

II ENCUENTRO DE JÓVENES INVESTIGADORES

INTERPRETACIÓN DE LAS PRINCIPALES ESTRUCTURAS DEL NOROESTE DE LA PROVINCIA BASÁLTICA DE PAYENIA A PARTIR DE UN ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO.

ESTUDIOS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO

Sheila Anci¹, Gemma Acosta¹

¹Instituto Geofísico Sismológico “Ing. F. S. Volponi” – FCEFEN - Universidad Nacional de San Juan y CONICET. E-mail: sheilaanciaraniti@gmail.com

OBJETIVOS

Este Trabajo tiene como objetivo principal la caracterización geofísica de los depocentros andinos del borde noroeste de la cuenca Neuquina situados en la provincia geológica de Payenia. Para ello se prepararon modelos corticales por inversión de campos potenciales, con énfasis en la resolución de estructuras ubicadas en la corteza superior. Se efectuó la integración de la información geológica y geofísica en el modelado de estructuras de interés tectónico y económico. Los modelos de inversión conjunta de campos potenciales se combinaron con sísmica de exploración y geofísica de pozo, para resolver las ambigüedades en el modelado.

Para alcanzar dicho objetivo fue necesario:

Efectuar el control de calidad, procesamiento e integración de datos magnéticos aéreos y terrestres existentes.

Adquisición de datos magnéticos y gravimétricos terrestres de detalle mediante el empleo de instrumental geofísico-geodésico moderno.

Procesamiento de datos, reducciones y transformaciones para la producción de cartas de anomalías magnéticas y gravimétricas.

Identificación de estructuras mediante aplicación de técnicas de filtrado y de resalto de anomalías.

Mapeo del basamento desde el análisis de Fourier. Interpretación semi-automática de anomalías magnéticas y gravimétricas. Identificación de las principales estructuras corticales mediante el tratamiento de datos gravi-magnetométricos. Mapeo de estructuras multicapas desde la inversión del número de onda.

Modelaje de la corteza superior mediante inversión gravimétrica en 3D.

ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN

INTRODUCCIÓN

La zona en estudio abarca el sur de la provincia de Mendoza y se extiende hasta el noroeste de la provincia de Neuquén entre los paralelos 35°S y 37°S y los meridianos 68°O y 70°O (Figura1). En la región se encuentran diferenciados tres ambientes morfo-estructurales: Cuenca Neuquina, Cordillera Principal y Payenia. Aquí se abordaron los depocentros septentrionales del sector andino de la Cuenca Neuquina, con buena cobertura de datos.

La cuenca Neuquina es una cuenca extensional de tras-arco formada en el borde occidental de Gondwana (Ramos, 1988). Cubre una región de 115.000 kilómetros cuadrados, hasta alcanzar espesores totales de 7 kilómetros. El basamento de la cuenca está integrado, en líneas generales, por plutonitas y volcanitas del Pérmico superior-Triásico inferior del Grupo Choiyoi. En planta la cuenca posee geometría triangular (Figura 1) y se la puede dividir en dos sectores: el sector andino ubicado al oeste (objeto de este trabajo) y afectado por la deformación cretácico-cenozoica y el sector del engolfamiento, ubicado al este del anterior.

La estructura de la cordillera andina en este sector es compleja, dada las imbricaciones en que interviene el basamento Permo-Triásico y el control estructural del fallamiento extensional previo. El este de la región abarca la subcuenca de Palauco, que se extiende hacia el oriente hasta los afloramientos de basamento del bloque de San Rafael. Donde se

desarrollan una serie de estructuras en el basamento, de menor relieve y resueltas en niveles sedimentarios del Terciario, generando los anticlinales Cerro Fortunoso y Rincón Amarillo, representando el frente de deformación expuesto (Kozłowski et al. 1993, Silvestro-Atencio 2009). Los mayores espesores de la cuenca se preservan en la sierra de Palauco, con valores del orden de los 2.000 m.

Esta comarca presenta una serie de volcanes pleistocenos en los que se destacan los grandes estratovolcanes cuaternarios. Este segmento andino corresponde a una subducción normal, con la zona de Benioff que inclina unos 30° por debajo del antepaís, que constituye la provincia basáltica de Payenia (Ramos, 1988). Representa una típica asociación de retroarco con dos picos de actividad, el más antiguo es mayormente mioceno (26 a 8 Ma) y el más joven es Plioceno - Holoceno (<5 Ma). Su mayor desarrollo areal se encuentra en una faja N-S, deprimida, situada al pie de los Andes, denominada depresión central (Llambías et al., 2010). Corresponde mayoritariamente a extensas coladas basálticas, que cubren los depocentros enmascarando las estructuras geológicas de interés prospectivo.

Las mediciones precisas de gravedad y su posterior interpretación permitieron identificar, mínimos gravimétricos asociados con depocentros y a las estructuras que los limitan como altos estructurales. El basamento antiguo fallado se encuentra tapado por sedimentos y coladas basáltica y los corrimientos modernos han sobreimpuesto sobre él, el estilo compresivo andino actual. No obstante ese basamento controla, según nuestra interpretación, tanto los centros efusivos (zonas de debilidad para el ascenso de materiales magmáticos) como los depocentros sedimentarios presentes, con profundidades máximas de entre 2 y 6 Km.

En el presente trabajo se realizaron modelos por inversión gravimétrica de manera de cuantificar la relación que existe entre la señal gravimétrica y las estructuras subsuperficiales. La señal gravimétrica coincide en buena medida con el esquema propuesto por Silvestro y Atencio (2009) que involucra contraposición de estilos estructurales de deformación de piel fina (hacia el oeste) y de piel gruesa hacia el este del anticlinal de Palauco. En el límite con el Bloque de San Rafael el modelo gravimétrico resuelve un depocentro no reportado hasta el presente que denominamos “La Regalada” (Figura 3).

DESARROLLO

Datos y métodos

Durante el año 2012, se realizaron campañas de mediciones gravi-magnetométricas a fin de obtener datos que permitan estudiar las estructuras de la corteza superior en la zona de estudio. Estas mediciones completaron una base de datos de 2500 estaciones de gravedad y magnéticas de campo total, georeferenciadas a partir de mediciones GPS de doble frecuencia en modo diferencial en pos-proceso. Para el estudio del campo gravitatorio regional se incorporaron más de 15000 puntos de gravedad de la base de datos del Instituto Geofísico Sismológico (IGSV) de la Universidad Nacional de San Juan (Figura 1).

Los valores de cada estación gravimétrica se refirieron al sistema IGSN 1971, vinculando las mediciones con el Nodal 96 (Malargüe) del Instituto Geográfico Nacional (Ex IGM).

En las mediciones se emplearon dos gravímetros relativos automáticos marca Scintrex Autograv, modelos CG-5 y CG-3. Con resoluciones de 0,001 mGal y 0.005 mGal, respectivamente. Para asegurar la precisión del instrumento ($gn=\pm 0,020$ mGal) en las campañas, se realizaron controles de deriva instrumental y controles de calibración (**Ruiz et al. 2008**).

Procesamiento

Las mediciones de gravedad realizadas sobre la superficie topográfica contienen la contribución de la rotación terrestre, altitud y configuración de las masas existentes. Estos valores representan al campo gravitatorio actuante en cada punto estación, pero para cumplir con el objetivo de la prospección geofísica, es necesario comparar dicho campo con uno normal, del tal forma que de la comparación surjan las anomalías de gravedad que representan la respuesta de gravedad de las estructuras del subsuelo.

Las anomalías de gravedad se calcularon en base a las clásicas expresiones (**Introcaso 1997**):

$$AAL(mGal) = gobs - (\square - CAL)$$

$$AB(mGal) = gobs - (\square - CAL + CB)$$

$$AB_{\text{completa}}(\text{mGal}) = g_{\text{obs}} - (\square - \text{CAL} + \text{CB}) + \text{CT}$$

Para la reducción de Aire Libre se adoptó la expresión propuesta por **Heiskanen y Moritz (1967)**

En tanto que para la reducción de Bouguer se asumió una densidad convencional de: 2.67 g/cm^3 ; $\text{CB} = 0.1119 \text{ h}$, donde h es la altura sobre el nivel medio del mar expresado en metros.

Para la gravedad teórica o normal, se utilizó la expresión para el elipsoide Internacional de 1967 (GRS67):

$$\gamma_{(1967)} = 978031.8(1 + 0.0053024.\text{sen}^2\varphi - 0.0000058.\text{sen}^2 2\varphi)$$

Se efectuó una corrección topográfica a las anomalías de Bouguer. Para ello se usó el modelo digital del terreno SRTM90 (Farr et al., 2007). El cómputo se efectuó a través de módulo Terrain Corrections del sistema Oasis Montaj (www.Geosoft.com) implementado por Phillips (2007). Para el cómputo de la corrección topográfica el programa utiliza los métodos desarrollados por Nagy (1966) y Kane (1962).

La carta de ABct (figura 2a) se obtuvo combinando los datos regionales con baja resolución en zonas de la Cordillera Principal con valores obtenidos por técnicas de predicción mediante regresiones estadísticas AB versus H donde no existen datos medidos (**Ruiz e Introcaso, 1999**), luego de la predicción se obtuvo la carta desde los datos interpolados con resolución de 5 km desde la base de datos regional en la región comprendida por las longitudes 72°W a 66°W y las latitudes 33°S a 40°S .

Obtención del efecto gravitatorio de la corteza superior

En este estudio, el objetivo es separar e identificar los efectos relacionados con las estructuras de la corteza superior (Ares). Si se cuenta con un mapa de anomalías regionales apropiado, las Ares pueden determinarse a partir de la diferencia entre las ABct y esta regional. Para ello se utilizaron combinaciones de métodos analíticos de filtrado: prolongación de campos, filtros espectrales interactivos para separar los efectos desde las tendencias estadísticas observadas en el espectro radial complejo de la señal observada

(Nabighian et al., 2005) y Filtros Isostáticos (Cordell et al. 1991; Ruiz et al. 2011a). Todos ellos en 3D.

El cálculo de la regional gravimétrica se hizo sobre las anomalías de Bouguer con corrección topográfica (ABct), grillada con espaciamiento entre nodos de 5 km (Figura 2a).

Las anomalías gravimétricas generadas por estructuras geológicas ubicadas en la corteza superior están contaminadas por fuentes más profundas, la señal de la raíz cortical andina es, en nuestra zona de estudio, la anomalía de mayor amplitud. La regional producida por la raíz compensadora, en una hipótesis de compensación isostática realista resultó ser el filtro, conjuntamente con el filtro interactivo por Prolongación Ascendente, más consistente. Dichos filtros arrojaron resultados coincidentes en amplitud y morfología para el análisis cuali-cuantitativo de las estructuras subsuperficiales de la región de interés y que son objeto de estudios en lo que respecta a la exploración de hidrocarburos.

Anomalía Residual Descompensada: La corrección por descompensación (Cordell et al., 1991) se calculó desde la prolongación ascendente a 25 km de la anomalía isostática (UP25KM[AI]), teniendo presente que las anomalías contenidas en el campo prolongado a una altura adecuada deben tener origen en corteza inferior-manto superior, esta anomalía regional es substraída de la anomalía isostática (AI) para producir la anomalía isostática de descompensada (DA).

$$DA = AI - UP_{35km}$$

Para ello se generaron mapas de anomalías isostáticas obtenidas desde dos sistemas de compensación hidrostática: a) asumiendo la hipótesis de compensación local de Airy-Heiskanen; b) un modelo de compensación regional (flexural) –VeningMeinesz calculado para un espesor elástico $T_e = 40\text{Km}$ (Tassara et al. 2007). DA se calculó por ambas hipótesis empleando la expresión X. Las residuales obtenidas se muestran en las Figuras 2c y 2d, respectivamente.

Filtro Interactivo por Prolongación Ascendente: La continuación analítica ascendente consiste en calcular el campo potencial a una altura h constante sobre la superficie de medición (Dean, 1958; Introcaso, 1997). Es en realidad una transformación del campo

potencial medido sobre una superficie, al campo que sería medido sobre otra superficie ubicada a una altura mayor sobre la fuente. Esta transformación atenúa las anomalías de corta longitud de onda, es decir suaviza o elimina el efecto de cuerpos superficiales o de corta longitud de onda.

La altura de prolongación (25 km) se obtuvo de la pendiente del espectro radial de potencias de las ABct que separa las fuentes más profundas (en los números de onda menores $0-0.005 \text{ m}^{-1}$) de las fuentes de la corteza media y superior.

La carta de anomalías residuales obtenidas descontando a las ABct la regional resultante de la prolongación ascendente a 25 km de altura (**Figura 2b**) presenta una excelente correlación tanto en morfología como en amplitud con la DA para Te 40km.

Los resultados obtenidos por ambos métodos permiten distinguir con claridad los efectos gravimétricos de los cuerpos emplazados en corteza superior. Las características geológicas se encuentran muy bien resaltadas en ambos mapas, especialmente los altos gravimétricos generados por los grandes aparatos volcánicos de la zona de estudio. Puede observarse la presencia de fajas de altos gravimétricos, asociados posiblemente, con cámaras magmáticas o con altos de basamento, relacionadas con los principales centros volcánicos de la región con marcada alineación NNO. Queda evidenciada una segmentación en bloques de dirección meridional a ambos lados de la Faja Plegada y corrida de Malargüe representados por bajos gravimétricos (depocentros) separados por altos con dirección E-O.

Modelado por inversión

Para evaluar cuantitativamente las ondulaciones del basamento en la región con mejor cobertura de datos gravimétricos se calculó un modelo por inversión gravimétrica 3D por el método de **Parker (1972)** con las mejoras de **Caratori et al. (2007)**, implementadas por **Phillips et al. (2007)** en el programa GMSYS 3D que utiliza algoritmos de ajuste iterativo.

Se preparó un modelo de inversión de tres capas: topografía con densidad lateral variable, sedimentos con densidad vertical variable y basamento con densidad fija.

Para la topografía se construyó una grilla con variación lateral de densidades, que varían entre 2.1 g/cm^3 para sedimentos modernos, 2.3 g/cm^3 a 2.5 g/cm^3 para sedimentos

mesozoicos y 2.7 g/cm^3 para afloramientos del basamento cristalino. Las densidades consideradas fueron obtenidas de perfiles de un pozo de exploración con “density log” en el centro del área en estudio y densidades medias típicas para afloramientos digitalizados de mapas geológicos (Giambiagi et al., 2009; Ramos y Folguera 2010), imágenes satelitales y modelos digitales del terreno.

Las densidades empleadas en el modelado del espesor sedimentario con densidad vertical variable fueron obtenidas a partir del registro arrojado por el pozo de exploración petrolera YPF.Md NC°C.x-2 Cerritos Colorados con coordenadas (X= 6025400; Y= 2481400) localizado en Rincón amarillo (Figura 3). Se efectuaron ajustes con regresiones matemáticas por tramos y considerando el registro del caliper se calcularon los promedios ponderados de los distintos tramos. El basamento fue modelado utilizando una densidad de $2,7 \text{ g/cm}^3$.

El modelo de inversión se calculó basado en cuatro superficies: a) plano de observación a 3610 m de altitud (fijo); b) superficie topográfica (fija) modelada con densidad lateral variable hasta la cota del pozo 1125 m; c) Superficie del basamento, modelada con densidad vertical variable desde los datos density log; d) fin de corteza superior en un plano a 15 km con densidad de 2.7 g/cm^3 . El basamento técnico se modeló por proceso iterativo hasta ajustar la respuesta gravimétrica del modelo a las anomalías residuales de Bouguer, con profundidades de restricción dadas por el pozo e interpretaciones de líneas sísmicas 2D en el oeste de la zona de estudio (Silvestro y Atencio, 2009).

CONSIDERACIONES FINALES

Resultados y Discusiones

Las anomalías residuales isostáticas descompensadas para el caso de una corteza con espesor elástico $T_e = 40 \text{ km}$ (Figura 2d), arrojaron resultados similares a los obtenidos por el filtrado interactivo por prolongación ascendente (Figura 2b). La interpretación cualitativa permite identificar la presencia de fajas de altos gravimétricos asociados, posiblemente, con cámaras magmáticas o con altos de basamento relacionados con los principales centros volcánicos de la región de Payenia. Queda en evidenciada una segmentación en bloques de

la Faja Plegada y corrida de Malargüe que señala bajos gravimétricos asociados con depocentros separados unos de los otros por altos gravimétricos (altos de basamento).

Comparando la Figura 2d con la carta residual obtenida por el sistema de Airy ($T_e=0\text{km}$) en Figura 2c, se puede apreciar un positivo de larga longitud de onda al este de los $69^\circ 75'O$ que enmascara las cuencas, aunque podría explicarse por una posible atenuación cortical con pluma astenosférica en ascenso como se observó 200 km al sur de la zona en estudio (**Folguera et al., 2007**). Este alto abarca toda la Payenia e incluye el Bloque de San Rafael. En este trabajo hemos descartado esta residual ya que difiere de las residuales obtenidas por las otras técnicas de filtrado, no obstante, debería ser evaluada a la luz de nuevos datos sismológicos en proceso de obtención.

A efectos de resaltar las características visibles en el mapa residual, se pueden destacar las respuestas gravimétricas negativas observables en la Faja Plegada y corrida correspondientes a los depocentros: Malargüe hacia el Norte, Palauco en el centro y Reyes hacia el sur.

Un rasgo, no descubierto hasta ahora, es el bajo gravimétrico extendido hacia el Este-Sureste del Volcán Carapacho, que podemos interpretar como la extensión oriental de la cuenca de Palauco, acuniándose, en el extremo este, contra el basamento del Bloque de San Rafael.

En el modelo por inversión 3D quedan definidos claramente los altos de basamento de los principales centros efusivos de la región: Cerro Payen, PayunMatru, Malacara; Carapacho y las Sierras de Palauco y Reyes (al sur). El cordón montañoso que integran estas dos últimas Sierras separa meridionalmente las subcuencas de Río Grande y Palauco. La primera de ellas, la más occidental, tiene una profundidad máxima de 4000 m. La subcuenca de Palauco más somera que la anterior presenta espesores sedimentarios de 2500 m cerrándose en un alto estructural con dirección NO-SE señalado en la figura con el número (1). Hacia el este se interpreta un depocentro denominado aquí como La Regalada (LR) con una profundidad de 2500 metros, profundizándose hacia el alto que constituido por los afloramientos de basamento del Bloque San Rafael. Este depocentro no ha sido reportado anteriormente, debido a la complejidad de la región en cuanto a que se encuentra totalmente

cubierta por coladas basálticas de edad pleistocena (**Ramos y Folguera, 2010**). Este rasgo superficial dificulta las tareas de adquisición sísmica potenciando la utilidad de los métodos potenciales para la exploración de yacimientos de hidrocarburos en esta región.

REFERENCIAS

- CARATORI TONTINI, F., F. GRAZIANO, L. COCCHI, C. CARMISCIANO and P. STEFANELLI (2007): Determining the optimal Bouguer density for a gravity data-set: implications for the isostatic setting of the Mediterranean Sea, *Geophys. J. Int.*, 169, 380-388
- Dean, W. C., 1958. "Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation". *Geophysics*, 23, 97-127.
- Folguera, A., A., Introcaso, M., Giménez, F., Ruiz, P., Martínez, Tunstall, C., García Morabito, E., Ramos, V.A., 2007. Crustal attenuation in the Southern Andean retroarc determined from gravimetric studies (38°–39°30'): the Lonco-Luán asthenospheric anomaly. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.001.
- Giambiagi, L., et al., 2009. Cinemática de apertura del sector norte de la cuenca neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (2): 278-292
- Heiskanen W. and H. Moritz, 1967. "Physical Geodesy". W. Freeman and Company. 364 p.
- Kozłowski, E., R. Manceda, y V. Ramos, 1993. Estructura. En Ramos, V. (ed.): *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza), Relatorio: 235-256.
- LLAMBÍAS Eduardo J., G. W. BERTOTTO, C. RISSO e I. HERNANDO: El volcanismo cuaternario en el retroarco de Payenia. Una revisión. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67 (2): 278 - 300 (2010).
- Parker, R.L. 1972. "The rapid calculation of potential anomalies". *Journal of the Royal Astronomical Society* 31,447-455.
- Phillips J. D., 2007. "Geosoft eXecutables (GX's)". Developed by the U.S. Geological Survey, Version 2.0, with Notes on GX Development from Fortran Code. Open File Report 2007-1355. 111 pp.

- Ramos, V.A. 1988. Tectonics of the Late Proterozoic - Early Paleozoic: a collisional 1088 history of Southern South America. Episodes 11(3), 168-174.
- Ramos, V.A.; A. Folguera, 2010. In Press. Payenia volcanic province in the Southern Andes: An appraisal of an exceptional Quaternary tectonic setting. Journal of Volcanology and Geothermal Research. doi: 10.1016/j. jvolgeores.2010.09.008.
- Ruiz, F., A., Laplagne, G. Gallego y A., Introcaso, 2008. “Variaciones de gravedad en el Valle de Tulum, San Juan: aportes a la caracterización sismotectónica”. GEOACTA, 33: 115-122.
- Ruiz, F. y A., Introcaso, 1999. Resultados magnetométricos en la región de la cuenca de Ischigualasto-Villa Unión (Provincias de San Juan y La Rioja-Arg). Revista de la Asociación Geológica Argentina, RAGA 54(4): 353-360.
- Silvestro, J. M., Atencio, 2009. La cuenca cenozoica del río grande y palauco: edad, evolución y control estructural, faja plegada de malargüe (36°s). Revista de la Asociación Geológica Argentina 65 (1): 154 - 169 (2009).
- Tassara A., C., Swain, R., Hackney, J., Kirby, 2007. Elastic thickness structure of South America estimated using wavelets and satellite-derived gravity data. Earth and Planetary Science Letters 253 (2007) 17 – 36.

ANEXO

Listado De Figuras

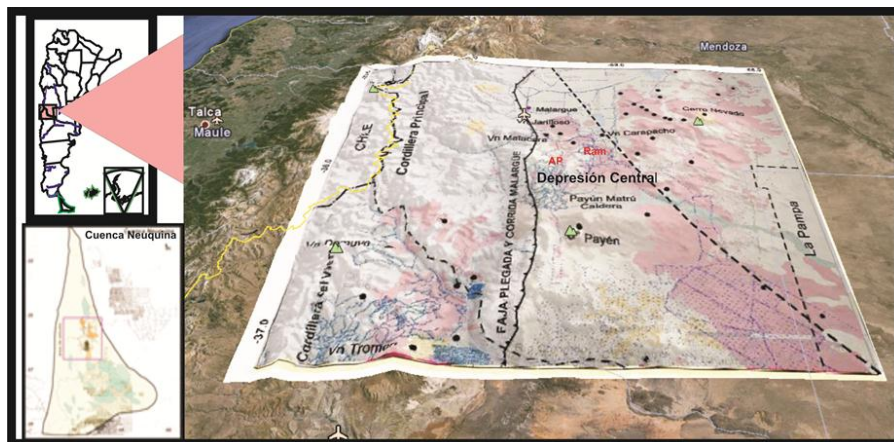


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio (imagen satelital). Modelo digital del terreno (SRTM 90m) superpuesto al mapa geológico que muestra los principales centros volcánicos y coladas basálticas de la Provincia volcánica de Payenia. (modificado de Victor Ramos y Andres Folguera, 2010). En azul ubicación de datos gravi-magnetométricos. En ojo AP: anticlinal de Palauco; Ram: Rincón Amarillo.

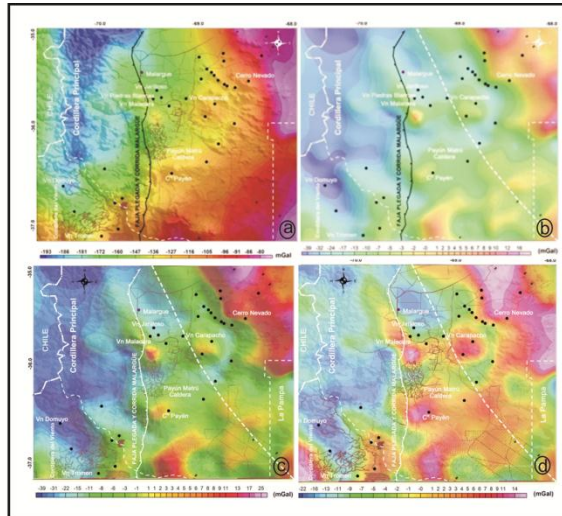


Figura 2. a) Anomalía de Bouguer aplicada la corrección topográfica. b) Mapa de AB residual obtenida por el método de prolongación ascendente $H=25\text{Km}$. c) Residual isostática descompensada obtenida a partir de suponer un modelo de compensación regional para un $T_e = 40\text{Km}$. d) Residual isostática descompensada obtenida a partir del cálculo para un $T_e = 0$ (o Modelo de Airy). Los puntos negros indican los principales centros efusivos y conos volcánicos de la zona de estudio.

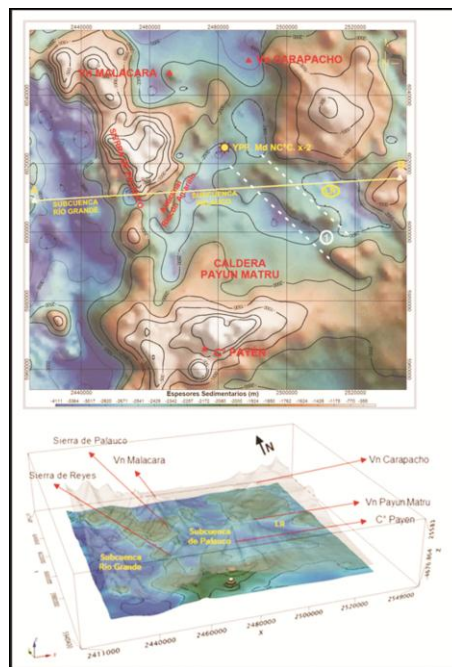


Figura 3. Mapa del modelo por inversión 3D del basamento. En la parte superior con línea de color amarillo se individualiza el perfil donde se realizara un modelo de detalle. Con amarillo se ubica el pozo considerado al calcular la densidad. (1) alto de basamento delimitado por líneas de trazo de color blanco. LR depocentro La Regalada. En la parte inferior se muestra la topografía (exagerada) superpuesta al mapa de basamento, se puede observar la rugosidad de la topografía del lugar.