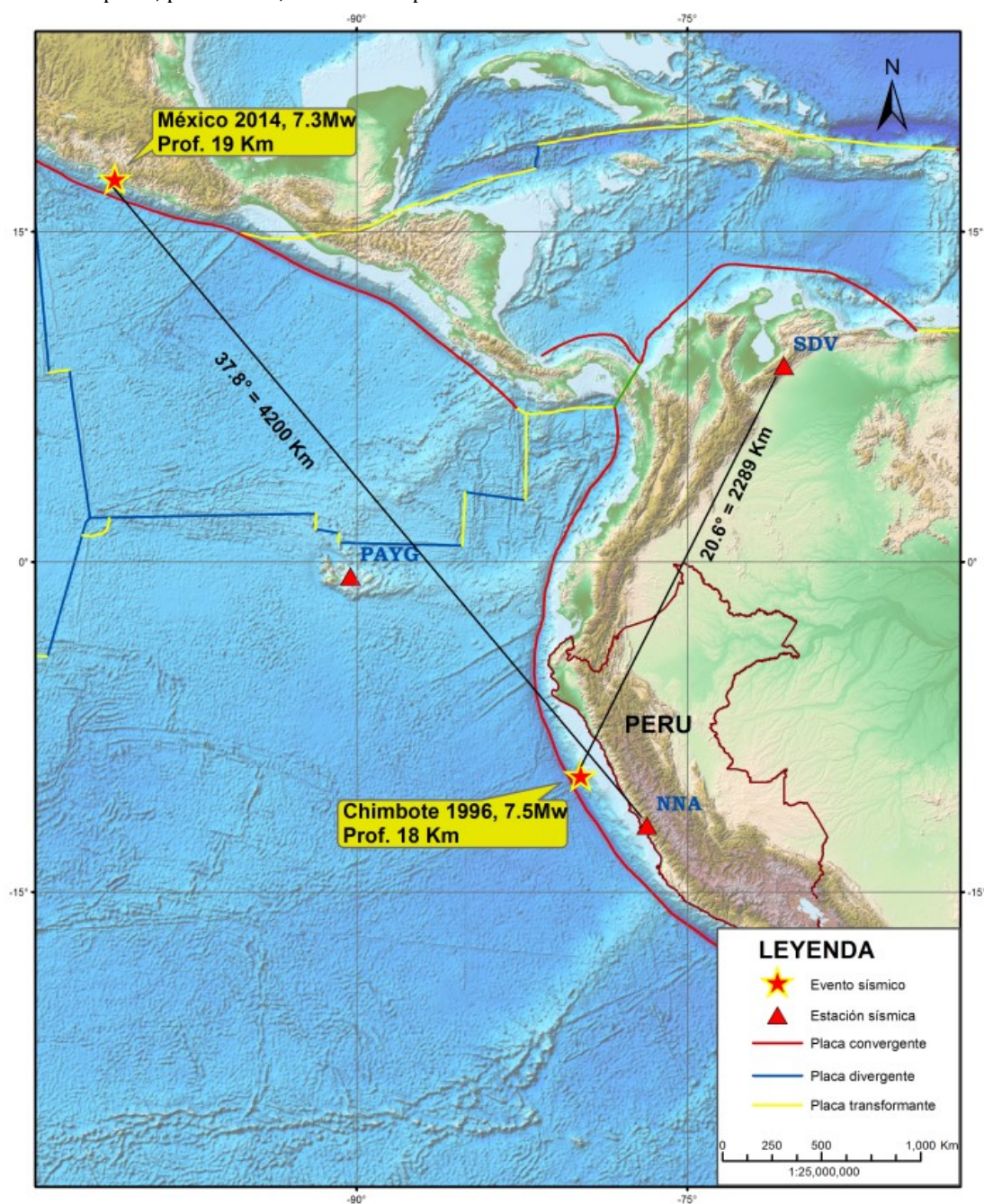
Tabla 3: *Parámetros hipocentrales de los sismos utilizados en este estudio.*

Fecha	Region	Epicentro		Mw	Prof. (Km)
		Lat (°)	Long (°)		
Sismos Regionales					
18/04/2014	Guerrero, México	2.08	97.10	7.3	19
Sismos Locales					
21/02/1996	Chimbote	-9.87	-80.36	7.5	18

Para el sismo de Guerrero del 2014 (Figura 8), la señal presenta altas frecuencias, altos contenidos de energía y corta duración de ruptura; por lo tanto, es calificado por el

algoritmo como sismo NGT. Después de ocurrido el sismo, no genero tsunami.

El análisis del registro para el evento de Chimbote (Figura 9), y según los resultados, muestra la ausencia de altas frecuencias, baja radiación de energía y larga duración de ruptura; por lo tanto, el sismo es considerado como GT. Después de ocurrido el sismo, se generó un tsunami con olas de hasta ~5 metros de altura en la costa de la ciudad de Chimbote, produciendo la muerte de 12 personas, 54 heridos, 37 viviendas dañadas (15 totalmente destruidas).

**Figura 7:** *Distribución espacial de los terremotos (estrellas) utilizados en la aplicación al Perú.*

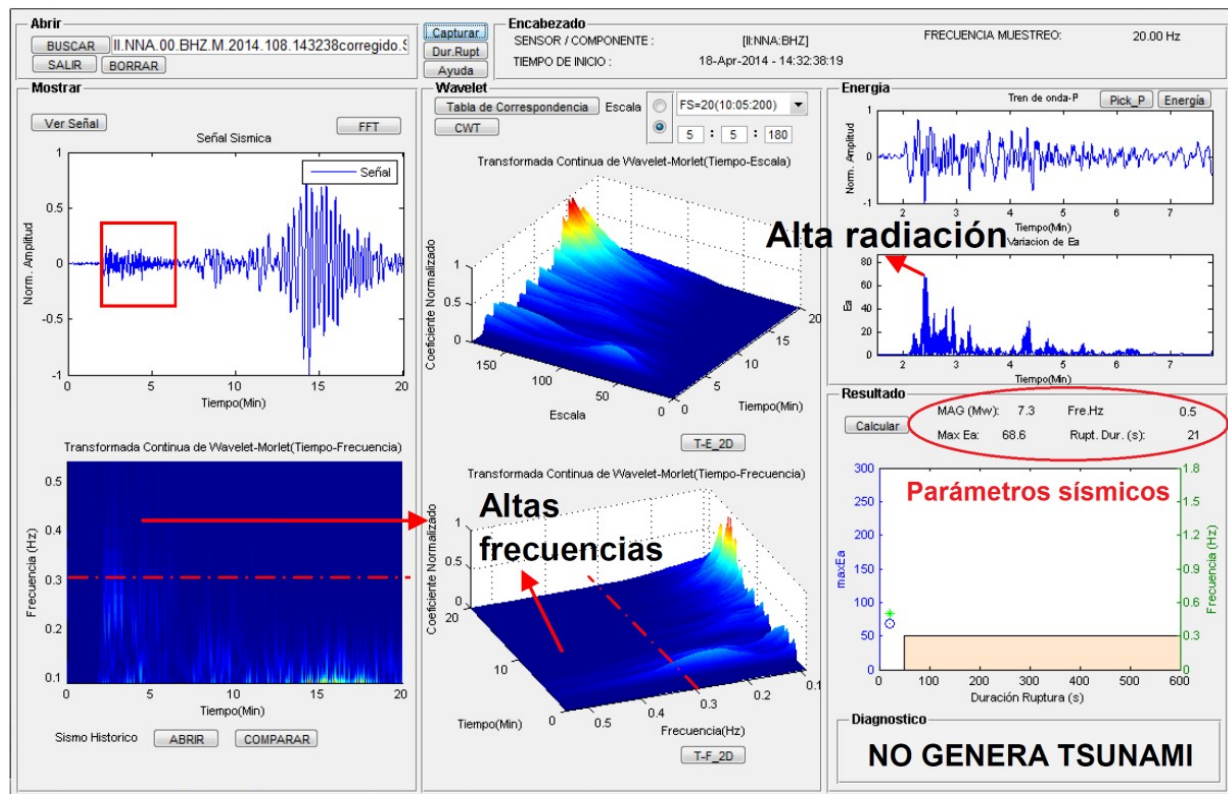


Figura 8. Análisis de la TCW para el Sismo de Guerrero, México 2014 (7.3Mw).

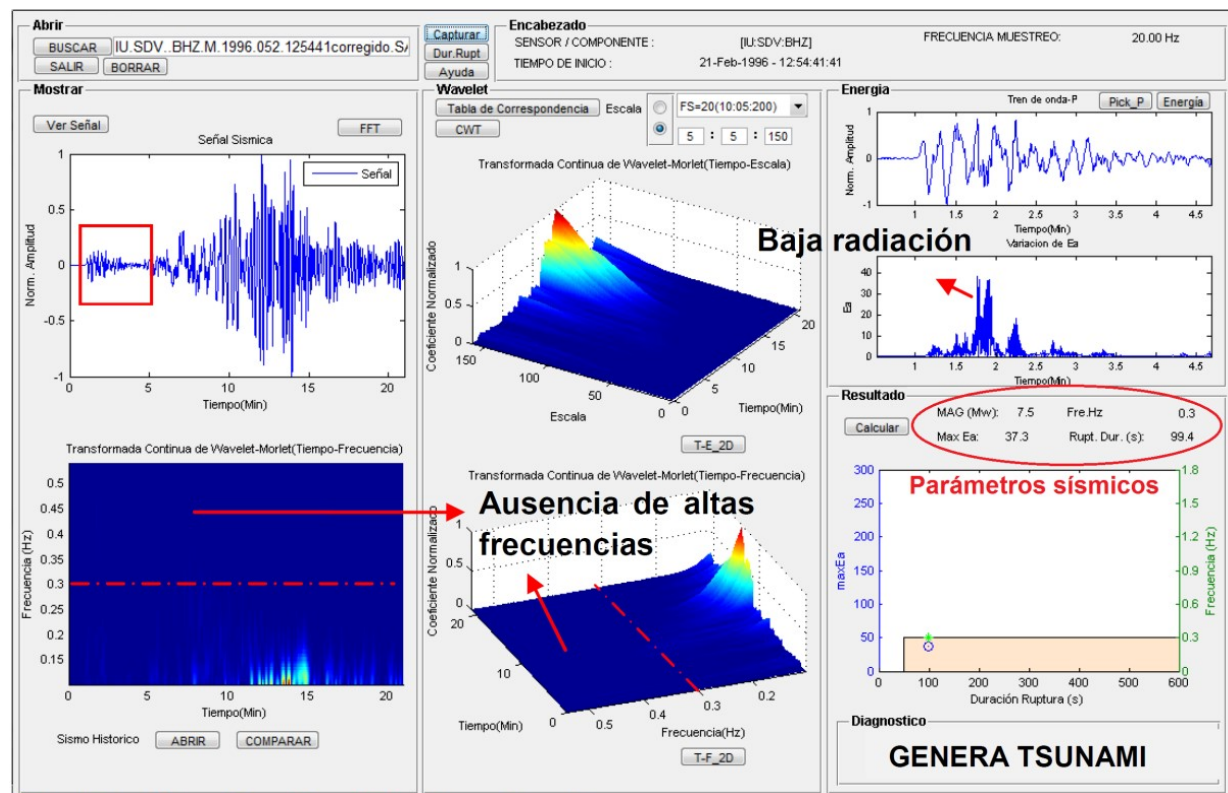


Figura 9: Análisis de la TCW para el Sismo de Chimbote 1996 (7.5Mw).

6. Conclusiones

En el presente estudio se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Se ha demostrado que el contenido frecuencial en las señales sísmicas, la energía liberada y el proceso de ruptura pueden ser parámetros a evaluar para discriminar entre eventos GT y NGT a distancias regionales ($\Delta \geq 15^\circ$).

El algoritmo AlerTsun es un aporte importante para la Alerta temprana de Tsunamis regionales en el Perú y será integrado al Servicio Sismológico Nacional del Instituto Geofísico del Perú para los fines del caso.

Referencias

- Convers, J. y Newman, A., 2013. Rapid earthquake rupture duration estimates from teleseismic energy rates, with application to real-time warning. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, 1–5, doi: 10.1002/2013GL057664.
- Cortes, J. y Medina, F. 2007. Del análisis de Fourier a las Wavelets. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 34, ISSN 0122-1701.
- Chew, S. H. y Kuenza, K. 2009. Detecting tsunamigenesis from undersea earthquake signals. *J. Asian Earth Sciences*, 36, 84–92, 2009.
- Chamoli, A., Swaroopa R. V., Srivastava, K., Srinagesh, D. y Dimri, V.P. 2010. Wavelet analysis of the seismograms for tsunami warning. *Nonlin. Processes Geophys*, 17, 569–574.
- De Castro, R. 2002. Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en la ingeniería eléctrica: Fundamentos. Tesis de Ingeniería. E.T.S.I. Industriales. 80 pg.
- Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú. Tsunamis. *Revista de tsunamis*, v. 2010.
- Kuenza, K. 2010. Study of Tsunamigenesis of earthquake. A thesis submitted for the degree of doctorate of philosophy. National University of Singapore. 368 pg.
- Lockwood, O. G. y Kanamori, H. 2006. Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7(9), Q09013(1–10), doi: 10.1029/2006GC001272.
- Lomax, A. y Michelini, A. 2009. Tsunami early warning using earthquake rupture duration. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L09306, doi: 10.1029/2009GL037223.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E. y Giard, D. 1982. Wave propagation and sampling theory-part 1: complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2), 203–221.
- Newman, A. V. y Okal, E. A. 1998. “Tele-seismic estimates of radiated seismic energy: The E/Mo discriminant for tsunami earthquakes”, *Journal of Geophysical Research*, 103, 26, p. 885– 26, 898.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Información sobre tsunamis <<http://www.noaa.gov/>>.