

# VARIACIÓN ESPACIO -TIEMPO DE LOS PROCESOS DE RUPTURA DE SISMOS PROFUNDOS A DISTANCIAS TELESÍSMICAS

Williams Mamani Puma & Hernando Tavera

Instituto Geofísico del Perú/Sección de Sismología

[perpuma@hotmail.com](mailto:perpuma@hotmail.com)

[htavera@geo.igp.gob.pe](mailto:htavera@geo.igp.gob.pe)

## INTRODUCCIÓN

Conocer la distribución espacial de la ruptura desarrollada por grandes sismos es un tema latente en la sismología, lo que ha permitido proponer metodologías cada vez más complejas teniendo en cuenta la diversidad de rupturas que se presentan. En los años 80, se hacía uso de métodos basados directamente en el análisis de las formas de la onda, siendo su aplicación exitosa debido a que la onda P registrada a distancias telesísmicas se encuentra libre de las interferencias, sobre todo cuando se considera sismos de foco profundo (>500 km). En la actualidad, estos sismos no tienen una explicación clara de cuál es su origen, aunque se han planteado dos importantes hipótesis. La primera considera su origen similar a los sismos de foco superficial, pero en este caso la deformación se debería a fuerzas opuestas asociadas a la gravedad (Grigs y Baker, 1969; Frohlich 1989, Kanamori et al, 1998; Karato et al, 2001). La segunda hipótesis asocia el origen de los sismos profundos a las transformaciones mineralógicas de Olivino a Espinela como consecuencia del aumento de la temperatura y la presión a grandes profundidades (Kirby 1992, Green y Burnley 1989). La complejidad de los procesos de ruptura de sismos de foco profundo puede ser conocida aplicando la metodología de Fukao (1972), que parte del análisis de las formas de onda contenida en el registro del sismo obtenido a distancias telesísmicas. El método permite conocer la ocurrencia aleatoria de dos o más eventos, así como, los posibles efectos de directividad, asociados a cada sub-evento o ruptura. El método fue aplicado a cuatro eventos de foco profundo ocurridos el 24/05/2010 en la zona de la frontera de Perú-Brasil (profundidad 581 km, 6.5 Mw); sismo ocurrido el 01/01/2011 en la región norte de Argentina (profundidad de 576 km, 7.0 Mw), sismo ocurrido el 07/05/2008 en el mar de Okhotsk (profundidad de 632 km, 7.7 Mw) y el último ocurrido el 18/02/2010 en el mar de Japón (profundidad de 577 y 6.9 Mw).

## METODOLOGÍA

Los procesos de ruptura de los sismos profundos se realiza a partir del análisis de las formas de onda de sus registros obtenidos a distancias telesísmicas y aplicando la metodología propuesta por Fukao (1972). El método permite identificar el número de rupturas aleatorias, su distribución espacial sobre el plano de ruptura, los tiempos de origen de cada ruptura, la distancia entre subeventos y la dirección de propagación de la ruptura. Durante la ruptura, de producirse más de un evento, debe considerarse que existe una distancia L entre dos subeventos y por lo tanto, una diferencia de tiempo  $\tau_{on} - \tau_{o1}$ , y para determinar el tiempo de origen ( $\tau_j^{in}$ ) se plantea de la siguiente hipótesis. El tiempo de propagación de la ruptura depende de la geometría y la velocidad de las ondas a diferentes direcciones; por lo tanto, sería la suma de los tiempos de viaje entre la fuente (cada subevento) y cada estación, tal como se esquematiza en la Figura 1. La variación de los tiempos de llegada a diferentes estaciones está controlada por el ángulo de  $\cos(\delta j)$ .

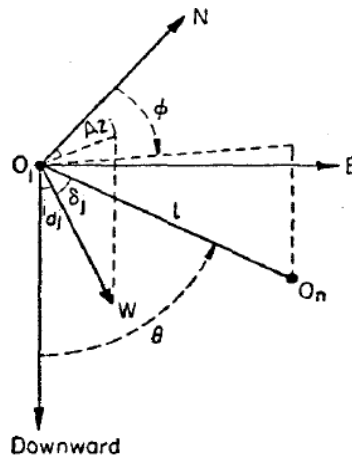
$$\tau_j^{in} = \tau_{on} - \tau_{o1} - \frac{L}{V_p} \cdot \cos(\delta j) \dots \dots \dots eq(1)$$

Done:  $j = 1, 2, 3, \dots; \quad n = 2, 3$

De la Figura 1, las variables de  $\cos(\delta j)$ , se definen como:

$$\cos(\delta j) = \cos(idj) \cos(\theta) + \sin(idj) \cdot \cos(AZj) \cdot \sin(\theta) \cos(\phi) + \sin(idj) \sin(AZj) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

En la Figura 1, se observa la esquematización de la fuente y la presencia de los subeventos



**Figura -1.** Esquema para la representación y orientación de la fuente sísmica (coordenadas esféricas), el registro de subeventos. El primer (O1) y segundo evento (On) están separados por una distancia L.

En la Figura 1 se distinguen los siguientes parámetros;  $\tau_{ij}$  es la diferencia de tiempo del primer arribo  $t$  y el segundo evento en  $n$ -estaciones ( $j$ - $n$  estaciones);  $\tau_{O1}$ , es el tiempo de arribo del primer evento (primer ruptura);  $\tau_{On}$ , es el tiempo de arribo del segundo evento (segunda ruptura),  $L$ , distancia de separación entre los  $n$ -eventos;  $V_p$ , velocidad de la onda P;  $\delta_j$ , ángulo de relación entre eventos de la fuente y la relación del rayo de propagación a  $n$ -estaciones;  $\phi$ , azimut del segundo evento con relación del primer evento;  $\theta$ , ángulo del vertical del segundo evento en relación al primero;  $idj$ , ángulo de incidencia del rayo sísmico a  $n$ -estaciones;  $Az_j$ , distribución de azimut de las estaciones seleccionadas.

La metodología descrita fue aplicada a cuatro eventos de foco profundo ocurrido en diferentes partes del mundo. En este estudio se describe los datos utilizados y resultados obtenidos para el sismo ocurrido en la región norte de Argentina el 1 de enero de 2011, a una profundidad de 576.0 km y con una magnitud de 7.0 Mw. La ubicación del epicentro del sismo y estaciones sísmicas utilizadas se presenta en la Figura 2 y el procedimiento seguido es:

1.- De la red mundial se han seleccionado el registro de 24 estaciones ubicadas a distancias telesísmicas ( $30^\circ < \Delta < 90^\circ$ ). Se ha considerado estaciones con registros de bajo nivel de ruido y aceptable cobertura azimutal.

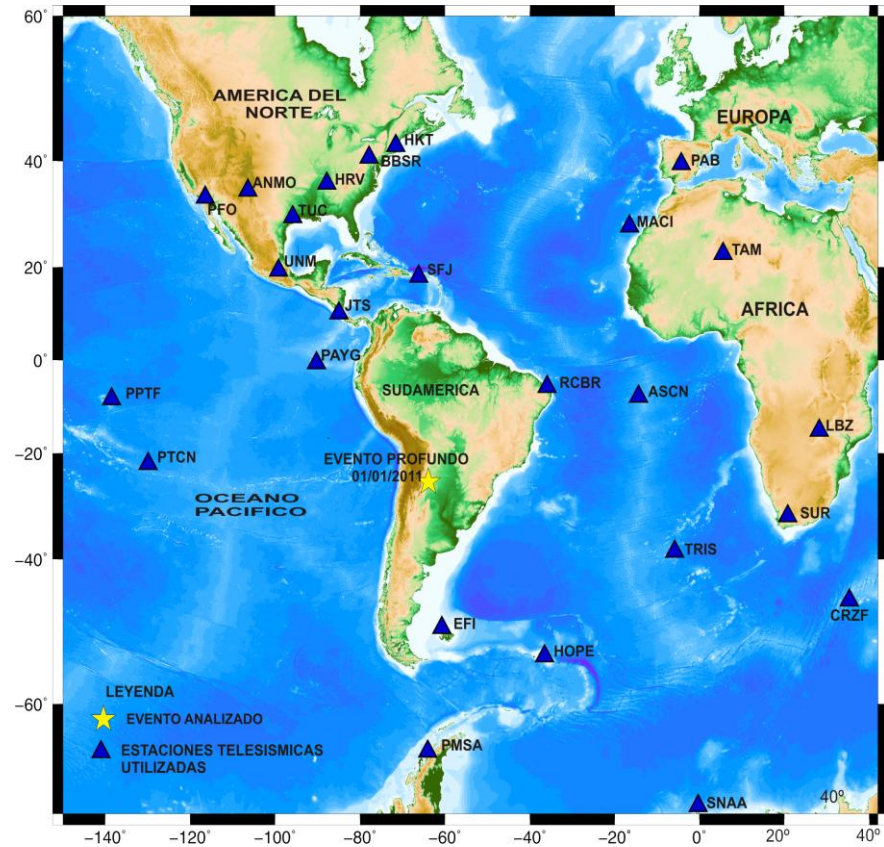
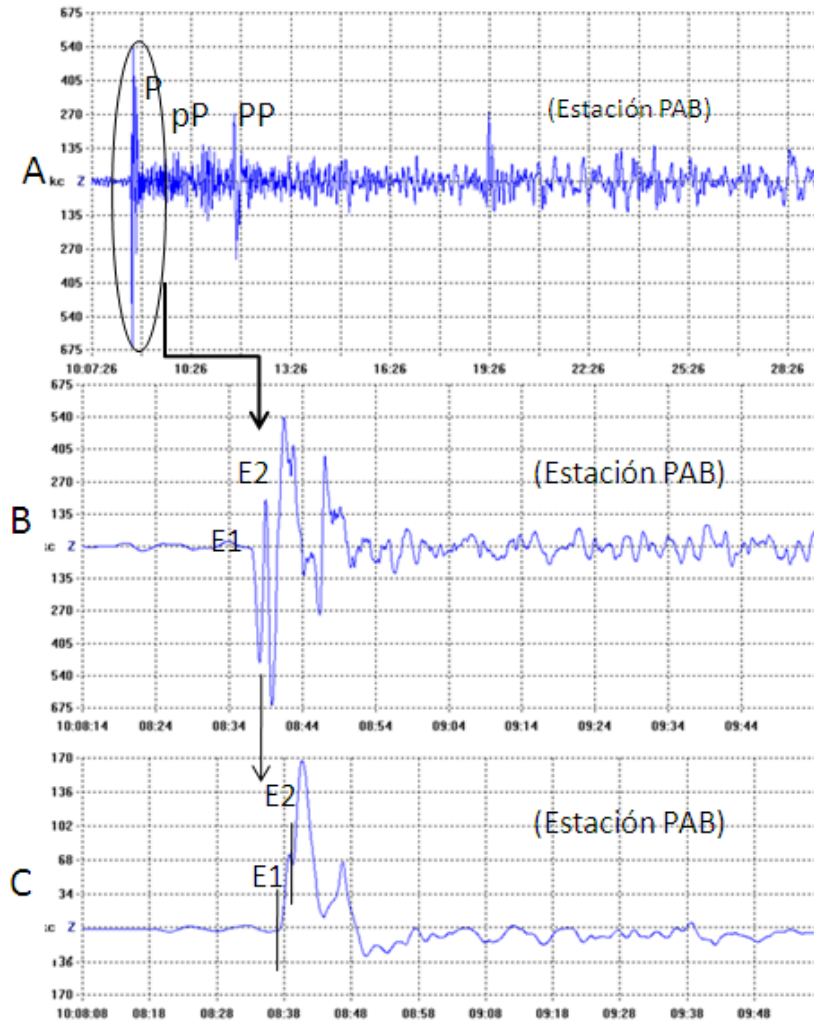


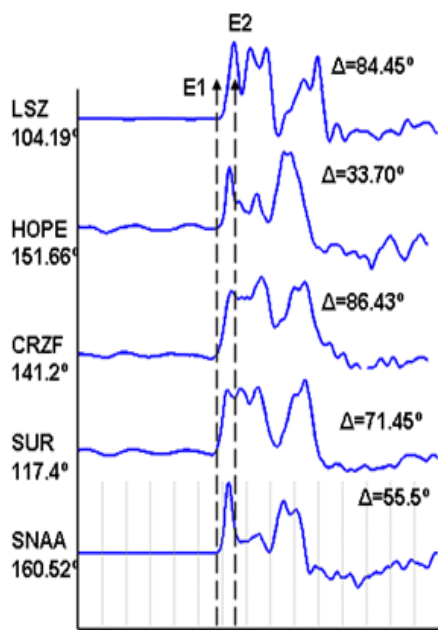
Figura-2. Mapa de ubicación del epicentro del sismo de Argentina y de las estaciones sísmicas cuyos registros se utilizan en el presente estudio.

2.- Se hace uso de la componente vertical del registro de la señal en velocidad, que al ser integrado, se obtiene el registro de desplazamiento del suelo. Se procesa a identificar el posible registro de subeventos por el cambio de la polaridad de las fases de la onda P. Para el sismo de Argentina se ha identificado la posible ocurrencia de dos subeventos (E1 y E2).



**Figura-3.** Señal sísmica del sismo de Argentina en la estación de San Pablo – España (PAB). A) registro en velocidad, B) registro del grupo de la fase P. Se observa el registro de al menos dos subeventos y C) registro en desplazamiento y tiempos de llegada de los dos subeventos, E1 y E2.

3.- El total de registros son correlacionados en función de la distancia y azimut a fin de identificar en todos el registro de los dos subeventos, E1 y E2. En la Figura 4, se muestra la correlación para el registro de 4 estaciones.



**Figura-4.** Correlación entre las formas de onda del grupo de la P. Se indica distancia epicentral y azimut epicentro-estación.

Luego se procede a realizar la lectura de los tiempos de arribo de los subeventos en cada uno de los registros seleccionados y los resultados se presentan en la Tabla 1

ESTACION	LAT(°)	LONG(°)	DIST.EPI(°)	AZIMUT(°)	ANG.IND.(°)	t (seg)
ANMO	34.94	-106.45	74.12	324.08	37	1.7
ASCN	-7.93	-14.36	49.87	77.1	51	1.8
BBSR	32.37	-64.69	59.23	358.47	46	1.7
DWPF	28.11	-81.45	57.69	340.79	47	1.9
HKT	29.96	-95.86	64.96	328.73	42	1.9
HOPE	-54.28	-36.48	33.68	151.68	62	1.8
HRV	42.5	-71.55	69.78	353.36	38	1.5
JTS	10.29	-84.95	42.74	327.28	56	1.8
LSZ	-15.27	28.18	84.33	104.19	64	1.2
MACI	28.25	-16.5	70.98	42.79	38	1.9
PAB	39.54	-4.35	86.05	41.54	31	2.4
PAYG	-0.67	-90.28	36.94	310.47	60	1.9
PMSA	-64.77	-64.04	37.94	180.62	58	3.4
RSSD	44.12	-104.03	80.22	331.39	36	3.2
SJG	18.1	-66.15	45.05	355.94	56	1.8
SLBS	23.68	-109.94	67.79	313.71	39	2
SSPA	40.63	-77.88	68.85	347.99	39	1.1
SUR	-32.28	20.84	71.27	117.4	37	1.9
TUC	32.31	-110.78	74.53	319.46	36	3
WVT	36.13	-87.85	67.13	338.42	41	1.7
HDC	10.02	-84.11	42.09	328.15	57	1.9
SNAA	-71.67	-2.3	55.42	160.52	56	1.8
TAM	22.79	5.52	82.87	60.07	30	2.6
UNM	19.32	-99.18	57.9	318.91	45	1.8

**Tabla 1.** Relación de las 24 estaciones sísmicas utilizadas en este estudio. Se consigna para estación sus coordenadas geográficas, distancia epicentral, azimutes, los ángulos de incidencia y la diferencia de los tiempos entre los eventos E1 y E2.

5.- De acuerdo a la metodología, se hace uso de los datos consignados en la Tabla 1 y la ecuación 1. La solución se realizó mediante la ejecución de un algoritmo computacional que nos permite estimar el valor del ángulo  $\cos(\delta j)$ . La aproximación está en función de la ecuación  $y = a + b \cdot \cos(\delta j)$  y la solución obtenida para el evento de Argentina se muestra en la Figura -5.

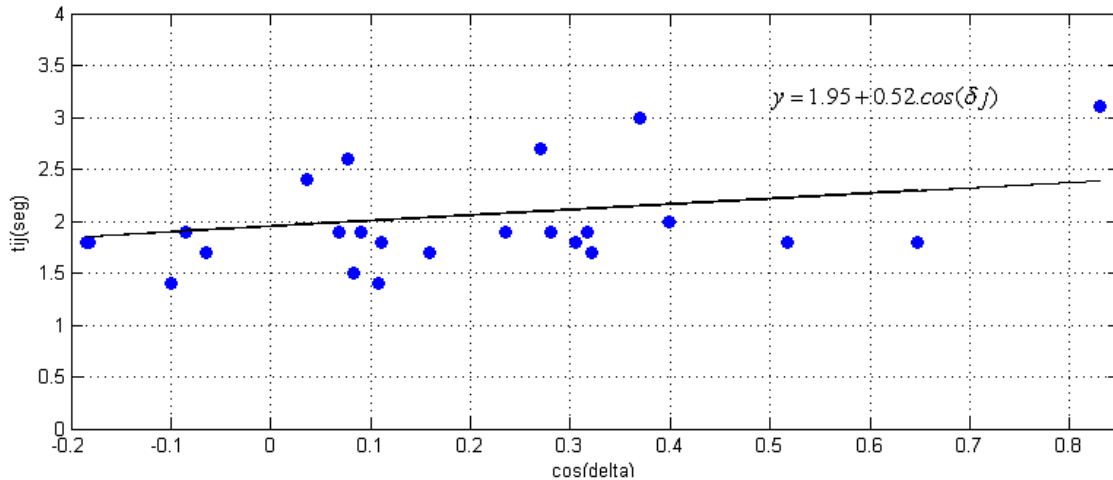


Figura-5. Relación entre los subeventos E2 y E1, y el ángulo  $\cos(\delta j)$

- Según los resultados obtenidos y de acuerdo a la ecuación 1, el valor 0.52 corresponde a la relación  $L/V_p$  y el de 1.95 al promedio de la diferencia de tiempos de llegada de los eventos E1 y E2. Si consideramos la profundidad del foco sísmico y las tablas de IASPEI, para la onda P le corresponde una velocidad de 10.5 km/seg, lo que permite obtener una distancia entre ambos eventos de 5.46 km. De acuerdo al ajuste obtenido en la Figura 5, la dirección de propagación de la ruptura es de  $178.5^\circ$  SSE a partir del punto de inicio de la misma.
- De acuerdo a los tiempos de ocurrencia de ambos eventos (E1 y E2) y la distancia existente entre ellos, se estima una velocidad de ruptura de 2.79 km/seg.

## CONCLUSIONES

- Para el evento profundo de Argentina ocurrido el 1/01/2011 de (7.0 Mw), se identificó la ocurrencia de dos subeventos o rupturas aleatorias separadas por una distancia de 5.46 km y con una dirección de propagación de  $178.7^\circ$  SSE. La velocidad aparente de ruptura es de 2.79 km/seg.
- Para el evento profundo de mar de Okhotsk ocurrido el 07/05/2008 de (7.7 Mw) se identificó tres rupturas aleatorias, siendo la distancia de separación entre estas de 9.03 km y 2.07 km con una dirección de ruptura de  $179.8^\circ$  SSE y  $223.5^\circ$  SSW respectivamente. Las velocidades de ruptura aparente son de 2.92km/seg. y 0.66 km/seg respectivamente.
- Para el evento profundo en la zona del mar Japón ocurrido el 18/02/2010 de (6.9 Mw) se identificaron dos rupturas separadas por una distancia de 7.84 km y propagación en dirección de  $98.5^\circ$ NE. La velocidad aparente de ruptura fue de 2.94 km/seg.

- Para el evento profundo de la frontera Perú-Brasil ocurrido el 24/05/2010 de (6.5 Mw), se identificaron tres rupturas aleatorias separadas por 8.2 km y 3.5 km respectivamente, siendo su dirección de propagación de 291.3° NW y 341.2° NW. Las velocidades de ruptura fueron de 2.24 km/seg y 1.53km/seg.

## REFERENCIAS

Aki, K. (1980). Seismology cuantitative: theory and methods, vol New York, 491-497

Chu, R. & Helmberge, D.(2004).Determination of Earthquakes focal Depths and Source Time Functions in central using Telesismic P Waveforms. Geophysical Research Letters. Vol 109, 1-15.

Chun, W. & Kanamori, H. (1976).Source Process and Tectonic Implication of the Spanish Deep-Focus Earthquake of March 29, 1954./Physics of the Earth and Planetary Interiors. 13, 1-12.

Fukao, Y. (1972). Focal Process of a deep focus Earthquakes as Deduced from Long P and S Waves/ Earthquakes Research Institute.vol12, 30-45.

Green, H. & Burnley, P. (1989). Mechanism for Deep-focus Earthquakes. Nature 341, 733-756

Houston H.(2002). Earthquake Seismology: Deep Earthquakes Dept. Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, WA, USA 206 616-7092

Kanamori, H. & Brodsky, E. (2004).The Physics of Earthquakes, Seismological Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena USA/Rep.Prog.Phys.67,1-67.

Kikuchi, M. & Kanamori, H.(1994).The mechanism of the deep Bolivia earthquake of June 9, 1994. Geophysics. Res. Left., 21, 2341-2344.

Tavera, H. (1992). Procesos de Ruptura; Sociedad Geológica del Perú/ Boletín de la sociedad Geológica del Perú.83, 1-5.

Tibi, R. y Wiens, D. (2002). Source Characteristics of Large Deep Earthquakes: Constraint on the Faulting Mechanism at Great Depths. / Journal of Geophysical Research, vol. 10b, 1-25