

MODELO DE ESTRUCTURA DE VELOCIDAD CORTICAL 1D PARA LA REGIÓN NORTE DEL PERU A PARTIR DE SISMOS LOCALES 1D VELOCITY MODEL FOR NORTHERN PERU USING LOCAL EARTHQUAKE DATA

Juan Carlos Villegas y Hernando Tavera

RESUMEN

En el presente estudio, se propone un modelo de estructura de velocidad para el Norte del Perú a partir de la inversión de los tiempos de arribo de las ondas P y S. La metodología utilizada se basa en la inversión no linealizada de rayos propia del algoritmo Velest. Los datos corresponden a 1593 eventos sísmicos locales registrados por la red sísmica local del Norte del Perú, durante un periodo de seis años (1996 – 2001). La inversión se realizó utilizando 2897 arribos de ondas P y S, correspondientes a 547 sismos. Durante el proceso de inversión se evaluaron diferentes modelos de ensayo con distintos valores de velocidad y espesores de capa. Este proceso permitió obtener hasta 12 modelos bien definidos que luego fueron evaluados mediante la relocalización de sismos, seleccionando el modelo que permitió reducir los errores de cálculo y la raíz media cuadrática (rms). El modelo de velocidad final consta de 6 capas con velocidades que van desde $V_p = 5.66$ km/s para la primera capa, hasta 7.92 km/s para la última. Este modelo también ha permitido definir el límite corteza-manto (Mohorovicic) a una profundidad de 45. La relocalización de sismos muestra una mejor distribución de los hipocentros en superficie y profundidad con una reducción del 35% para los valores de rms. Finalmente, el modelo de velocidad 1D obtenido constituye un gran aporte para el conocimiento de la estructura de velocidades en el Norte del Perú y sirve como modelo de referencia para los algoritmos de localización de sismos y para futuros estudios sismicidad, tectónica y riesgo sísmico a realizarse en esta región.

Palabras clave: Modelo de velocidad 1D, inversión de tiempos de arribo, sismos locales, rms, y Norte del Perú.

ABSTRACT

In this study, we propose a 1D velocity model for northern Peru applying the inversion theory to the arrival times of P and S waves. We follow the methodology based on the non-linear inversion using the Veslest program. We use 1593 local earthquakes recorded during six years (1996-2001) by a local seismic network located in northern Peru. The inversion was carried out using 2897 arrivals of P and S waves, corresponding to 547 earthquakes. During the inversion we evaluated several models considering different velocities and thicknesses layer. This process allowed us to obtain 12 well-defined models that then were evaluated through the earthquakes relocation, thus we selected the model that shows reduction in the location and the root mean square (rms). The 1D velocity model that we propose consists of six layers with velocities of $V_p = 5.66$ km/s for the first layer, to 7.92 km/s for the last one. This model defines the boundary between the crust and mantle (Mohorovicic) at a depth of 45 km. The earthquake relocation shows a better distribution of hypocenters in surface and depth and also shows a reduction of 35% in the rms values. Finally, this model constitutes a major contribution to the knowledge of the structure velocity in northern Peru and can be used as a reference in software for earthquake location, as well as, in seismicity, tectonics and seismic risk studies to carry out in this region.

Keywords: 1D velocity model, travel-time inversion, local earthquakes, rms, and northern Peru.

INTRODUCCIÓN

El Norte del Perú está localizado en una región tectónicamente compleja y de constante actividad sísmica con origen en el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. La interacción de estas dos placas, que convergen a una velocidad relativa de 60-80 mm/año en dirección N80°E (de Mets, et al., 1990; Norabuena, 1998), da origen a que se acumule energía suficiente en la interfaz de subducción, que luego es liberada con la ocurrencia de sismos de diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad. Según la historia sísmica, en la región Norte del Perú la ocurrencia de sismos de gran magnitud no es frecuente; sin embargo, el registro de los sismos más destructores da cuenta de los ocurridos en Trujillo en 1619 ($M_s = 7.7$), en Ecuador en 1906 ($M_s = 8.8$), y en Tumbes en 1953 ($M_s = 7.4$). Esto, por un lado indicaría que el periodo de retorno de estos sismos sobrepasa los 50 años o que las características físicas en la forma de subducción permitirían que la placa de Nazca se deslice de manera asísmica (Villegas, 2009). No obstante, el análisis de los registros de una red sísmica local instalada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en esta región desde la década de 1990, ha mostrado la ocurrencia de actividad sísmica de carácter local (< 4.5 ML) con focos superficiales e intermedios asociados a fallas y al proceso de subducción (Tavera et al., 2006). Sin embargo, el conocimiento del entorno sismotectónico del Norte del Perú aún es exiguo, por lo que resulta importante realizar nuevas investigaciones que mejoren el conocimiento. Actualmente, por los datos disponibles esta región es un lugar apropiado para realizar estudios de tomografía local.

Desde el punto de vista geoestructural, la región Norte del Perú está constituida por cuatro unidades geomorfológicas paralelas a la fosa Perú-Chile (Jordan et al., 1983): la zona costanera (ZC), que está recortada transversalmente por los valles de Tumbes, Chira, Piura, Lambayeque, Jequetepeque, Moche y Virú; el piedemonte del Pacífico (PDP), cuya morfología corresponde al dominio de las grandes pampas de Piura, Sullana y el desierto de Sechura, etc.; y finalmente las Cordilleras Occidental (COC) y Oriental (COR), ambas formadas por elevaciones paralelas a la línea de costa que no sobrepasan los 4000 m.s.n.m. Otras expresiones en superficie, las constituyen los sistemas de fallas que también han dado origen a sismos de magnitud moderada, entre

ellas se tiene a la fallas de Amotape (AP), Shitari (SH) y Chaquilbamaba (CH). (ver Figura 1).

En general, la ocurrencia de sismos en Perú ha permitido mejorar la base de datos y con ella los procedimientos para el cálculo de sus parámetros hipocentrales. Un aporte importante que permitiría mejorar estos resultados sería al disponer de modelos de distribución de velocidades propios de la región y un mejor conocimiento tectónico del área de estudio. En el presente estudio, se propone un modelo de velocidad unidimensional para el Norte del Perú, que refleja mejor las características de propagación de las ondas sísmicas en el interior de la Tierra y a la vez sirve de referencia para realizar futuros estudios de sismicidad, tectónica y tomografía sísmica.

RED SÍSMICA LOCAL Y DATOS

Red sísmica local del Norte del Perú

Desde 1990 el IGP mantiene operativa una red sísmica local en el Norte del Perú. Esta red, denominada red sísmica local del Norte del Perú, fue instalada por el IGP con el propósito de monitorear la actividad sísmica local y estimar el peligro sísmico de dos proyectos hidroeléctricos ubicados en dicha región (Olmos y Carhuaquero). Esta red estuvo compuesta por ocho estaciones sísmicas ubicadas en las localidades de Huarmaca (HCA), Pomahuaca (PMA), Porculla (PCU), Portachuelo (PCH), Maichil (MCH), Mal Paso (MPA), Montañita (MTA) y Puntería (SPU) (ver Tabla 1). El instrumental estuvo integrado por sismómetros de periodo corto tipo Kinematics de componente vertical (modelo SS-1), implementadas con un sistema de registro digital de 16 bit a una frecuencia de muestreo de 1 Hz. En la Figura 1 se muestra la distribución espacial de las estaciones sísmicas, ubicadas desde la línea de costa hacia la Cordillera Oriental cubriendo un área aproximada de 700 km². Actualmente la transmisión del registro continuo de la señal se realiza en tiempo casi-real a través de un sistema de telemetría por radiofrecuencia UHF-VHF a una estación central de registro digital ubicada en el ciudad de Chiclayo.

Datos

Para el presente estudio se ha considerado un periodo de datos de 6 años (1996 al 2001), tiempo en el cual se registró un total de 1593 eventos con diferencias de tiempo S - P inferiores a 30 seg. Para el cálculo de los parámetros hipocentrales se utilizó

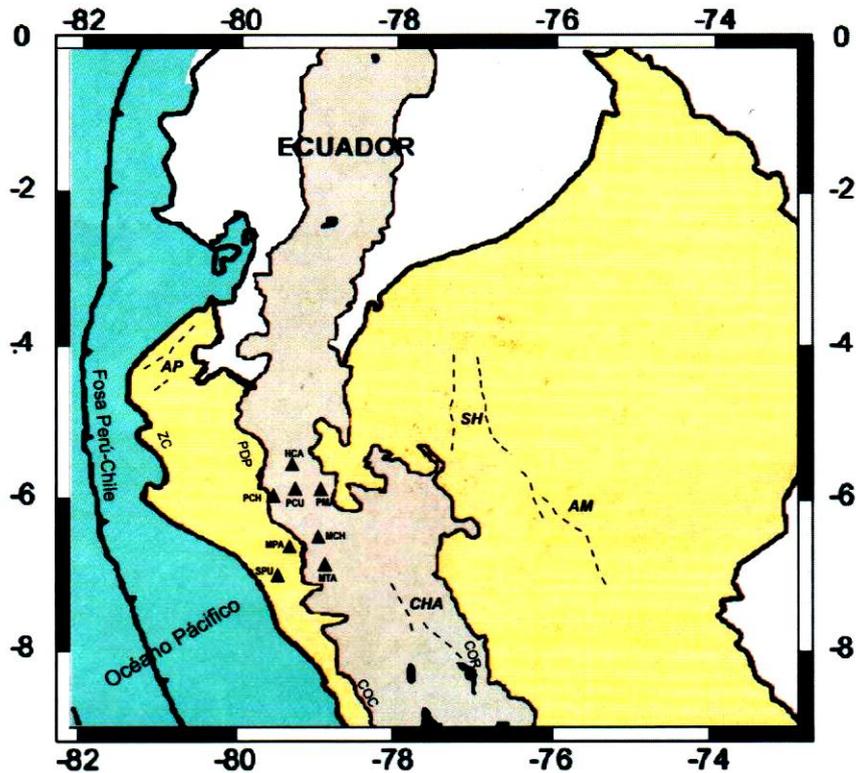


Figura 1. Contexto geodinámico del Norte del Perú con las principales unidades morfoestructurales, sistemas de fallas y la fosa oceánica (Fallas, SH=Shitari, AM=Amotape, CHA=Chaquibamba, AM=Amazonas). Los triángulos representan las estaciones de la red sísmica local del Norte del Perú.

una versión modificada del programa Hypoinverse (Klein, 1978), un modelo de velocidad de 4 capas propuesto por Lindo (1993) y una razón de $V_p/V_s = 1.75$ calculada por Tavera et al., (2006). En general, los parámetros hipocentrales calculados presentaron incertidumbres de 0.1 seg. para la onda P y 0.25 para la S, mientras que los errores en las componentes horizontal (ERH) y vertical (ERZ) fueron inferiores a 2.5 km. Las magnitudes de los eventos estuvieron entre el rango de 1.8 y 4.1 ML, y en profundidad alternaron entre 5 y 125 km.

Dado que la determinación de un modelo de velocidad requiere contar con una base de datos óptima que no genere inestabilidades en el proceso de inversión (Kissling, et al., 1994), se aplicaron los siguientes criterios de selección a la base de datos inicial: a) que los eventos hayan sido registrados al menos por 6 estaciones de la red sísmica local, b) que los eventos presenten valores de rms residual ≤ 1 seg., c) que la cobertura azimutal de los eventos

(GAP) sea $\leq 200^\circ$, d) que los errores de localización en las componentes ERH y ERZ sean ≤ 2.5 km. De acuerdo a estos criterios la nueva base de datos quedó compuesta por 2987 tiempos de arribos para las ondas P y S, correspondientes a 547 eventos distribuidos uniformemente en la región de estudio y que servirán para llevar a cabo el proceso de inversión.

En la Figura 2a se muestra la distribución espacial de los eventos sísmicos seleccionados y en ella se observa que se distribuyen en mayor proporción en el interior del continente y en menor, entre la fosa y la línea de costa. De acuerdo a su distribución espacial y a la profundidad de sus focos es posible distinguir tres agrupaciones de sismos; el primero con hipocentros de carácter superficial ($h < 60$ km) que se distribuye desde la fosa hasta cubrir la línea de costa y el desierto de Sechura en Piura, el segundo con hipocentros, también de carácter superficial, cubriendo el extremo Nor-Este

de la red local y finalmente, el tercero que agrupa los hipocentros de carácter intermedio ($61 > h < 300$) que prácticamente cubren toda el área de la red sísmica local. La ocurrencia de estos eventos, para el caso del primer y tercer grupo, está directamente asociado al proceso de subducción; mientras que, el segundo estaría asociado a los procesos de deformación cortical y al reacomodo de las fallas geológicas presentes en la región.

En cuanto a la distribución de los eventos sísmicos en función de su profundidad (Figura 2b), según el segmento A-B (Figura 2a), se observa que gran parte de los sismos siguen, de manera irregular, la tendencia del slab de subducción hasta una profundidad de 125 km y una distancia de 320 km desde la fosa; mientras que, la otra agrupación de sismos de carácter superficial se distribuye de manera dispersa por debajo de la Cordillera de los Andes y entre las localidades de Cajamarca y Chachapoyas.

CÁLCULO DEL MODELO DE VELOCIDAD 1D

Diversos estudios han demostrado que la precisión en la localización de los sismos es mejorada usando modelos de velocidad apropiados para la zona de estudio y esto se puede obtener, por ejemplo, a partir de la inversión de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas (Crosson, 1976; Thurber, 1992; Kissling et al., 1994).

La metodología empleada en el presente estudio corresponde al método de inversión no lineal propio del programa Velest (Kissling, 1995), el cual sigue un procedimiento de ensayo y error para diferentes arreglos de modelos de velocidad, parámetros de control y localización de sismos. Velest calcula el trazado de rayos desde la fuente hasta el receptor hallando los rayos directos y refractados que atraviesan el modelo de velocidad. El cálculo se obtiene mediante la inversión total de la matriz de mínimos cuadrados amortiguados, no obstante, dado que la solución del problema inverso es no lineal, ésta se obtiene efectuando múltiples iteraciones, cuyo número se va evaluando y ajustando de acuerdo a los resultados que se observan en cada iteración. Velest no calcula ni diseña la geometría de las capas, sino que ajusta el valor de velocidad de las capas que se introducen en el modelo inicial; por lo tanto, es necesario evaluar distintos modelos con diferentes espesores y velocidades.

El procedimiento para el cálculo del modelo de velocidad involucra los siguientes aspectos: a) contar con una base de datos de localizaciones y tiempos de arribo de ondas P y S, b) seleccionar y/o definir modelos de velocidad inicial para efectuar el proceso iterativo, c) definir los parámetros de control y la estación sísmica de referencia, d) efectuar el proceso de inversión y, e) evaluar los resultados y relocalizar los sismos con el modelo de velocidad obtenido (Villegas, 2009). De esta manera, Velest permite obtener un modelo de velocidad 1D caracterizado por capas que representan el mejor promedio de velocidad para los rayos que atraviesan cada intervalo de profundidad. Por tanto, el modelo de velocidad obtenido, al estar en función de las características estructurales de la corteza de la zona de estudio, es representativo de dicha región y puede ser utilizado como modelo de referencia para la determinación de los parámetros hipocentrales de los sismos y como punto de partida para otros estudios de sismicidad.

MODELO DE VELOCIDAD INICIAL

Un factor fundamental para resolver el problema inverso es la selección del modelo de velocidad inicial. En el presente estudio, dado que no existe información publicada sobre modelos de velocidad de ondas sísmicas para el Norte del Perú, se utilizan como modelos de velocidad inicial los sugeridos por Dorbath (1991) y Lindo (1993), ambos propuestos para la región central de Perú y obtenidos a partir de estudios de microsismicidad local (Tabla 2). Asimismo, con la finalidad de evaluar la convergencia de las velocidades y verificar la estabilidad de la solución, además de los modelos de partida, se evaluaron otros modelos de ensayo con diferentes espesores de capa y variaciones de velocidad.

INVERSIÓN 1D Y RELOCALIZACIÓN DE SISMOS

Modelo de velocidad 1D a partir de la inversión de los tiempos de arribo

Haciendo uso del programa Velest se realizó el proceso de inversión utilizando una base de datos compuesta por 2897 arribos de ondas P y S correspondientes a 547 eventos sísmicos. Como estación sísmica de referencia se consideró a la estación PCU (Porculla) por estar ubicada en el centro de la red local y por haber registrado más del 90% del total de eventos sísmicos.

Estación	Código	Lat.	Lon.	Elev.	*Comp.Sensor	Equipo	Transmisión
Huarmaca	HCA	-5.585	-79.486	2000	Z	KM.I.SS1	Telemetría
Pomahuaca	PMA	-5.922	-79.196	2340	Z	KM.I.SS1	Telemetría
Porculla	PCU	-5.862	-79.487	2970	Z	KM.I.SS1	Telemetría
Portachuelo	PCH	-6.009	-79.685	720	Z	KM.I.SS1	Telemetría
Maichil	MCH	-6.519	-79.186	1180	Z	KM.I.SS1	Telemetría
Mal Paso	MPA	-6.663	-79.443	500	Z	KM.I.SS1	Telemetría
Montañita	MTA	-6.894	-79.136	1200	Z	KM.I.SS1	Telemetría
Señal Puntería	SPU	-6.915	-79.659	561	Z	KM.I.SS1	Telemetría

* Comp. = Componente

Tabla 1. Principales características y coordenadas geográficas de las estaciones sismológicas que integran la Red Sísmica Local del Norte del Perú.

El proceso de inversión se inició con la evaluación de los modelos de Lindo (1993) y Dorbath (1991) examinando y seleccionando los parámetros de control apropiados (número de iteraciones, ajustes por topografía, ajustes en los tiempos de retardo, etc.) que mejor se ajusten a la base de datos y resuelvan el problema inverso en sí. Posteriormente, se evaluaron las variaciones de velocidades y se verificó los gradientes de velocidad vertical introduciendo valores de ensayo que definían capas de velocidad constante y variable con interstratificaciones de 1 km para las capas superficiales y de 5 km para las profundas, cubriendo así un amplio rango de opciones de espesor y velocidad para cada capa.

Para cada etapa de la inversión se realizaron hasta siete iteraciones, lo que permitió verificar y discriminar capas que convergían en similares valores de velocidad, a fin de reducir su número hasta obtener modelos de velocidad mejor definidos. Con este procedimiento se obtuvieron doce modelos, los cuales en su última iteración presentaron variaciones inferiores a 0.08 km/s. En la Figura 3a se muestran los modelos de velocidad inicial y de ensayo utilizados, y en la Figura 3b, los modelos de velocidad obtenidos después del proceso de inversión. En general, se observa que los modelos resultantes, aun los de velocidad constante, convergen entre sí a favor de un modelo más estable y mejor definido.

Para seleccionar el modelo de velocidad final, se procedió a efectuar la relocalización de los

parámetros hipocentrales de los datos sísmicos utilizados con cada uno de los doce modelos obtenidos. Finalmente se seleccionó el modelo que permitió reducir en un 35 % los valores de rms residual obtenidos con los dos modelos iniciales.

El modelo de velocidad de onda P obtenido, consta de 6 capas que alcanzan una profundidad de 45 km y se distribuyen de la siguiente manera: la primera capa considera una capa de 2 km de profundidad con una velocidad de 5.66 km/s; la segunda de 2 a 10 km con una velocidad de 5.92 km/s; la tercera de 10 a 22 km con una velocidad de 6.20 km/s; la cuarta de 22 a 30 km con una velocidad de 6.44 km/s; la quinta de 30 a 45 km con una velocidad de 6.87 km/s y la sexta que considera profundidades mayores a 45 km con una velocidad de 7.92 km/s.

En la Figura 4 se presenta el modelo de velocidad obtenido (línea continua), que a diferencia del modelo inicial (Lindo, 1993) (representado por la línea discontinua), permite identificar un mayor número de capas que se correlacionan con las discontinuidades presentes en la corteza. Así por ejemplo, la aparición y disminución de velocidades de 0.14 km/s para la primera se correlacionaría con la presencia de sedimentos y/o rocas de reciente edad geológica, asimismo el cambio de velocidad de 0.34 km/s en la interfaz de la tercera y cuarta capa estaría asociado a la discontinuidad que separa la corteza granítica de la basáltica, usualmente llamada discontinuidad de Conrad. Finalmente, el brusco incremento de velocidad de 1.05 km/s en la interfaz de la quinta y sexta capa (45 km) estaría

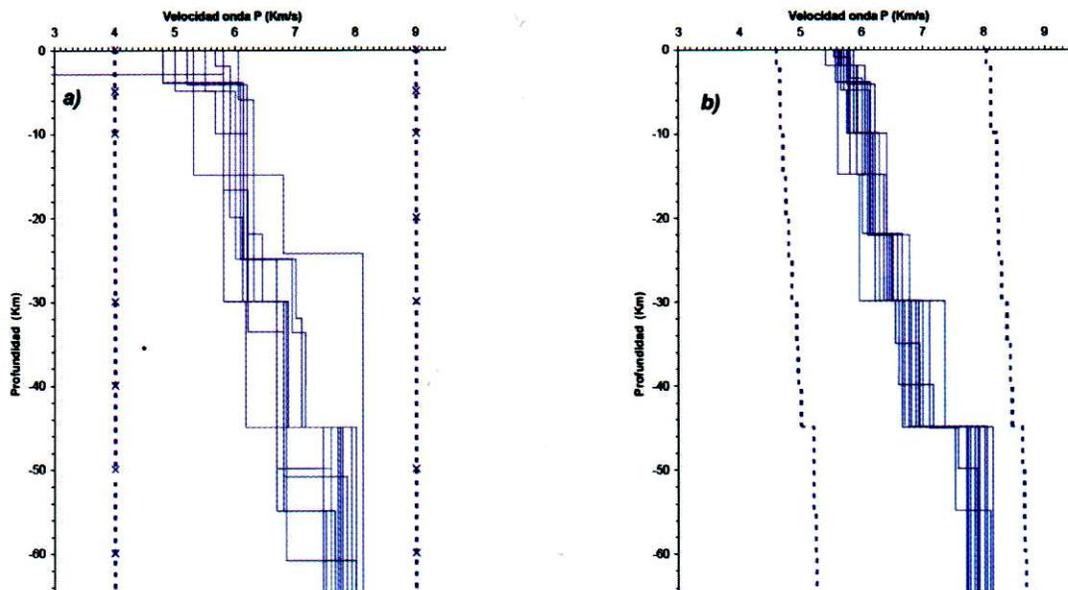


Figura 3. a) Modelos de velocidad inicial y de ensayo utilizados para realizar el proceso de inversión. Las líneas discontinuas corresponden a modelos de velocidades constantes de 4 y 9 km/s b) Modelos de velocidad obtenidos después de la inversión. Se observa un agrupamiento y convergencia de velocidades en los modelos de velocidad resultantes. Asimismo, los modelos de ensayo con velocidades constantes muestran una tendencia hacia los modelos iniciales.

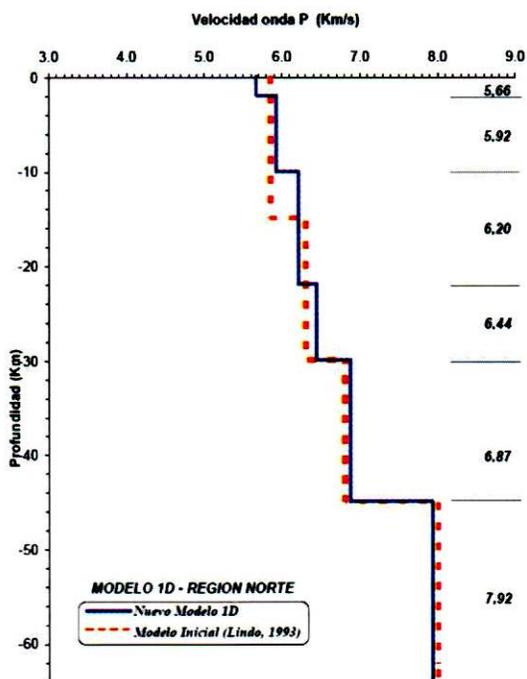


Figura 4. Modelo de estructura de velocidad unidimensional para el Norte del Perú. La línea continua indica el modelo obtenido en el presente estudio y la discontinua el modelo de Lindo (1993), propuesto para los Andes.

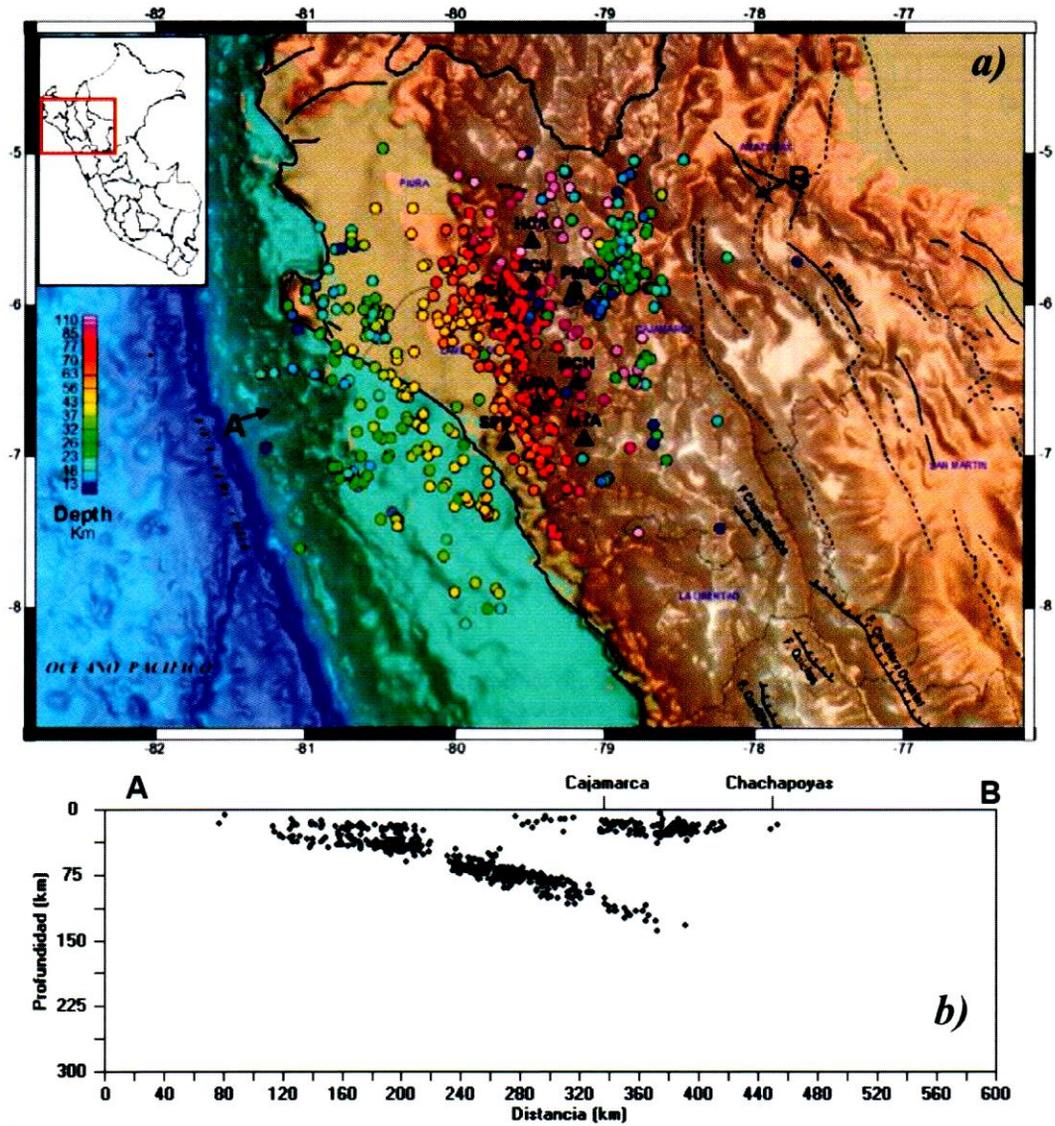


Figura 5. a) Distribución espacial de los 547 eventos sísmicos relocalizados utilizando el modelo de velocidad obtenido en este estudio. Se observa que los eventos muestran un mejor agrupamiento respecto a la localización anterior (ver Fig. 2). Estas agrupaciones definen mejor las fuentes generadoras de los eventos sísmicos. b) Perfil de sismicidad AB, en el que se observa un mejor ajuste de los hipocentros en profundidad definiendo mejor los procesos de deformación interna del slab de subducción.

Tabla II. Modelos de velocidad de Dorbath, (1991), y Lindo, (1993), utilizados como referencia durante el proceso de inversión.

Nro. Capa	Profundidad (km)	Velocidad (km/s)
1	0	5.2
2	15	6.2
3	30	6.8
4	50	8.0

Relocalización de la sismicidad local

A fin de verificar la estabilidad y resolución del modelo de velocidad 1D obtenido en este estudio, se realizó la relocalización de los eventos sísmicos considerados en la base de datos inicial. En la Figura 5a se muestra la distribución espacial de los 547 eventos relocalizados, observando varios agrupamientos de sismicidad con respecto a la localización inicial. Los agrupamientos de sismos de foco superficial presentes en el extremo NE podrían estar asociados al reacomodo de fallas geológicas, mientras que los agrupamientos de sismos de foco intermedio estarían asociados a las heterogeneidades de los procesos de deformación en el interior de la placa oceánica que subduce.

En cuanto a la distribución de los eventos en función de su profundidad, en la Figura 5b (segmento A – B, Figura 5a), se presenta un perfil en cual se observa que los eventos relocalizados muestran una mejor geometría para el slab dentro del proceso de subducción. Asimismo, en el extremo occidental de este perfil se observa que los eventos parecen formar dos tendencias separadas por 12-15 km aproximadamente, esta apreciación estaría de acuerdo con la hipótesis del doble plano de subducción que propone Tavera, et al., (2006) para esta región. Asimismo, los eventos superficiales del extremo oriental se distribuyen de manera uniforme definiendo la alta actividad sísmica asociada al proceso de deformación cortical que se produce en la región.

Finalmente, tal como se muestra en la Figura 6, los valores de la raíz media cuadrática (rms) para los 547 eventos relocalizados disminuyeron notablemente en un 35% con respecto a las soluciones iniciales, notando que para el modelo final los valores de rms están entre 0.02 y 0.23 seg. y para el inicial entre 0.1 y 0.35. Asimismo, se ha observado que el modelo de velocidad seleccionado ha permitido reducir el promedio de los errores en los parámetros hipocentrales a menos de 2 km en sus componentes.

De lo anterior, se deduce que el modelo de velocidad 1D obtenido, resuelve bien la localización de sismos ocurridos en la región norte del Perú; por lo tanto, puede ser utilizado en futuros estudios de sismicidad. Asimismo este modelo constituye

un primer paso y sirve de referencia para elaborar estudios de tomografía sísmica tridimensional.

CONCLUSIONES

Como es conocido, la precisión en el cálculo de los parámetros hipocentrales de un sismo depende fuertemente del modelo de velocidad utilizado, por lo que dicha precisión puede mejorarse notablemente si se utiliza un modelo propio de la zona de estudio que refleje las características sismotectónicas de la región.

En el presente estudio se propone, por primera vez, un modelo de estructura de velocidad para la región Norte del Perú. La metodología, basada en la teoría de inversión, así como la base de datos utilizada (2987 tiempos de arribo de onda P y S para sismos locales) han permitido definir un modelo de estructura de velocidad que permitirá reducir los errores en el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos y que puede ayudar a mejorar los resultados de futuros estudios de sismicidad.

El modelo de velocidad de onda P obtenido consta de 6 capas bien definidas que alcanzan una profundidad de 45 km y se distribuyen de la siguiente manera: la primera capa considera un espesor de 2 km de profundidad con una velocidad de 5.66 km/s; la segunda de 2 a 10 km con una velocidad de 5.92 km/s; la tercera de 10 a 22 km con una velocidad de 6.20 km/s; la cuarta de 22 a 30 km con una velocidad de 6.44 km/s; la quinta de 30 a 45 km con una velocidad de 6.87 km/s y la sexta para profundidades mayores a 45 km una velocidad de 7.92 km/s.

El modelo de velocidad obtenido ha permitido observar un incremento de la velocidad de la onda P a una profundidad de 45 km que estaría relacionado a la discontinuidad del Moho, lo cual es coherente con los resultados que proponen otros autores como Fukao y Yamamoto, (1989) y Krabbenhoft, et al., (2004). Por otro lado, los resultados obtenidos en la relocalización de los sismos muestran una reducción de los valores de rms residual de 35%, lo que indica bajos errores en el cálculo de los parámetros hipocentrales. Asimismo, estos resultados muestran una mejor distribución espacial de los eventos y un mejor ajuste de los hipocentros asociados a fallas geológicas o a la deformación interna del slab dentro del proceso de subducción.

Finalmente, el modelo de velocidad 1D obtenido en este estudio constituye un gran aporte para el conocimiento de la estructura de velocidades en la región norte del Perú y puede ser utilizado como

referencia para los algoritmos de localización de sismos y para los estudios sismicidad, tectónica y riesgo sísmico a realizarse.

REFERENCIAS

- De Mets, C., Gordon, R., Aarhus, A. and Stein, S. (1980). Current plate motions. *Geophysical Journal International*, V101, 425-478
- Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E. and Rivera, L. (1991). Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences.*, 4, 13-24.
- Fukao, Y. and Yamamoto, A., (1989). Gravity anomaly across the peruvian andes. *Journal of Geoph. Res.* 94, pp 3867-3890.
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendiger, R., Brewer, J., Ramos A. and Ando, J. (1983). Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 49: 341-361.
- Kissling, E., Ellsworth, W., Eberhart-Phillips, D. and Kradolfer, U., (1994). Initial reference models in local earthquake tomography. *J. Geophys. Res.* 99, 19635-19646.
- Kissling, E., (1995), *Velost Users Guide*, Internal report Institute of Geophysics, ETH Zurich, 26 pp.
- Klein F. (1978). Hipocenter location program HYPOINVERSE. U. S. Geol. Surv. Open-File Report, pp. 78 – 694, 113 pp.
- Krabbenhoft, A., Bialas, H., Kukowski, N and Hubsher, C., (2004). Crustal structure of the Peruvian continental margin from wide-angle seismic studies. *Geophys J. Int.* 159, 749 – 764.
- Lindo, R. (1993). *Seismotectonique des andes du Perou central: Apport des donnees sismologiques de haute precision*. Ph.D. Thesis, Universite Louis-Pasteur, Strasbourg, France. 74 pp.
- Norabuena E., Dixon T., Stein S y Harrison C. (1999). Deceleration Nazca South America and Nazca Pacific Plate Motions. *Geophys. Res. Lett.* 26, p3405-3408
- Tavera, H., Vilca, R., Marin, G., (2006). Inferences on the geometry of the nazca plate in northwestern Peru based on data collected by a local seismograph network. *Earth Sciences Research Journal*, Vol. 10 No. 1, 15-24.
- Thurber, C. (1985). Nonlinear earthquake location: Theory and examples. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 75, 779 – 790.
- Villegas, J.C. (2009). *Modelos de velocidad unidimensionales para la regiones Norte Centro Y sur de Peru a partir de la inversion de sismos locales*. Tesis Univ. Nac. San Agustin de Arequipa. 107p.

INFORMACIÓN PARA LOS AUTORES

El Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, (BSGP) es una publicación científica arbitrada, aparece con una periodicidad semestral y está dedicada a la publicación de artículos científicos originales realizados por los investigadores nacionales y extranjeros en idioma español o inglés. Los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores. En él se publican Artículos y Notas breves. El Consejo Editorial solicitará especialmente Artículos de reseña sobre algún tema específico e Informes de reuniones. Toda contribución debe corresponder a un trabajo original de los autores y que no haya sido publicado anteriormente.

PRESENTACIÓN Y ACEPTACIÓN DE MANUSCRITOS

Se presentará una copia del manuscrito completo ante el Director Científico del Consejo Editorial de la Sociedad Geológica del Perú (SGP), adjuntando dirección, teléfono y correo electrónico del autor a ser contactado. Los trabajos serán enviados a arbitraje por parte de especialistas designados por el Consejo Editorial. Las opiniones y sugerencias emitidas por estos últimos serán transmitidas a los autores junto con sus manuscritos, a fin de ser tomadas en cuenta. Luego de la recepción de los trabajos corregidos, el Consejo Editorial decidirá sobre su publicación definitiva.

En ese momento, se solicitará a los autores 1 diskette o CD conteniendo el archivo electrónico del texto, una impresión simple del mismo y los originales de las ilustraciones. Los autores indicarán el nombre del archivo y el procesador empleado. Una vez aceptado, el trabajo no podrá ser retirado.

Toda corrección deberá ser dentro de los plazos establecidos en la convocatoria que realice la Sociedad Geológica, fuera de éste plazo la Comisión de Publicaciones tiene la facultad de retirar el trabajo de número de boletín que corresponda y decidir si se incluye en el siguiente número.

EXTENSIÓN Y ORGANIZACIÓN

Formato General: Los Artículos no deben exceder 35 páginas a doble espacio (incluyendo bibliografía) en el tipo de letra Times New Roman 12 puntos, márgenes izquierdo, derecho, inferior y superior: 2 cm, configuración de página: A4. Como Nota breve se aceptarán hasta 8 páginas a doble espacio, incluyendo máximo dos ilustraciones en blanco y negro. Los costos por imágenes a color, adicional a la página a color que corresponde a cada artículo, serán asumidos por el o los autores.

Todo manuscrito completo debe incluir:

1. Encabezado.- Título (no debe exceder de 12 palabras en idiomas inglés y castellano), nombres de los autores, direcciones institucionales de los autores, palabras clave (en idiomas inglés y castellano). Además adjuntar título abreviado para las cornisas.
2. Resúmenes.- Se harán por lo menos uno en castellano y uno en inglés. Cada uno no excederá 200 palabras. Ellos deben ser concisos pero informativos y adelantar los resultados dados en el texto.
3. Texto principal.- Para su mejor comprensión, el texto debe estar dividido secciones encabezadas por subtítulos. Existen 3 niveles jerárquicos de subtítulos: el primero va en MAYUSCULAS, el segundo en Negritas y tercero en Cursivas, todos ellos pegados al margen izquierdo. Se recomienda seguir el esquema: Introducción, Desarrollo del tema, Discusión, Conclusiones y Agradecimientos.
4. Tablas.- Las tablas no se re-procesarán, por lo cual, deben presentarse incluidas en el impresos en excelente calidad y en fondo blanco.
4. Referencias Bibliográficas.- Contiene la lista de todos los trabajos citados en el texto. Se hará en orden alfabético por apellidos de autores. Si hay varios trabajos de un autor en un mismo año, se citará con una letra en secuencia adosada al año.
5. Ilustraciones.- Se requiere la presentación adicional de archivos electrónicos con las fotos o figuras con excelente resolución. Cada trabajo publicado podrá tener hasta una página con imágenes a full color,

por lo que se requiere que las figuras correspondientes sean insertas en dicha página.

Las ilustraciones comprenden mapas, gráficos, tablas y fotos. Sus proporciones serán tales que no excedan el espacio en una página completa (17 x 27 cm). Los números y títulos de figuras NO deben aparecer dentro de las mismas. Tener en cuenta el espacio que ocuparán los pies de figuras. En ningún caso los caracteres incluidos en las figuras deberán resultar menores de 2 mm. luego de reducción al 85%. Las fotos irán montadas en página blanca y con excelente contraste.

Las tablas no se re-procesarán, por lo que, deben presentarse insertas en el archivo en MS Word, listas para su reproducción.

Los archivos digitales para las figuras deberán ser grabados con las extensiones JPG, TIFF o BMP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Todas las citas bibliográficas hechas en el texto deben aparecer en la lista de Referencias Bibliográficas dada al final del mismo y viceversa. Se hará en orden alfabético por apellidos de autores, sin número que la anteceda.

Las fichas tendrán los modelos siguientes:

Publicación periódica:

Broggi, J. (1957).- Las terracitas fitogénicas de las lomas de la costa del Perú. Bol. Soc. geol. Perú, 32, 51-64.

Libro:

Steinmann, G. (1929).- Geologie von Peru. Carl Winter Univ., Heidelberg, 448p.

Publicación colectiva:

Barreiro, B. (1984).- Lead isotopes and Andean magma genesis. In: Andean magmatism, chemical and isotopic constraints; Harmon R.S. & Barreiro B (eds.), Shiva Publ., Nantwich, 21-30.

Tesis:

Megard, F. (1973).- Etude géologique d'une transversale des Andes au niveau du Pérou central. These doct., Univ. Sc. Tech. Languedoc, Montpellier, 263p.

Actas de Congresos, coloquios, cursos, symposia:

Ruegg, W. (1968).- Mil kilómetros de geología en la faja Pacífica del Perú meridional. II Jorn. Geol. Argentinas, I, 355-374, Edit. Asoc. Argen. Geol.

SEPARATAS

Los autores recibirán sin costo en total 10 separatas de su artículo. Un número de separatas adicional podrá ser solicitado antes de la impresión teniendo en cuenta los costos respectivos.

LA COMISIÓN EDITORIAL