

# MODELOS DE VELOCIDAD 1-D PARA LAS REGIONES NORTE Y CENTRO DE PERÚ OBTENIDOS A PARTIR DE DATOS DE SISMICIDAD LOCAL: UNA CONTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA PRECISIÓN EN EL CÁLCULO DE LOCALIZACIÓN DE SISMOS

Juan Carlos Villegas y Hernando Tavera

Dirección de Sismología – CNDG  
Instituto Geofísico del Perú  
[jvillegas@axil.igp.gob.pe](mailto:jvillegas@axil.igp.gob.pe)

## RESUMEN

En el presente estudio se proponen 2 modelos de velocidad 1-D para las Regiones Norte y Centro de Perú, con la finalidad de mejorar la precisión en el cálculo de localización de sismos. La metodología empleada corresponde a la inversión de los tiempos de arribo de la onda P de un número de eventos registrados por redes sísmicas locales que fueron instaladas por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). En este sentido, para la Región Norte se contó con un total de 2897 tiempos de arribo correspondientes a 547 eventos registrados durante un periodo de seis años, mientras que, para la Región Central se contó con total de 1425 tiempos de arribo correspondientes a 265 eventos registrados durante un periodo de tres meses. El procedimiento llevado a cabo consistió en realizar múltiples iteraciones a partir de un modelo de velocidad inicial, a fin de seleccionar aquella que mayor estabilidad en la solución y reducción de valores de la raíz media cuadrática (rms). Los resultados obtenidos muestran para la Región Norte un modelo de velocidad compuesto por 6 capas distribuidas hasta una profundidad de 50 km con velocidades que van desde 5.66 km/s en la capa superficial hasta 7.92 km/s para la última capa, de igual forma, para la Región Central el modelo obtenido consta de 6 capas que alcanzan los 50 km de profundidad con velocidades que van desde 5.96 km/s en la capa superficial hasta 8.10 km/s para la última capa, asimismo, utilizando estos modelos de velocidad, se ha logrado reducir los valores de rms residual en un 33% y 52% respectivamente.

## INTRODUCCIÓN

La alta actividad sísmica observada en el Perú debe su origen principalmente a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana y de manera secundaria a los sistemas de fallas presentes sobre el continente. Diariamente en el Perú, se llegan a registrar de tres a cinco eventos sísmicos, muchos de los cuales no son sentidos por la población por ser estos de magnitud baja ( $M_L < 3.0$ ). Ante tal escenario, hoy en día resulta de gran importancia para los sismólogos lograr una óptima precisión en el cálculo hipocentral de eventos sísmicos. En el presente estudio se lleva a cabo la inversión de los tiempos de arribo de las ondas P con el propósito de definir 2 modelos de velocidad 1-D para las regiones Norte y Centro de Perú que permitan obtener mayor precisión en el cálculo hipocentral de los sismos y a la vez sirvan de referencia inicial para realizar estudios de tomografía sísmica tridimensional, además, dichos modelos permitirán tener un mejor conocimiento de la estructura por debajo de la superficie.

## DATOS

El IGP con el propósito de monitorear la sismicidad local ocurrida en el Norte y Centro de Perú, ha instalado 2 redes sísmicas locales denominadas: “Red Sísmica Local Radiotelemétrica del Norte de Perú”, y “Red Sísmica Local Telemétrica del complejo Mantaro – Tablachaca”, compuestas por 8 y 6 estaciones respectivamente (Figuras 1 y 2). De esta manera, la base de datos de la Región Norte considera un periodo de seis años (1996 - 2001), tiempo durante el cual se registraron un total de 1593 eventos, que fueron localizados mediante el algoritmo Hypoinverse (Klein, 1978), considerando una razón de velocidad  $V_p/V_s = 1.75$  (Tavera et al., 2006) y el modelo de velocidad propuesto por Lindo

(1993). Posteriormente, para llevar a cabo el proceso de inversión se realizó una selección de la base de datos considerando los siguientes criterios: (1) aquellos eventos que presenten como mínimo 6 arribos claros de ondas P, (2) una raíz media cuadrática  $rms \leq 0.5$  s, (3) errores en la horizontal (ERH) y vertical (ERZ) menores a 2.5 km y (4) una cobertura azimutal (GAP)  $\leq 200$  grados. Así, considerando estos criterios la nueva base de datos queda compuesta por 2897 arribos de ondas P correspondientes a 547 eventos con magnitudes menores a 4.1  $M_L$  y profundidades menores e iguales a 130 km, distribuidos uniformemente en la región de estudio.

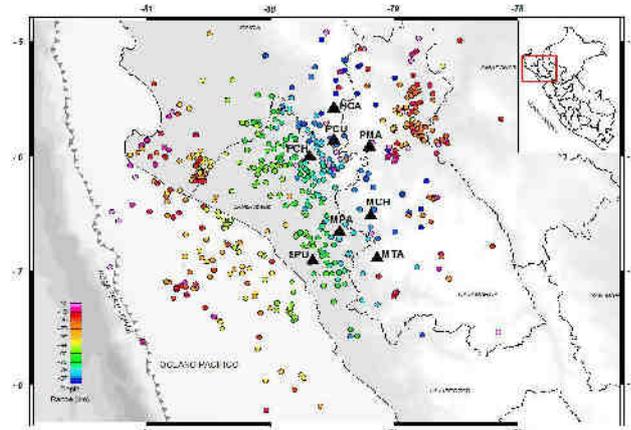


Figura 1. Distribución espacial de la sismicidad registrada por la Red Sísmica Radiotelemétrica de la región Norte de Perú, desde 1996 al 2001, la degradación de colores de los círculos indica el nivel de profundidad denotado en la barra de color. Los triángulos indican la ubicación de las 8 estaciones sísmicas

La base de datos para la Región Central considera el segundo trimestre del año 2007 (Tavera y Bernal, 2007), tiempo durante el cual se registraron un total de 444 sismos que fueron localizados con el algoritmo Hypoinverse (Klein, 1978), considerando una razón de velocidad  $V_p/V_s = 1.66$  (Tavera y Pacheco, 1998) y el modelo de velocidad propuesto por Dorbath (1991). Luego, para llevar a cabo el proceso de inversión, se realizó una selección de eventos considerando los mismos criterios aplicados a la base de datos de la Región Norte. De esta manera, la nueva base de datos quedó compuesta por 1425 arribos de ondas P correspondientes a 265 eventos con magnitudes menores a 2.0  $M_L$  y profundidades menores e iguales a 25 km, distribuidos uniformemente en la región de estudio.

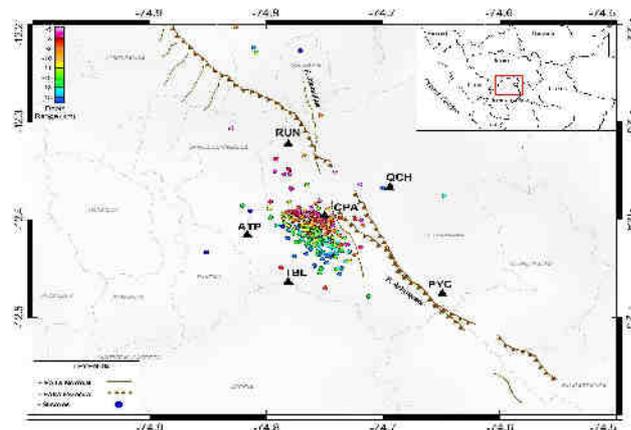


Figura 2. Distribución espacial de la sismicidad registrada por la Red Sísmica Telemétrica del complejo Mantaro – Tablachaca, durante el segundo trimestre del 2007 (círculos). Los triángulos indican la ubicación de las estaciones sísmicas, asimismo se observan las principales fallas tectónicas.

## METODOLOGÍA

La interpretación de los datos en sismología, está fuertemente relacionada a la precisión en la localización de sismos, la cual a su vez depende de la calidad, distribución, número de observaciones y del modelo de velocidad usado para tal fin. Por tal motivo, resulta de gran importancia definir un modelo de velocidad representativo para cada región de estudio. La metodología empleada en el presente estudio resuelve la dependencia que existe entre los parámetros hipocentrales y el modelo de velocidad (Crosson, 1976; Kissling, 1988, Thurber, 1992), mediante el uso del algoritmo de inversión VELEST (Kissling et al., 1994). Este algoritmo lleva a cabo la determinación conjunta de hipocentros (JHD) usando la teoría de trazado de rayos (ray tracing) desde la fuente hasta el receptor, calculando los rayos directos y refractados que atraviesan la estructura de velocidad. Dicho cálculo se obtiene mediante la inversión total de la matriz de mínimos cuadrados amortiguados. El procedimiento consiste en realizar múltiples iteraciones de un modelo de velocidad inicial incrementando el número y espesor de las capas, para luego verificar y unir aquellas que converjan en valores de velocidad similar, logrando así reducir el número de estas hasta llegar a un modelo de velocidad mejor definido, el cual a la vez proporcione menor error en la localización y disminución de los valores de rms residual. Finalmente, esta metodología permite determinar modelos de velocidad 1-D que pueden ser utilizados en las rutinas de localización de sismos y como referencia inicial para estudios de tomografía sísmica 3-D (Kissling, 1988).

## MODELO DE VELOCIDAD PARA LA REGIÓN NORTE

Utilizando un total de 2897 arribos de onda P provenientes de 547 sismos, se ha estimado un modelo de velocidad 1-D para la región de Norte de Perú. Como estación de referencia, se escogió la estación PCU (Porculla), por estar localizada en el centro de la red y por presentar un mayor número de eventos registrados. Como modelo de velocidad inicial se usó el propuesto por Lindo (1993), (Figura 3<sup>a</sup>, línea discontinua), y una razón de velocidad  $V_p/V_s = 1.75$  (Tavera et al., 2006). Luego, haciendo uso del algoritmo Velest (Kissling et al., 1994), se llevó a cabo el proceso de inversión realizando multiples iteraciones para cada test ensayo – error. Finalmente, el modelo de velocidad obtenido, consta de 6 capas que alcanzan una profundidad de 50 km y se distribuyen de la siguiente manera: la primera capa que alcanza los 2 km de profundidad presenta una velocidad de 5.66 km/s, la segunda capa de 2 – 10 km presenta una velocidad de 5.92 km/s, la tercera capa de 10 – 22 km presenta una velocidad de 6.20 km/s, la cuarta capa de 22 – 30 km presenta una velocidad de 6.44 km/s, la quinta capa de 30 – 50 km presenta una velocidad de 6.87 km/s y por ultimo, la sexta capa para profundidades mayores a 50 km presenta una velocidad de 7.92 km/s.

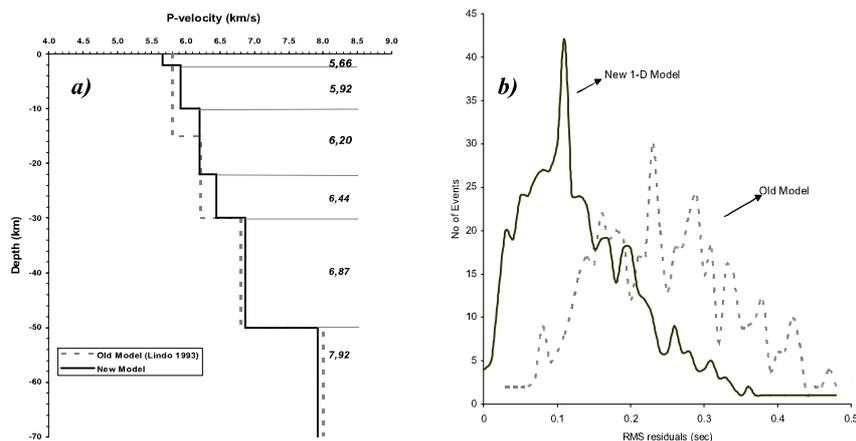


Figura 3. a) Modelo de velocidad 1-D obtenido para la región Norte de Perú (línea continua) y modelo de velocidad inicial (línea discontinua) usado para la inversión. b) Distribución de valores de rms residual obtenidos con el modelo inicial (l. discontinua) y con el modelo final (l. continua).

Por otro lado, el modelo de velocidad obtenido ha permitido reducir los valores de rms residual en un 33% respecto al modelo inicial, notando que para el nuevo modelo predominan valores entre 0.02 s y 0.23 s, mientras que para el modelo inicial prevalecen valores entre 0.1 s y 0.32 s (Figura 3b). De esta manera, el modelo de velocidad obtenido resuelve mejor la localización de sismos en la Región Norte de Perú.

## MODELO DE VELOCIDAD PARA LA REGIÓN CENTRAL

Utilizando un total de 1425 arribos de ondas P provenientes de 547 sismos, se ha estimado un modelo de velocidad 1-D para la Región Central de Perú. Como estación de referencia, se escogió la estación CPA (Carpapata), por estar localizada en el centro de la red y por presentar un mayor número de eventos registrados. Como modelo de velocidad inicial se usó el propuesto por Dorbath (1991), (Figura 4a línea discontinua), y una razón de velocidad  $V_p/V_s = 1.66$  (Tavera y Pérez-Pacheco, 1998). Luego, haciendo uso del algoritmo Velest (Kissling et al., 1994), se llevó a cabo el proceso de inversión realizando múltiples iteraciones para cada test ensayo – error. Finalmente, el modelo de velocidad obtenido, consta de 6 capas que alcanzan una profundidad de 50 km y se distribuyen de la siguiente manera: la primera capa que considera 1 km de profundidad presenta una velocidad de 5.92 km/s, la segunda capa de 1 – 5 km presenta una velocidad de 6.17 km/s, la tercera capa de 5 – 15 km presenta una velocidad de 6.44 km/s, la cuarta capa de 15 – 30 km presenta una velocidad de 6.60 km/s, la quinta capa de 30 – 50 km presenta una velocidad de 6.85 km/s, y por ultimo, la sexta capa para profundidades mayores a 50 km presenta una velocidad de 8.10 km/s.

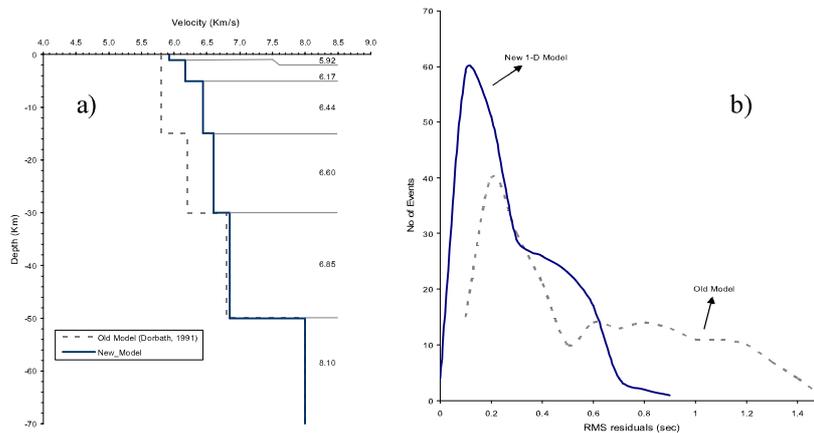


Figura 4. a) Modelo de velocidad 1-D obtenido para la región Central de Perú (línea continua) y modelo de velocidad inicial usado para la inversión (línea discontinua). b) Distribución de valores de rms residual obtenidos con el modelo inicial (l. discontinua) y con modelo final (l. continua).

Por otro lado, el modelo de velocidad obtenido ha permitido reducir los valores de rms residual en un 52% respecto al modelo inicial, notando que para el nuevo modelo predominan valores entre 0.01 s y 0.6 s, mientras que para el modelo inicial prevalecen valores entre 0.1 s y 1.4 s (Figura 3b). De esta manera, el modelo de velocidad obtenido, resuelve mejor la localización de sismos en la Región Central de Perú.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente estudio se proponen dos modelos de velocidad 1-D para las Regiones Norte y Centro de Perú, deducidos a partir de la inversión de los tiempos de arribo de la onda P. Estos modelos han permitido obtener una mayor precisión a la hora de realizar el cálculo hipocentral de los eventos sismos, lo cual queda evidenciado por la disminución de valores de rms residual, observando una disminución del 33% para la región Norte y 52% para la región Centro (Figura 3b y 4b).

En la Figura 3a se muestra el modelo de velocidad obtenido para la Región Norte de Perú (línea continua), el cual está compuesto por 6 capas con velocidades que se incrementan desde 5.66 km/s para la primera capa hasta 7.92 km/s para la última que considera profundidades mayores a 50 km. Asimismo, en la Figura 4a se muestra el modelo obtenido para la Región Central, el cual consta de 6 capas con velocidades que se incrementan desde 5.96 km/s para la primera capa hasta 8.10 km/s para la última que considera profundidades mayores a 50 km. De acuerdo a los resultados, ambos modelos presentan un incremento en el valor de las velocidades para las primeras capas respecto a los modelos iniciales, lo cual indicaría que los materiales que conforman estas capas presentan una mayor densidad. Por otro lado, el cambio de velocidad observado a los 50 km de profundidad en ambos modelos, estaría relacionado a la discontinuidad de Mohorovicic, lo cual es coherente con los resultados obtenidos por Lindo (1983) y Manrique y Tavera (2003).

Por lo expuesto, los modelos de velocidad 1-D obtenidos en el presente estudio resuelven mejor la localización de sismos en las regiones de estudio, por lo tanto, pueden ser utilizados como modelos de referencia en las rutinas de localización y en estudios de tomografía tridimensional.

## REFERENCIAS

- Crosson, R.S. 1976. Crustal structure modeling of earthquake data, 1, Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters. *J. Geophys. Res.* 81, 3036-3046.
- Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E. y 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.
- Kissling, E. 1988. Geotomography with local earthquake data. *Rev. Geophys.* 26, 659-698.
- Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D. and Kradolfer, U. 1994. Initial reference models in local earthquake tomography. *J. Geophys. Res.* 99, 19635-19646.
- Kissling, E. 1995. *Velest Users Guide*, Internal report Institute of Geophysics, ETH Zurich, p. 26.
- Klein, F. 1978. Hypocenter location program Hypoinverse. U.S.G.S . OpenFile Report, p. 78-694.
- Lindo, R. 1993. *Seismotectonique des andes du Perou central: Apport des donnees sismologiques de haute precision*. Ph.D. Thesis, Universite Louis-Pasteur, Strasbourg, France. p. 74.
- Manrique M. Tavera 2003. Estimación del espesor de la corteza continental en Centro y Sur de Perú a partir de fases PmP. *Compendio de Trabajos de Investigación. CNDG – Sismología. IGP.* v. 4. p. 53-64.
- Tavera, H. y Perez-Pacheco, Y. 1998. Actividad sísmica en la cuenca del Mantaro, Tablachaca-Mantaro. *Informe Técnico – Primer trimestre 1998. Convenio Electroperú-IGP.*
- 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, p. 15-24.
- Tavera, H. y Bernal, I. 2007. Análisis de la actividad sísmica local registrada por la red sísmica telemétrica del complejo Mantaro – Tablachaca, Electroperú. *Informe Técnico – Instituto Geofísico del Perú.* 6: p. 279-283.