

Características de la fuente del terremoto de Nepal 2015

Source characteristics of 2015 Nepal earthquake

César Jiménez Tintaya*
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

RESUMEN

En esta investigación se calcularon los parámetros que caracterizan a la fuente sísmica del terremoto de Nepal 2015 (7.9 Mw) utilizando un modelo numérico de inversión de formas de ondas telesísmicas. Los datos sísmicos se obtuvieron de 57 estaciones sísmicas de la red mundial IRIS para las distancias epicentrales entre los 30° y 90°. Para el cálculo del proceso de inversión se utilizaron 80 señales sísmicas entre ondas P y SH. Los resultados muestran un proceso de ruptura múltiple o complejo con una propagación unidireccional y directividad hacia el Sur-Este, la duración del proceso de ruptura fue alrededor de 90 s. El mecanismo focal indica una falla de tipo inverso con un ángulo de buzamiento casi horizontal de 10° para una profundidad superficial de 15 km. La zona de máxima liberación de energía (o aspereza) se concentra en el centro de la geometría de ruptura y al Oeste de Katmandú. El momento sísmico escalar de 8.53×10^{20} Nm, equivale a una magnitud de momento de 7.9 Mw. La máxima dislocación (slip) se calculó en 5.2 m. Luego del terremoto, la ciudad de Katmandú se desplazó 1.40 m en dirección sur-oeste y se levantó 0.91 m, según los cálculos obtenidos.

PALABRAS CLAVE: fuente sísmica, inversión, terremoto de Nepal.

ABSTRACT

In this research, the parameters that characterize the seismic source of Nepal 2015 earthquake (Mw 7.9) were calculated, using a numerical model of teleseismic waveforms inversion. Seismic data were obtained from 57 seismic stations of worldwide network IRIS for epicentral distances between 30° and 90°. To compute the inversion process, 80 seismic signals of P and SH waves are used. The results show a multiple or complex rupture with a unidirectional propagation and directivity to the South-East, the duration of the rupture process was around 90 s. The focal mechanism indicates a thrust fault with an almost horizontal dip of 10° for a shallow depth of 15 km. The area of maximum energy release (or asperity) is concentrated in the center of the rupture geometry and to the West of Kathmandu. The scalar seismic moment is 8.53×10^{20} Nm, which is equivalent to a moment magnitude of 7.9 Mw. The maximum displacement (or slip) is estimated to 5.2 m. After the earthquake, the city of Kathmandu moved 1.40 m to the South-West and uplifted 0.91 m, according to results obtained.

KEYWORDS: seismic source, inversion, earthquake of Nepal.

Recibido: 15/06/2015

Aprobado: 07/08/2015

* Laboratorio de Física de la Tierra. Dirección de Hidrografía y Navegación - División de Geofísica. <cjimenezt@unmsm.edu.pe>

Introducción

La zona de Nepal está ubicada en la convergencia de las placas tectónicas de la India y Euro-asiática, donde se desarrolla el proceso de subducción (en el cual la placa de la India se introduce debajo de la placa Euro-asiática) con una velocidad de convergencia promedio de 4.5 cm/año. Debido a este proceso de convergencia de placas tectónicas se ha formado la cordillera del Himalaya (a través de millones de años) y la alta sismicidad en esta zona se evidencia en la ocurrencia de grandes sismos tectónicos de magnitud mayor a 8.0 Mw, como el de 1905 (8.2 Mw) con un área de ruptura ubicado en el extremo Nor-Oeste de Nepal, el de 1934 (8.4 Mw) con un área de ruptura al este de Katmandú y el de 1833 con un área de ruptura similar al de 2015 (Avouac 2003).

El 25 de abril de 2015 ocurrió un fuerte sismo en Nepal, a las 06:11:26 (Tiempo Universal) que quitó la vida a más de 8 mil personas, dejando miles de heridos y damnificados. Según el reporte sísmico del USGS (<http://earthquake.usgs.gov>) el epicentro estuvo localizado a 80 km al Nor-Oeste de la ciudad capital de Katmandú en: Lon = 28.147°N, Lat = 84.708°E y profundidad de 15 km. El Global CMT (<http://www.globalcmt.org>) reportó los siguientes parámetros del mecanismo focal: ángulo acimutal (*strike*) = 293°, ángulo de buzamiento (*dip*) = 07° y ángulo de dislocación (*rake*) = 108°.

En la Figura 1 se muestra un mapa de sismicidad de la zona de Nepal para sismos mayores a 4.0 Mw en el intervalo de tiempo de 1973 a 2014, se observa principalmente sis-

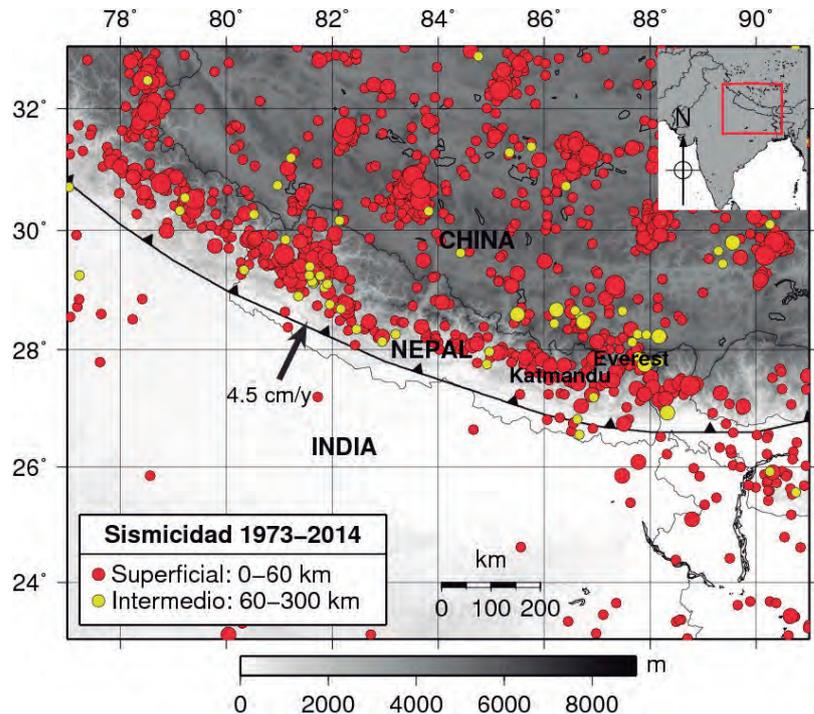


Figura 1. Mapa de sismicidad de Nepal ($M_w > 4.0$), producto de la subducción de la placa de la India que se introduce debajo de la placa Euro-asiática a una velocidad promedio de 4.5 cm/año (datos: USGS-NEIC).

mos de foco de profundidad superficial (menor 60 km) y algunos de foco de profundidad intermedia (entre 60 y 300 km). En la Figura 2 se muestra un mapa de las réplicas en los 2 primeros días del terremoto de Nepal 2015, las cuales delimitan la geometría del área de ruptura. La réplica más importante ocurrió el 12 de mayo de 2015 a 75 km al Este de Katmandú y tuvo una magnitud de 7.3 Mw.

Materiales y métodos

Mecanismo focal para estaciones telesísmicas

Para calcular el mecanismo focal y la distribución de la fuente sísmica, se ha utilizado el método de inversión de las formas de onda (Kikuchi y Kanamori 2003), para ello se ha utilizado 57 estaciones sísmicas de la red mundial IRIS, CN (Canadá) y DK (Dinamarca) ubi-

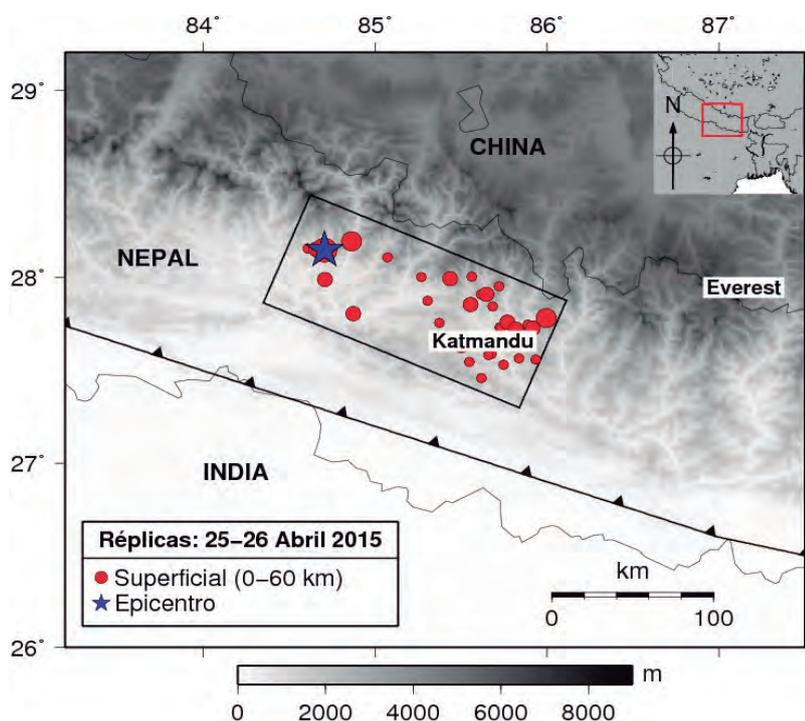


Figura 2. Las réplicas ocurridas dentro de las primeras horas delimitan la geometría de la fuente sísmica de dimensiones $165 \times 70 \text{ km}^2$. El epicentro está ubicado en el extremo Nor-Oeste del área de ruptura. La escala de grises representa la altura de la topografía.

cadadas a una distancia epicentral entre 30° y 90° con una buena cobertura acimutal (Figura 3). Para distancias epicentrales menores a 30° las ondas sufren fuertes perturbaciones por la estructura del manto superior y para distancias epicentrales mayores a 90° las ondas sufren perturbaciones debido a que alcanzan el núcleo terrestre. Se han elegido las señales sísmicas cuya relación señal/ruido es mayor que 10.

Adquisición y procesamiento de la señal

Los datos o señales sísmicas están disponibles en la web: <http://www.iris.edu>. Se tomó una ventana de tiempo de 240 s después del inicio de la onda P y 20 s antes de ese tiempo para cada señal. Se ha removido la respuesta del instrumento mediante un proceso de deconvolución (utilizando el software SAC2000) para luego integrar la señal y obtener una se-

ñal en desplazamiento con un intervalo de muestreo de 0.5 s. Para determinar el tiempo de arribo de la fase P y SH se ha utilizado en primer lugar las tablas de Jeffreys-Bullen, luego se ha corregido manualmente el tiempo de arribo de la onda P (de ser necesario) para tener en cuenta las variaciones de los tiempos de arribo debido a la heterogeneidad de la corteza terrestre. Se ha aplicado un filtro pasa banda para tomar en cuenta el espectro de la señal correspondiente al ancho de banda de periodos entre 10 s y 500 s. Luego, se ha realizado una rotación de coordenadas para obtener las componentes SH y SV.

Modelado e inversión de las formas de onda

Como condición inicial para la modelización de las formas de onda de volumen, se ha tomado los valores del mecanismo focal proporcionados por el Global CMT: (*strike, dip, rake*) = ($293^\circ, 07^\circ, 108^\circ$). Se ha utilizado el modelo de Kikuchi & Kanamori (1991) para modelar las formas de onda de volumen para distancias telesísmicas entre 30° y 90° .

Luego de realizar la inversión de las formas de onda se obtuvieron los siguientes parámetros del mecanismo focal: (*strike, dip, rake*) = ($293^\circ, 10^\circ, 99^\circ$) para una profundidad de 15 km, con una varianza normalizada total de 0.48. El mecanismo focal obtenido es de tipo inverso y de acuerdo a la profundidad focal la generación del terremoto se debe a la liberación de los esfuerzos compresivos (durante más de 180 años) en una zona de convergencia de placas tectónicas.

La función temporal de la fuente sísmica obtenida a partir del modelado de ondas de

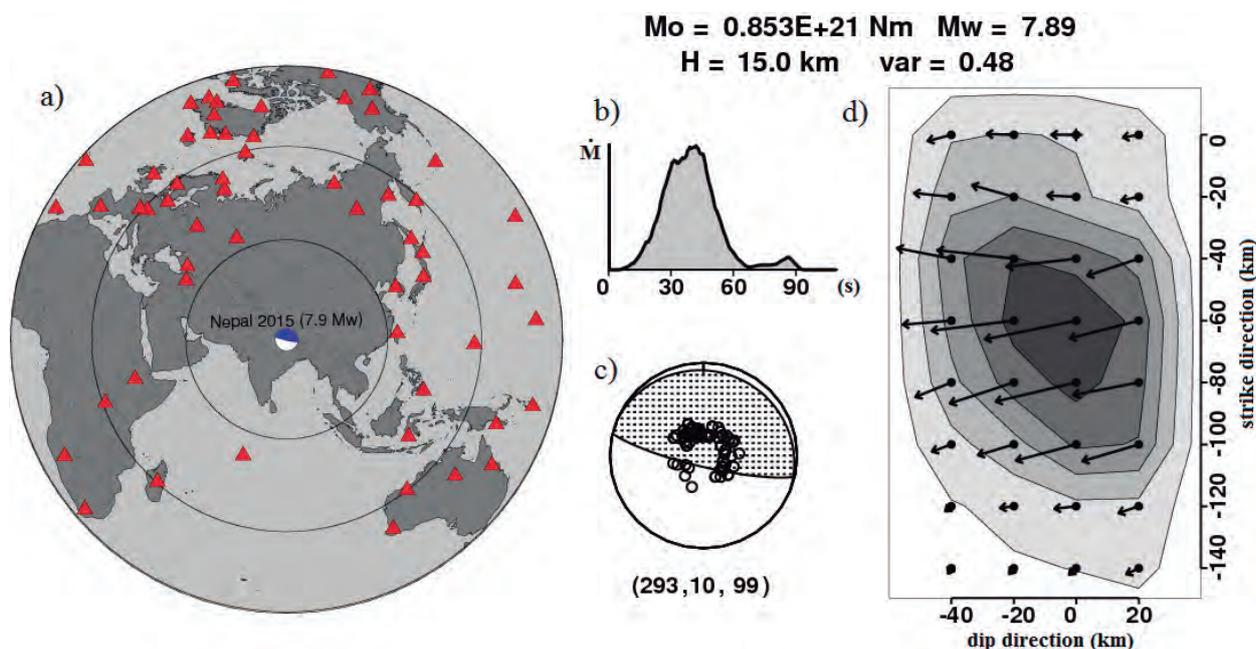


Figura 3. a) Distribución de las estaciones telesísmicas. Resultados de la inversión de formas de onda de volumen: b) función temporal de la fuente, c) mecanismo focal y d) distribución de la dislocación. El proceso de ruptura es múltiple o complejo.

volumen, es una buena representación del carácter simple o complejo de los procesos de ruptura de los terremotos; es decir, la función temporal de la fuente sísmica puede estar conformada por una serie de uno, dos o más pulsos que representan a la heterogeneidad de los procesos físicos que tienen lugar en el foco (Ide 2007).

Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos, la función temporal de la fuente sísmica indica un proceso de ruptura complejo con la presencia de varios sub-eventos. Durante los primeros 60 s hubo una fuerte liberación de energía sísmica, la cual decae alrededor de los 65 s; luego, entre los 65 y 90 s hubo otra liberación de energía de menor cantidad con respecto al primero. La duración total del proceso de ruptura fue de alrededor de 90 s. El momento sísmico total calculado es de 8.53×10^{20} Nm, lo que equivale a una magnitud de momento de 7.9 Mw, valor

similar al obtenido por el Global CMT (7.9 Mw). La velocidad de ruptura que genera el mínimo error es de 3.0 km/s (Figura 5).

Cuando se modela el proceso de ruptura de un terremoto, usualmente se asume una o varias subfuentes rectangulares contenidas en el área de ruptura. Cada subfuente rectangular está caracterizado por 9 parámetros: la localización de una esquina (latitud, longitud y profundidad), las dimensiones de la fuente (largo, ancho), la dislocación (o *slip*) y los ángulos de orientación del plano de ruptura (acimut, buzamiento, ángulo de dislocación). Estos 9 parámetros representan la imagen macroscópica de la distribución estática de la dislocación (*slip*). Para determinar la distribución espacial de la dislocación, usualmente se divide la fuente rectangular en varias subfuentes. Se asumen algunos parámetros fijos y algunos variables como el *slip* y el ángulo de deslizamiento, basados en análisis macroscópicos o información suplementaria tal como la distribución de réplicas, la traza de la falla en superficie y la solución del mecanismo fo-

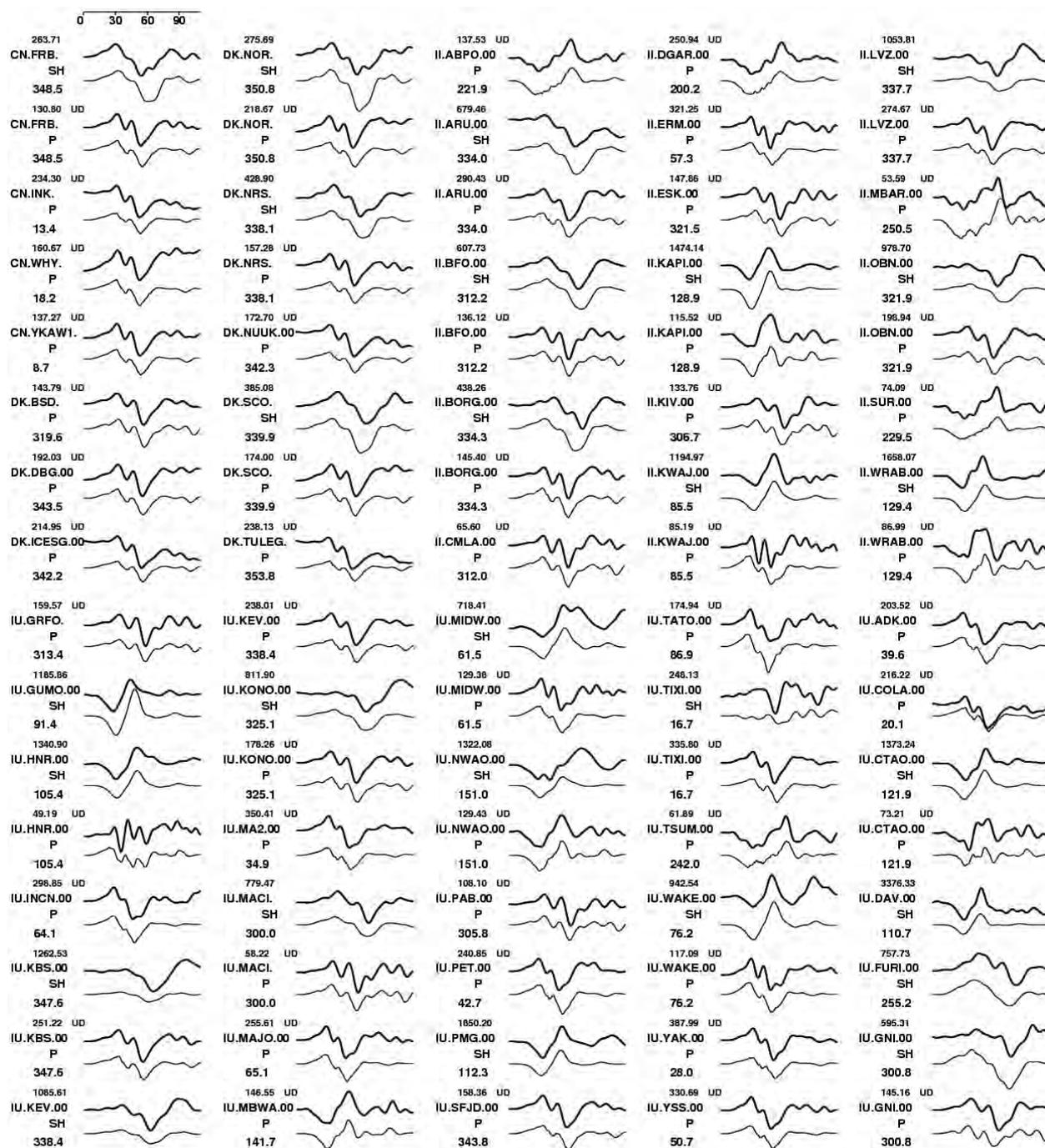


Figura 4. Comparación de los sismogramas observados (superior) con los sismogramas sintéticos (inferior). En total hay 80 señales sísmicas en desplazamiento. En general, se observa una buena correlación.

cal dada por el Global CMT u otra fuente (Ide 2007).

La distribución de la dislocación y la evolución temporal del "slip" son determinadas en cada grilla, usando una velocidad de ruptura fija, y a partir de estos valores se obtie-

ne los sismogramas sintéticos. La solución se encuentra minimizando la diferencia entre los datos sintéticos y observados (Udías et al. 2014).

Para este caso, se ha dividido la geometría de ruptura en 4x8 subfuentes cuadradas

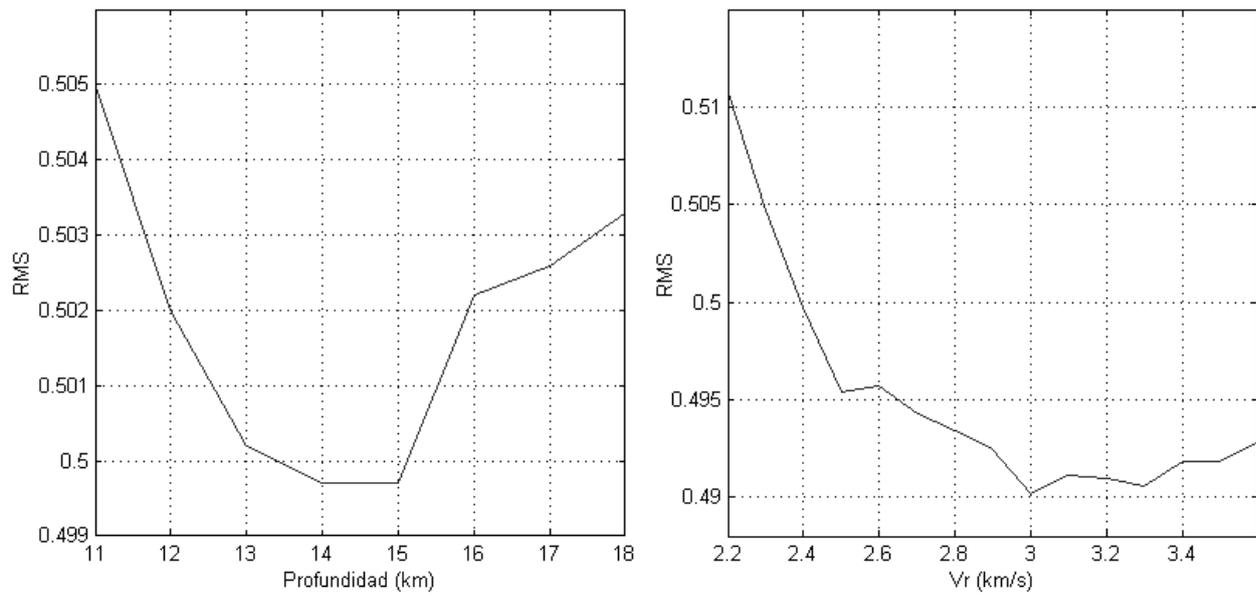


Figura 5. Curvas de profundidad focal y velocidad de ruptura versus varianza normalizada. Para $H=15$ km se obtiene el menor error y la velocidad de ruptura es 3.0 km/s.

a lo largo de la dirección de buzamiento y del acimut respectivamente, cada subfuente tiene una dimensión de 20×20 km², un acimut de 293° y un buzamiento de 10° , de acuerdo al mecanismo focal del Global CMT. Los resultados muestran la presencia de una aspereza principal ubicada en el centro de la geometría de ruptura (Figura 3) y hacia el Oeste de Katmandú (Figura 8). El valor de la máxima dislocación o slip es de 5.2 m. La Figura 4 muestra una comparación entre los sismogramas observados y los sintéticos, en general se observa una buena correlación. La Figura 6 muestra la evolución temporal de la propagación de la ruptura unidireccional con una directividad dirigida hacia el Este del epicentro. La ruptura empieza en

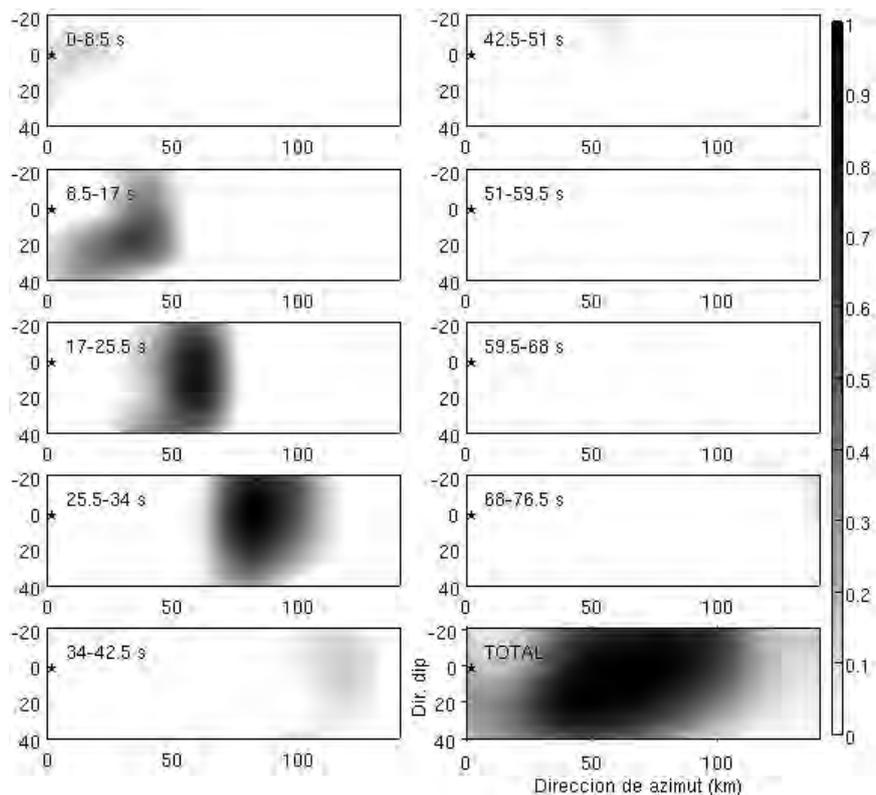


Figura 6. Evolución temporal de la propagación de la ruptura. El asterisco representa al hipocentro. La escala de grises representa la magnitud de la dislocación y está normalizada a la unidad.

el foco localizado en el extremo Oeste y se dirige hacia la ciudad de Katmandú en el extremo Este del área de ruptura.

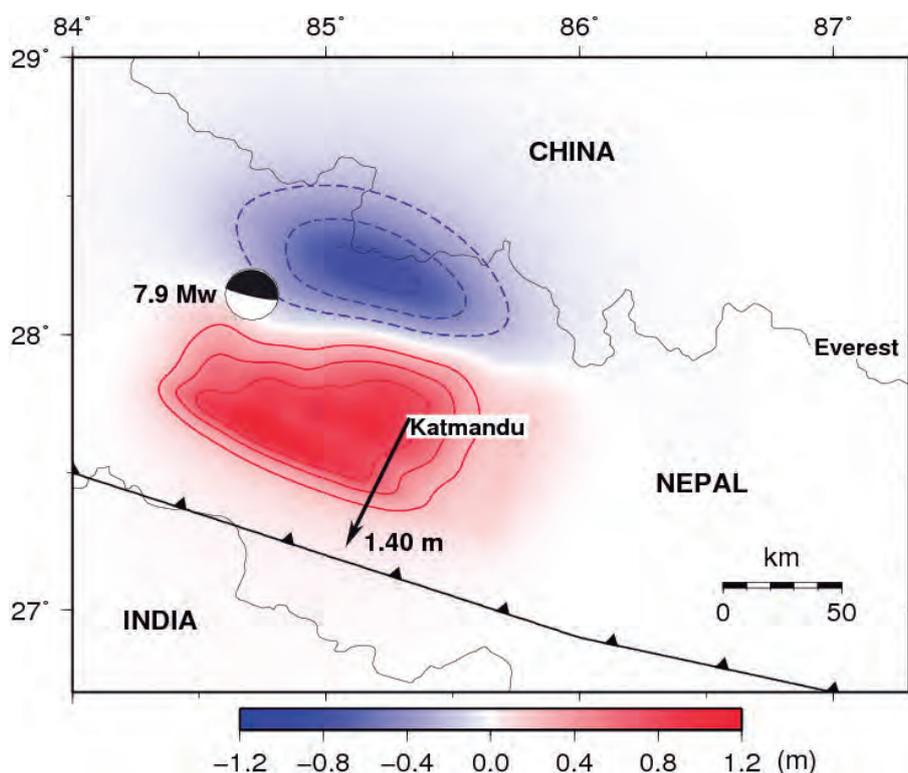


Figura 7. Campo de deformación vertical. El color rojo representa el levantamiento y el tono azul, la subsidencia o hundimiento. Las curvas de nivel representan intervalos de 0.25 m. La flecha indica la dirección del desplazamiento horizontal de Katmandú (1.40 m).

Deformación y desplazamiento cosísmico

Para calcular el campo de deformación cosísmica se utilizó la teoría de Okada (1992) para un medio elástico, homogéneo y semi-infinito, en base a la distribución de la dislocación (slip) calculada. La Figura 7 muestra el campo de deformación vertical, se puede observar que en la zona de Katmandú y hacia el Oeste hubo un levantamiento permanente (con un valor máximo de 1.18 m) mientras que al Norte de la geometría de ruptura hubo un hundimiento o subsidencia cosísmica (con un valor mínimo de -0.79 m).

Discusión

De acuerdo a la directividad de la propagación de la ruptura, la superposición de las

ondas sísmicas debido al avance de la ruptura está asociada al efecto Doppler para una fuente móvil, lo que explica la gran destrucción ocurrida en la ciudad capital de Katmandú, además de la carencia de estrictas normas de construcción de edificaciones e infraestructuras.

Según los cálculos preliminares de la Agencia Espacial Europea ESA (<http://www.esa.int/ESA>), la zona de la capital, Katmandú, se encuentra ahora en promedio 1.65 m más al sur que antes. Además, la ciudad se elevó más de un metro. Estos cálculos se basan en datos satelitales de interferometría radar.

Según los cálculos de la presente investigación basados en datos sísmicos, luego del terremoto, la ciudad de Katmandú se desplazó 1.40 m en dirección sur-oeste y se levantó 0.91 m en la dirección vertical (Figura 8). Esto se validará cuando se disponga de los datos de las estaciones GPS.

Por lo general, los cálculos basados en datos satelitales de interferometría radar tienden a sobrestimar la deformación cosísmica debido a que en realidad está midiendo la deformación intersísmica, cosísmica más la postsísmica; mientras que, los cálculos basados en datos sísmicos tienden a subestimar la deformación cosísmica debido al ancho de banda del instrumento sísmico, es decir pueden existir componentes de periodo muy largo que no son captadas por el instrumento sísmico que generan desplazamiento asísmico y deformación (Chlieh et al. 2011).

Debido a que Nepal está ubicado en una zona de zona de convergencia de placas tectónicas al interior del continente asiático (entre los países de la India y China), no se generó un maremoto. De haber ocurrido un sismo de similares características pero en el mar, se hubiera generado un maremoto con un fuerte impacto en el campo cercano.

Conclusiones

La fuente sísmica tuvo un área de 165 km × 70 km.

La fuente sísmica del terremoto de Nepal 2015 es de carácter múltiple o complejo. La propagación de la ruptura es unidireccional con directividad hacia el sur-este y a una velocidad promedio de 3.0 km/s. La duración del proceso de ruptura fue de alrededor de 90 s.

Los parámetros de la orientación del plano de ruptura o mecanismo focal están dados por: ángulo acimutal = 293°, ángulo de buzamiento = 10° y ángulo de dislocación = 99°, para una profundidad focal de 15 km.

La zona de máxima liberación de energía (aspereza principal) está concentrada casi en el centro de la geometría de ruptura, muy cerca de la ciudad de Katmandú, con una máxima dislocación (*slip*) de 5.2 m.

El tamaño del terremoto se cuantifica mediante su momento sísmico, cuyo valor calculado a través del proceso de inversión es de 8.53×10^{20} Nm lo que equivale a una magnitud en la escala de momento de 7.9 Mw.

Luego del terremoto, la ciudad de Katmandú se desplazó 1.40 m en dirección sur-oeste y se levantó 0.91 m en la dirección vertical, según los cálculos de esta investigación. Esto se validará cuando se disponga de los datos de las estaciones GPS.

Referencias bibliográficas

- AVUOAC, J. (2003). "Mountain building erosion, and the seismic cycle in the Nepal Himalaya". En: *Advances in Geophysics*, Vol 46: 1-80. Elsevier Inc.
- CHLIEH, M. et al. (2011). "Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone". En: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, B12405.
- IDE, S. (2007). "Slip Inversion". En: *Treatise on Geophysics*, Vol 4: Earthquake Seismology, chapter 4.07, pp: 193-223. Elsevier Inc.
- KIKUCHI, M. & KANAMORI, H. (1991). "Inversion of Complex Body Waves". En: *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 81, N° 6: 2335-2350.
- KIKUCHI, M. & KANAMORI, H. (2003). "Notes on Teleseismic Body-Wave Inversion Program". En: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/>
- OKADA, Y. (1992). "Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space". En: *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 82, N° 2: 1018-1040.
- UDÍAS, A., et al. (2014). *Source Mechanism of Earthquakes: Theory and Practice*. Cambridge University Press, First Edition.

ANEXO

Tabla de distribución de la fuente sísmica. Cada subfuente tiene una geometría cuadrada de lado $L=20$ km, orientación: aci-

mut= 193° , buzamiento= 10° . La profundidad H se refiere a la parte superior de la subfuente. *Slip*: dislocación, *Rake*: ángulo de dislocación.

N	Lat ($^\circ$)	Lon ($^\circ$)	H (km)	Slip (m)	Rake ($^\circ$)
1	27.8181	85.9362	18.5	0.77	116.0
2	27.6550	85.8670	15.0	0.54	133.4
3	27.4920	85.7978	11.5	0.42	142.4
4	27.3298	85.7285	08.1	0.35	151.3
5	27.8884	85.7706	18.5	1.18	108.9
6	27.7253	85.7014	15.0	1.21	96.9
7	27.5623	85.6322	11.5	0.77	97.5
8	27.3992	85.5630	08.1	0.44	129.6
9	27.9587	85.6050	18.5	3.25	106.7
10	27.7956	85.5358	15.0	3.46	105.1
11	27.6326	85.4666	11.5	2.08	106.8
12	27.4695	85.3974	08.1	1.14	110.4
13	28.0289	85.4395	18.5	3.68	101.0
14	27.8659	85.3703	15.0	4.58	103.5
15	27.7028	85.3011	11.5	3.73	108.3
16	27.5398	85.2318	08.1	2.14	112.3
17	28.0992	85.2739	18.5	3.95	104.5
18	27.9362	85.2047	15.0	5.16	101.7
19	27.7731	85.1355	11.5	4.58	97.0
20	27.6101	85.0663	08.1	2.70	94.7
21	28.1695	85.1083	18.5	3.00	108.5
22	28.0064	85.0391	15.0	3.88	96.7
23	27.8434	84.9699	11.5	4.26	83.6
24	27.6803	84.9007	08.1	3.06	78.9
25	28.2398	84.9428	18.5	0.99	102.0
26	28.0767	84.8736	15.0	1.60	87.2
27	27.9137	84.8044	11.5	2.40	74.0
28	27.7506	84.7351	08.1	2.07	84.0
29	28.3101	84.7772	18.5	0.89	99.2
30	28.1470	84.7080	15.0	1.38	89.7
31	27.9839	84.6388	11.5	1.50	87.9
32	27.8209	84.5696	08.1	1.36	104.8