

Modelado 2D de la geometría de subducción Nazca-Sudamérica al oeste de Perú mediante la integración de datos geofísicos

*Willianny Carolina Castellanos Veracierta, williannycc@gmail.com,

**Janckarlos Reyes, janckarlos@gmail.com,

Universidad Central de Venezuela (UCV)

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBgf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumen

Se realizó un estudio de la geometría de subducción Nazca-Sudamérica al oeste de Perú mediante la integración de datos gravímetros satelitales con datos de sismicidad, con el objetivo de generar modelos del subsuelo que se ajusten a las condiciones geológicas y estructurales presentes en el área. Para ello se describieron las características y tendencias de las anomalías gravimétricas mediante el análisis estadístico, el reconocimiento de los rasgos tectónicos y estructurales a partir de mapas de anomalías gravimétricas, determinación de las variaciones del ángulo de subducción mediante el estudio de la distribución de focos sísmicos y estimación de profundidades de la corteza, mediante el análisis espectral y la Deconvolución de Euler de las anomalías de Bouguer.

Introducción

El borde occidental de Sudamérica se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas del mundo. Esta actividad sísmica debe su origen al proceso de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa continental Sudamericana, generando la actual topografía que se caracteriza por la formación de la cordillera Andina (Dewey y Bird, 1970; Dickinson, 1971; Audebaud, 1973). Debido a las estructuras geológicas definidas en esta área y por su potencial sísmico, este proceso ha sido objeto de numerosos estudios que buscan reflejar, a partir del análisis de eventos sísmicos, la geometría de subducción de la placa oceánica (Berazangi y Isacks, 1976; Tavera; Cahill e Isacks, 1992).

En general, los autores sugieren, mediante el estudio detallado de la distribución espacial de terremotos, que la placa de Nazca posee una geometría muy heterogénea, caracterizada principalmente por presentar diferentes tipos de subducción según el ángulo de buzamiento de la placa debajo del continente

Siguiendo esta línea, se plantea realizar modelos perpendiculares a la dirección de la subducción, que describan la geometría de la misma en diferentes zonas, por medio de la integración de datos gravimétricos y focos sísmicos. Esto representa un aporte general a la comunidad científica ya que permite comprender el proceso geodinámico involucrado en la interacción de las placas de Nazca y Sudamérica en el borde oeste de Perú. Además, la interpretación obtenida del análisis de los datos gravimétricos, complementa la información que

se tiene acerca de la sismicidad de la zona, disminuyendo así la incertidumbre que existe en los modelos preexistentes. La zona de estudio se encuentra ubicada en la región oeste de Perú, enmarcada entre las latitudes 5°S y 25°S y las longitudes 65°W y 85°W (fig 1).

Metodología

Los datos gravimétricos utilizados pertenecen a la base de datos del Centro Internacional de Modelos Globales de la Tierra (ICGEM del inglés International Centre for Global EarthModels), disponibles en la página web: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calc>. Mediante esta página, se descargaron los datos de anomalías de Bouguer simple, con una resolución de 0.005°. Los valores se encuentran georeferenciados al Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84) a una altura de cero metros sobre el nivel del mar y calculados a partir del modelo EIGEN-6C4, el cual emplea un valor de densidad de Bouguer de $\rho_B = 2.67 \text{ g/cm}^3$. Los datos de sismicidad fueron obtenidos del catálogo de Instituciones de investigación incorporadas para sismología (IRIS del inglés Incorporated Research Institutions for Seismology) disponible en la página web: www.ds.iris.edu.

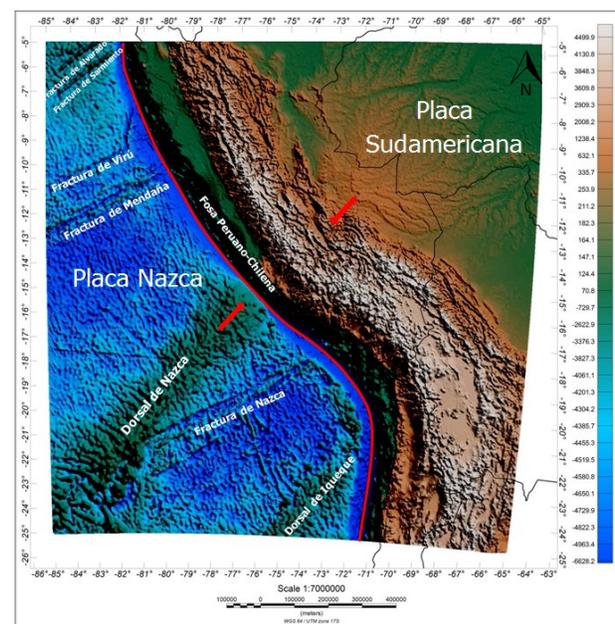


Figura 1 –Ubicación del área de estudio con las estructuras presentes en la placa Nazca. Las flechas indican la dirección de convergencia de las placas.

Para la etapa de correcciones de las anomalías gravimétricas se realizó únicamente la corrección topográfica de los valores de anomalías de Bouguer debido a que los datos descargados pertenecen a los valores de anomalías de Bouguer simple. Para realizar esta corrección se descargaron dos archivos topográficos del modelo ETOPO1 en la página del Centro Internacional de Modelos Globales (ICGEM, 2016). El primero con dimensiones iguales al área de estudio y resolución de 0.05°, el segundo modelo posee una mayor extensión y resolución de 0.1. El cálculo de la corrección topográfica se realizó mediante el empleo del software de procesamiento Oasis Montaj v.6.4.2 de la empresa Geosoft, en el cual se exportaron los archivos de topografía y se generaron los mallados correspondientes.

Seguidamente se realizó un estudio estadístico de los datos, la característica más resaltante fue la distribución de los datos gravimétricos (fig 2), la cual posee un comportamiento multimodal agrupándose en tres poblaciones principales que, de acuerdo a un estudio de análisis de conglomerados de K-medias, pertenecen a las respuestas regionales asociadas a la placa oceánica, la cordillera andina y la placa continental sudamericana (fig 3).

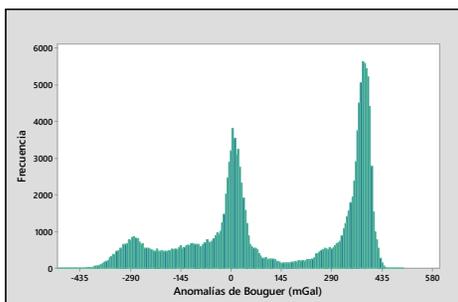


Figura 2 –Histograma de frecuencia del análisis estadístico de las anomalías gravimétricas.

Posteriormente se generaron los mapas de anomalías utilizando el software Oasis Montaj Versión 6.4.2. En estas anomalías, por poseer componentes regionales y residuales, es necesario resaltar sus rasgos para lograr una mejor visualización y facilitar la interpretación de los datos. En este sentido, se utilizó el método de continuación analítica hacia arriba mediante la extensión MAGMAP del mismo software. Como resultado final se escogió aquel mapa que mejor acentuara los efectos regionales, siendo el correspondiente a la continuación del campo de 8 km ya que a estas alturas se disminuyen los efectos causados por las altas frecuencias y se obtienen solamente las contribuciones más regionales.

Para definir la profundidad y contribución de las fuentes geológicas, pertenecientes a las respuestas observadas en el mapa de anomalías de Bouguer se calculó el análisis espectral. En este caso, se subdividió el área de estudio en áreas menores de 3° por lado para evitar que los resultados fuesen influenciados por las respuestas anómalas pertenecientes a las diferentes poblaciones identificadas en el análisis estadístico (fig 4). Luego de subdividir el área se calculó el espectro de potencia en

cada subárea obteniendo los valores de profundidad de los cuerpos pertenecientes. Se estimó las profundidades de los topes de las fuentes expresadas en el análisis espectral a partir de la división de cada pendiente por el cociente 4π (Spector and Grant 1970).

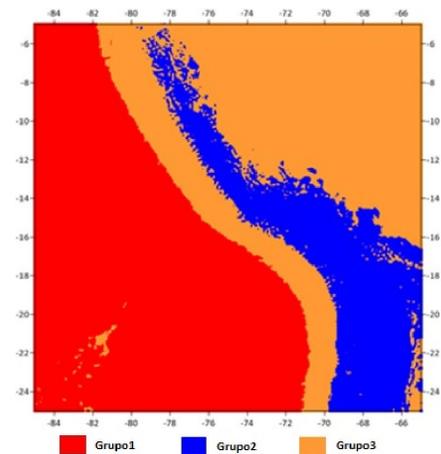


Figura 3 – Ubicación geográfica de los datos de anomalías de Bouguer correspondiente al análisis de conglomerados de K-medias. Grupo1: Placa de oceánica, Grupo2: Cordillera andina y Grupo3: Placa Continental

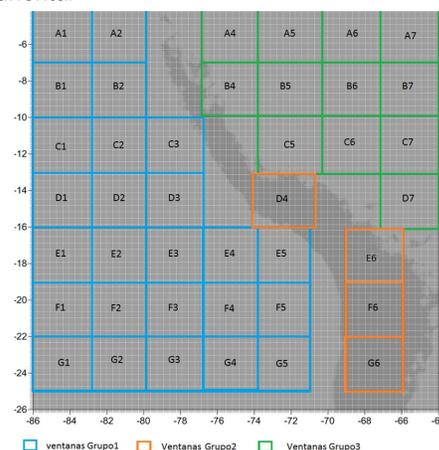


Figura 4 – División del área de estudio para el análisis espectral de anomalías gravimétricas

Seguidamente se realizó el cálculo de la Deconvolución de Euler para estimar la profundidad de los contactos de los cuerpos geológicos mediante la extensión de Euler 3D del software Oasis Montaj. En esta fase del procesamiento se realizaron pruebas variando los distintos parámetros, como es el caso del índice estructural, la tolerancia y el tamaño de la ventana. La Deconvolución de Euler se aplicó de forma separada, de acuerdo a las características de las poblaciones que presentan la base de datos de estas anomalías, con el fin de ajustar los parámetros lo mejor posible a las características estructurales de cada población.

En cuanto a la construcción del modelo geométrico, este comprende la aplicación del modelado directo sobre

perfiles gravimétricos a partir del estudio espectral, utilizando como restricción la información geológica y geofísica existente en el área de estudio. La razón por la se ubicaron los perfiles en esta zona es para observar la variación del ángulo de inmersión de la placa de Nazca en el modelo geométrico. Adicionalmente, se adjuntaron a los perfiles las profundidades de los eventos sísmicos que se encontraban justo por donde se extiende el perfil con el fin de observar la tendencia de la placa de Nazca en la zona de subducción.

Resultados

El mapa de anomalías de Bouguer muestra un amplio espectro de valores que van desde -288 mGal a 400 mGal. Hacia el oeste del mapa, la tendencia de las anomalías de Bouguer presentan una orientación preferencial noreste (fig 5). En esta área se pueden observar dos máximos, con dirección aproximada N45°E y valores de anomalías de 400 mGal, cuya respuesta puede estar asociado al pequeño espesor cortical que presenta la placa en esta zona. Se observa que estas respuestas están divididas por una estructura alargada con dirección N45°E, asociada a la Dorsal de Nazca, sus valores representan un mínimo de acuerdo al espectro de amplitudes de anomalía que presenta la placa de Nazca asociado al aumento del grosor de la corteza en esta zona.

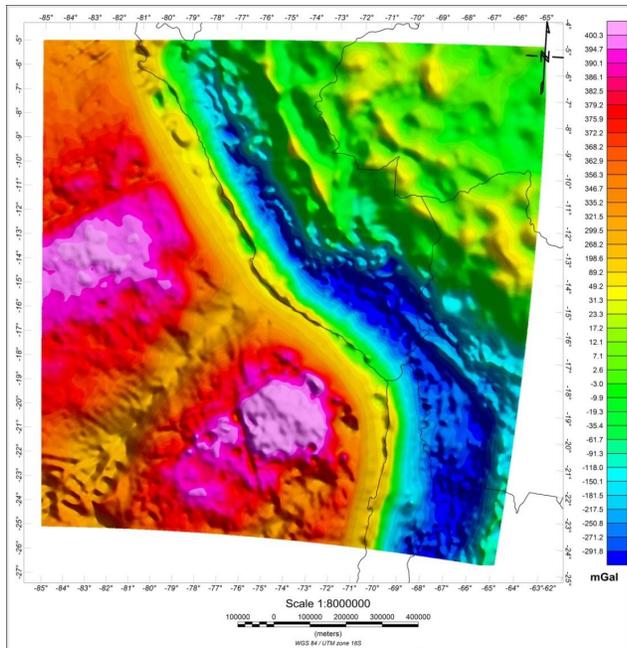


Figura 5 – Mapa de anomalías de Bouguer completa.

En el grupo de anomalías que se asocia a la placa oceánica se identificaron tres niveles de profundidad bien establecidos en cada uno de los análisis espectrales de esta población. Estos resultados podrían estar asociados al límite entre la capa de agua y la corteza oceánica (nivel más somero), a la base de la corteza oceánica (nivel intermedio) y una tercera capa profunda. Cabe

resaltar que el nivel de sedimentos que posee la corteza oceánica es bastante delgado, en consecuencia, al realizar el análisis espectral este espesor no se identifica por su pequeño grosor (inferior a 1 km) en comparación a la capa superior (capa de agua con aproximadamente 4.5 km de espesor) y la capa inferior (corteza oceánica con aproximadamente 10 km).

Hacia el este del mapa también se encontraron tres niveles de profundidades en el análisis espectral, asociado a una capa de cuerpos sedimentarios, el límite entre la corteza superior e inferior y a la discontinuidad corteza manto. En el área de la Cordillera de los Andes, se realizaron pocos espectros de potencias debido a la configuración de la ventana; los resultados obtenidos fueron tres profundidades, una fuente somera, asociado posiblemente a cuerpos que conforman la base de la cordillera, una fuente intermedia que podría estar asociado al límite entre la placa continental superior e inferior y una fuente profunda asociada a la discontinuidad corteza manto.

A partir de los valores obtenidos en el análisis espectral referente a la discontinuidad entre la corteza y el manto se construyó un mapa con el fin de verificar su variación en toda el área de estudio (fig 6). En dicho mapa se observa que la base de la corteza oceánica se encuentra a profundidades promedio de 8 km, aumentando en dirección noreste hasta alcanzar valores de 40 km de profundidad aproximadamente. Adicionalmente, se observa que este valor cambia de forma drástica en la región de la cordillera Andina, donde la corteza continental alcanza profundidades que superan los 70 km en la región sureste del mapa.

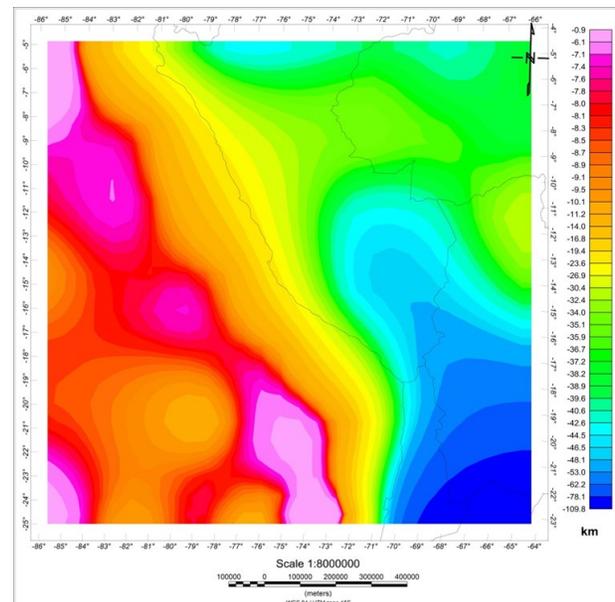


Figura 6 – Variación de la profundidad de la base de la corteza oceánica y continental.

Los resultados relacionados a la Deconvolución de Euler muestran una alineación con en el sistema de fallas de

Nazca, los puntos se alinean en la misma dirección y alcanzan profundidades alrededor de 9 km (fig 7).

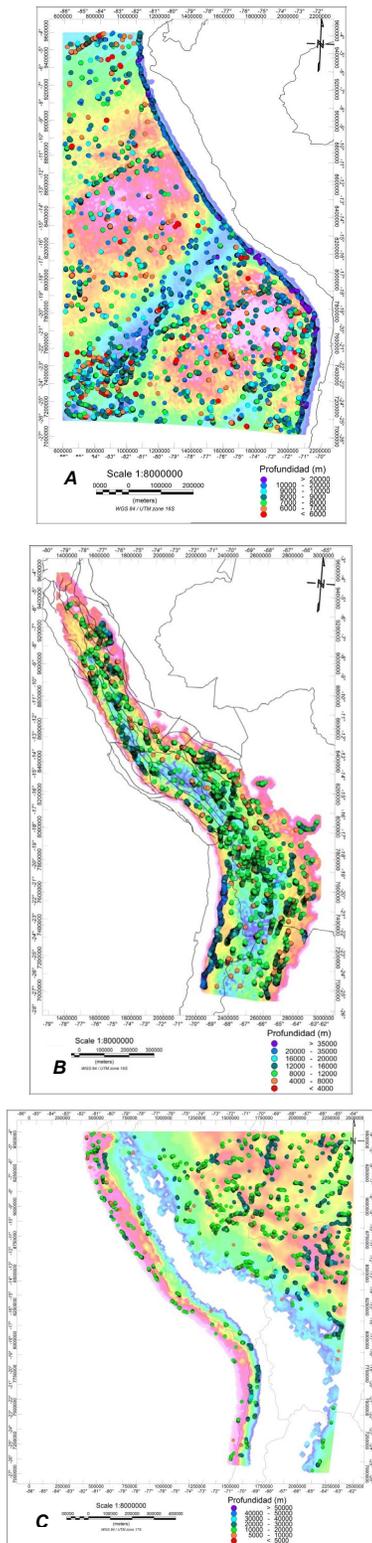


Figura 7 – Mapas de Deconvolución de Euler pertenecientes a los datos de anomalía de Bouguer de la placa oceánica (A), cordillera Andina (B) y placa continental (C).

La distribución de los focos sísmicos es de forma paralela a la línea de costa, mostrando mayor índice de sismicidad en la región sur del área de estudio (fig 8). Se observa que la mayoría de los focos sísmicos superficiales, se distribuyen entre la fosa y la línea de costa, siendo esta zona donde se producen los sismos de mayor magnitud. Los focos sísmicos a profundidad intermedia, se distribuyen, en mayor cantidad, paralelo a la línea de costa a partir de los 10°S y los sismos profundos, pertenecientes al área peruana, se encuentran distribuidos en la región sur y unos pocos, se distribuyen de forma dispersa en la región centro-norte de Perú.

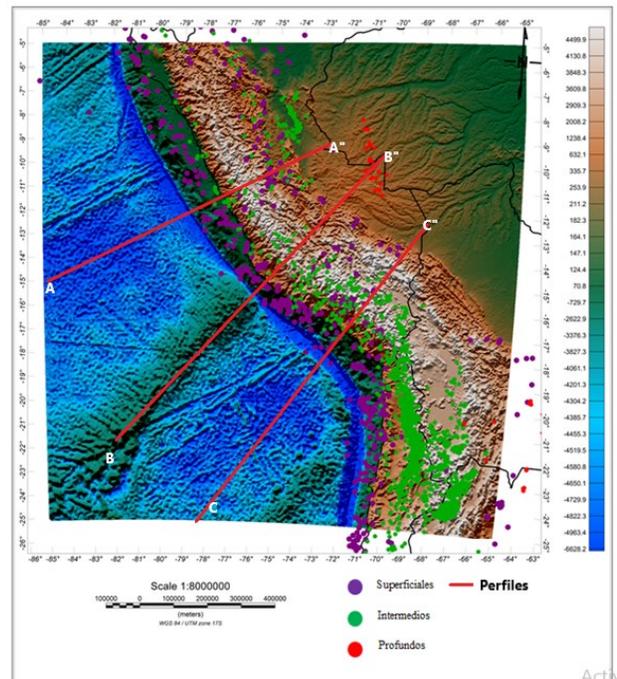


Figura 8 – Mapa de distribución de los focos sísmicos y ubicación de los perfiles. Focos sísmicos a profundidad superficial ($60 < h$), focos sísmicos a profundidad intermedia ($60 < h < 300$), focos sísmicos profundos ($300 < h$).

Los perfiles A, B y C de los datos gravimétricos modelados, se observan dos zonas con diferentes configuraciones geométricas (Fig 9). La curva del perfil de anomalía gravimétricas muestra una respuesta constante hacia el oeste del perfil asociado a la respuesta de la placa de Nazca y la litosfera oceánica, posteriormente en la región central del perfil se observa que la respuesta cambia a valores negativos de anomalías para luego mostrar un crecimiento de la curva en el extremo Este con valores intermedios. Esta variación está asociada al cambio de respuesta oceánica a continental, evidenciando que hacia el área oeste las estructuras poseen una mayor densidad que las estructuras ubicadas hacia el Este del perfil (tabla 1).

En el perfil A (fig 9-A), la placa de nazca posee un grosor

de 8 km. En la región central se observa que la placa oceánica inicia la subducción debajo de la placa sudamericana con un ángulo de 30° , alcanzando una profundidad de 100 km aproximadamente, posteriormente la subducción de la placa se realiza de forma casi horizontal con un ángulo de 15° . A partir de este punto, la placa de Nazca subduce de manera casi horizontal hasta una distancia de 500 km aproximadamente desde la fosa. La placa continental está conformada por una corteza superior de aproximadamente 20 km de espesor la cual aumenta en la región de Los Andes hasta 25 km. Parte de su litología está representada por una serie sedimentaria que comprende rocas que van desde el Pre-Cámbrico hasta el cuaternario y su espesor es de aproximadamente 5 km

Tabla 1 – Leyenda de las estructuras y densidades de los cuerpos presentes en los perfiles trazados en

Leyenda	Estructura tectónica	Densidad (g/cm^3)
	Placa Nazca	2,9
	Placa continental superior	2,63
	Placa continental inferior	2,87
	Manto litosférico	3,33
	Manto astenosférico	3,33

En el perfil B (Fig 9-B), se observa que el grosor de la corteza oceánica es de 27 km aproximadamente y subduce con un ángulo de 30° hasta 100 km de profundidad, a partir del cual se desplaza con un ángulo de 10° aproximadamente. La corteza continental muestra un espesor en la región central de aproximadamente 40 km. Luego su grosor aumenta drásticamente hasta alcanzar una profundidad máxima de 65 km asociada a la raíz de la cordillera andina. Posteriormente, su espesor disminuye a 40 km en la región este del perfil correspondiente a la región subandina de la Llanura Amazónica.

En el perfil C (Fig 9-C), el grosor de la corteza oceánica es de 10 km aproximadamente con una configuración suave, para luego doblarse con un ángulo de 30° , el cual se mantiene en toda la subducción de la placa. El límite corteza-manto se encuentra aproximadamente a 40 km en la región central del perfil. Este valor aumenta a profundidades de 72 km aproximadamente debido a que las dimensiones de la cordillera andina aumentan en esta área. En la región este, el comportamiento de la placa continental es similar a los perfiles anteriores, ya que su espesor disminuye a 42 km a partir de la región subandina

Discusión y Conclusiones

La corteza oceánica presenta valores de anomalías de Bouguer más elevados en comparación a las respuestas asociadas a la placa continental sudamericana producto de la diferencia de densidad de los cuerpos que componen estas estructuras tectónicas. La placa de Nazca presenta máximos gravimétricos locales causado por su delgado grosor en estas zonas y mínimos gravimétricos locales como respuesta de la Dorsal de Nazca, ya que en esta área la corteza posee un mayor grosor producto a la antigua zona de acreción durante el Cenozoico temprano. El área central del mapa que representa valores de anomalías de Bouguer inferiores a 2 mGales indica el engrosamiento de la corteza continental correspondiente a la formación de la cordillera de los Andes.

De acuerdo al análisis espectral el límite entre la corteza oceánica y el manto se encuentra a 8 km de profundidad aproximadamente mostrando diferencias en el área de la dorsal de Nazca donde el límite de corteza alcanza valores de profundidad de 20km. Respecto a la placa continental el límite corteza-manto se encuentra a 40 km de profundidad en la región subandina y supera los 60 km de profundidad en el área de la cordillera de los andes. Adicionalmente, los resultados de Deconvolución de Euler muestran una relación directa con las

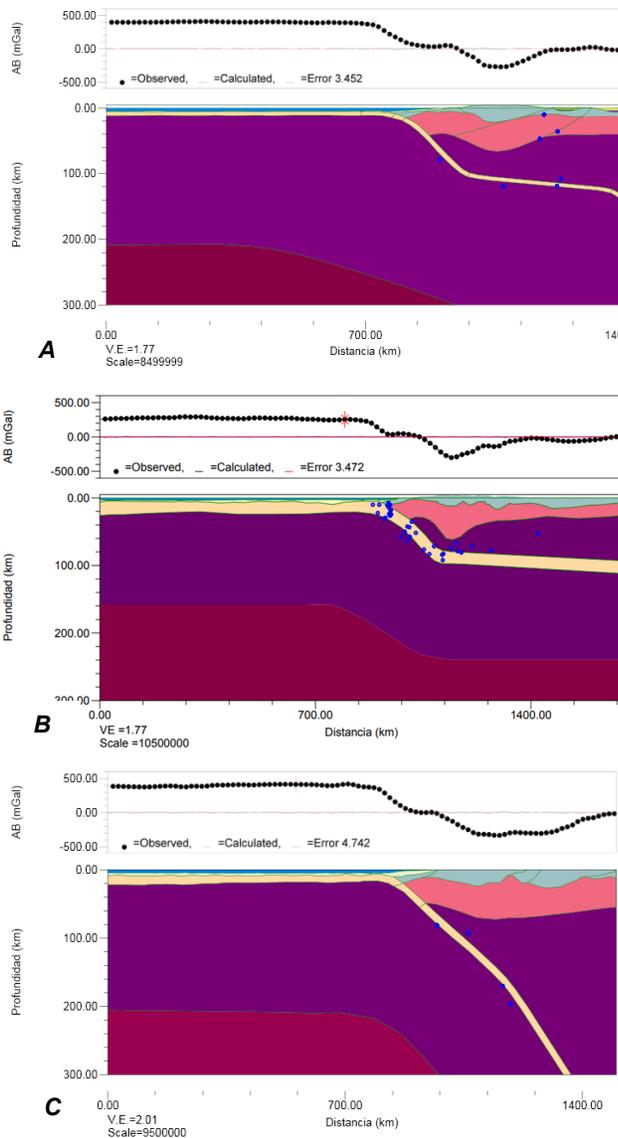


Figura 9 – Modelos geológico. Los puntos azules indican la ubicación de los focos sísmicos.

respuestas observadas en el mapa de anomalías de Bouguer revelando las mismas tendencias estructurales; sus respuestas muestran correlación con las profundidades estimadas en los análisis espectrales, lo que permitió tener un mayor control al momento de construir los modelos geométricos de subducción

De acuerdo a los perfiles perpendiculares a la línea de fosa, la placa de Nazca posee un comportamiento homogéneo sobre la litosfera oceánica. En la región norte de Perú la placa subduce con un ángulo de 30° hasta 100 km de profundidad a partir del cual se desplaza con un ángulo de 10° lo que indica la presencia de subducción plana en esta zona. En la región sur el ángulo de incidencia es de aproximadamente 30° sin mostrar variaciones durante el proceso de subducción de la placa lo que indica subducción de tipo normal en esta área.

La discontinuidad corteza-manto se mantiene relativamente constante en la región este de los perfiles (entre 8 y 20 km) y aumenta en sentido Este alcanzando profundidades entre 60 km y 70 km correspondiente a la raíz de la cordillera Andina para luego disminuir a 40 km aproximadamente en la región subandina.

Al estudiar las anomalías gravimétricas por separado, de acuerdo al análisis de conglomerados de k-medias, se pudo tener un mejor control de las profundidades de los cuerpos presentes en el área de estudio evitando la influencia de las fuentes regionales identificadas en las anomalías gravimétricas. Adicionalmente, la integración de los datos de anomalías de Bouguer y la distribución espacial de los eventos sísmicos permitió disminuir la incertidumbre al momento de ajustar los cuerpos presentes en el área de estudio obteniendo un mejor control al modelar la geometría de placa oceánica en la zona de subducción.

Agradecimientos

Agradecemos a la UCV (Universidad central de Venezuela) y a la escuela de geofísica quien nos apoyó en esta investigación

Referencias

Audebaud, E., Capoevila, R., Dalmayrac, B., Laljnaucher, O., Marú'o, R., Maiiauer, M., MF.Card, Fi y Pareotis, 1. (1973). Les traits geologiques essentials des Andes Centrales (Perou-Bolivie). Rev Geogr Phys. Geol. Dyn., 15 (1-2): 73- 114

Barazangi, M. y Isacks, B. (1976). Spatial distribution of earthquake subduction of the Nazca plate beneath América. Geology, Volumen 4, 686-692p

Cahill, T. y Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. Jour Geoph. Res. 97, 17503-17529p

Dewey J. & BirdJ. (1970). Mountain belts and the new Global Tectonics. Jour. Geophys. Res., 75: 2625-2647.

Dickinson W (1971). Plate tectonics models geosynclines. Earth Panet Sci. Letters, 10:165-174p.

Spector, A. y F. Grant. (1970). Statistical models for interpreting aero-magnetic data. Geophysics, 35: 293-302.

Tavera, H. y Buforn, E. (1998). Sismicidad sismotectónica de Perú en: A. Udías y E. Buforn (ed). Sismicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica. Física de la Tierra, UCM. N°10,187-219p.