

AVANCES EN EL TRATAMIENTO ESTADISTICO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS DE LAS SIERRAS DE SAN LUIS Y COMECHINGONES. IMPORTANCIA DEL GRILLADO EN PROCESAMIENTOS POSTERIORES

ADVANCES IN THE STATISTICAL TREATMENT OF GRAVIMETRIC DATA FROM SAN LUIS AND COMECHINGONES SIERRAS. THE IMPORTANCE OF GRIDDING IN SUBSEQUENT PROCESSINGS

Christiansen, Rodolfo O.^{1(*)}; Rodriguez, Aixa¹; Martinez, Patricia^{1,2}; Lince Klinger, Federico¹

¹ CONICET- Instituto Geofísico Sismológico Volponi (IGSV). San Juan, Argentina

² Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) - Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEF y N)- Departamento de Geofísica y Astronomía. San Juan, Argentina.

(*) E-mail: rodolfo.christiansen@conicet.gov.ar

RESUMEN

Sobre la base de mediciones gravimétricas realizadas por el IGSV (Instituto Geofísico Sismológico Volponi) y la UNS (Universidad Nacional del Sur) se procedió a la homogeneización de los datos con el fin de confeccionar mapas de anomalías de Bouguer. Estos servirán para analizar las estructuras corticales presentes en la zona sur de las Sierras Pampeanas Orientales de Argentina, entre los paralelos 31° y 33.5° S y los meridianos 64° y 67.5° O, con una resolución máxima aproximada de 2500 m.

Al trabajar con derivadas de orden superior pudieron notarse resultados espurios cuando se utiliza el método de Mínima Curvatura (MC) para el grillado de datos gravimétricos. Esto es, sin duda, producto del espaciado irregular de los datos y un decaimiento del valor de la relación señal-ruido (SNR). Por este motivo se propone la técnica de Kriging (KG) y se comparan los resultados obtenidos mediante este procedimiento con el anterior (MC), aplicando operadores diferenciales, como gradiente horizontal total del ángulo de tilt y derivadas segundas.

Palabras claves: Gravimetría, Bouguer, Kriging, Grillado, Correlación, Sierras Pampeanas.

ABSTRACT

Based on gravimetric measurements made by IGSV (Instituto Geofísico Sismológico Volponi) and UNS (Universidad Nacional del Sur) we proceeded to the homogenization of the data in order to make Bouguer anomaly maps. These will serve to analyze the cortical structures in the southern part of the Eastern Sierras Pampeanas of Argentina, between 31° and 33.5° S and 64° and 67.5° W, with a maximum resolution of approximately 2500 m.

When working with higher derivatives we noted spurious results due to the Minimum Curvature (MC) method used for gridding the gravity data. This is undoubtedly a product of the irregular spacing of the initial data and a decay in the Signal to Noise Ratio (SNR) value. Therefore Kriging (KG) technique has been proposed and the results obtained by this procedure have been compared with the previous MC applying differential operators such as total horizontal derivatives of the tilt angle and second derivatives.

Keywords: Gravimetry, Bouguer, Kriging, Gridding, Correlation, Sierras Pampeanas.

INTRODUCCIÓN

Las Sierras Pampeanas Orientales comprenden una zona orogénica generada durante un evento de corta duración que tuvo lugar en el transcurso del Cámbrico temprano (Rapela et al., 1998) aunque también podría atribuirse al Neoproterozoico (Escayola et al., 2007). Algunos autores sitúan la fase de metamorfismo principal hace 537 Ma. (Iannizzotto et al., 2013). Se caracterizan por metamorfitas proterozoicas en las cuales se emplazan granitoides calcoalcalinos asociados a subducción (Lira et al., 1997). Luego se habrían situado granitos postcolisionales de edad cámbrica basal (Rapela y Pankhurst, 1996). En forma postectónica se habría emplazado el Batolito de Achala de edad silúrica (Rapela et al., 1982) a carbonífera inferior (Rapela et al., 1991).

Los métodos potenciales de prospección se caracterizan por ser no invasivos ni contaminantes pudiendo ser utilizados en todo tipo de terrenos y tanto por vías terrestres o aéreas. Entre estos, se encuentra el método gravimétrico, que permite inferir las variaciones laterales de densidad a partir de las variaciones observadas en la aceleración de la gravedad. Su fácil aplicación y bajo costo lo hacen ideal para el estudio de grandes regiones con rasgos geotectónicos, pudiéndose detectar cuerpos situados en profundidad, suturas de zonas acrecionadas, contactos entre grandes formaciones, etc. La relevancia que tienen estas técnicas aplicadas a estas regiones en particular, es que a través de diferentes procesamientos, se pueden inferir las profundidades y formas de estos batolitos emplazados en diferentes épocas, y de esta manera, afianzar los postulados geológicos existentes.

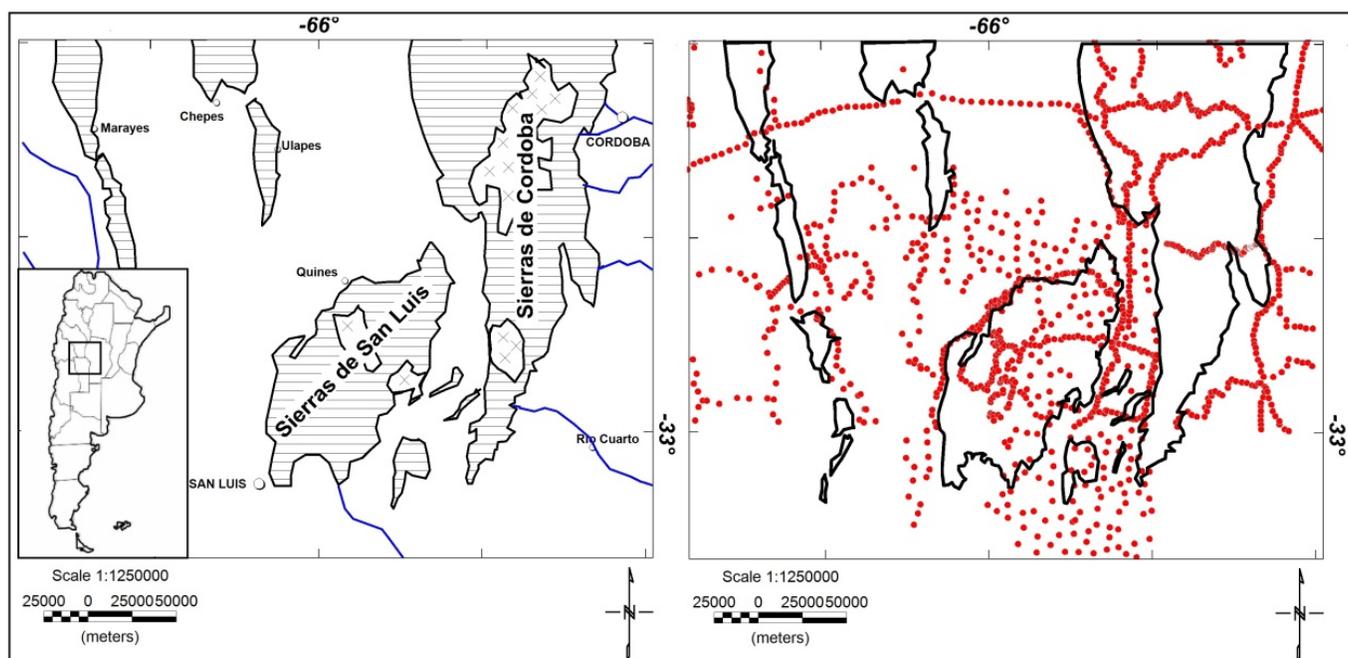


Figura 1. Izquierda: Ubicación geográfica del área de trabajo. Comprende principalmente las Sierras de San Luis y sur de las Sierras de Córdoba; hacia el Oeste parte de la Sierra de Marayes y Sierra de las Quijadas; al Norte, Sierra de Chepes y Sierra de Ulapes. Derecha: Ubicaciones de las estaciones gravimétricas (puntos rojos).

Figure 1. Left: Geographic Location of the working area. It comprises mainly the Sierras de San Luis and southern Sierras de Córdoba; to the west Sierra de Marayes and Sierra de las Quijadas; to the north Sierra de Chepes and Sierra de Ulapes. Right: Locations of gravimetric stations (red dots).

Para la realización de los mapas de anomalías de Bouguer se contó con 1270 mediciones de campo (Figura 1) cedidas por dos instituciones (IGSV- Instituto Geofísico Sismológico Volponi y UNS- Universidad Nacional del Sur). Por este motivo debió unificarse la base de datos refiriéndola al sistema IGSN71 (International Gravity Standardization Network 1971) (Morelli, 1972). Esto se logró restando 14.97 mGal al valor observado en el antiguo sistema de Potsdam que poseían algunos datos.

Para la disposición de los datos y el posterior trabajo es fundamental la elección de un grillado adecuado cuyos parámetros deben ser cuidadosamente calculados (McDonald, 1991).

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS METODOS DE GRILLADO

Mínima curvatura (MC)

El método de Mínima Curvatura fue propuesto por Briggs (1974) y considera la minimización del error entre una superficie $z(x, y)$ y los datos medidos con coordenadas horizontales (x_i, y_i) y verticales, (z_i) . Este es un algoritmo muy utilizado dado que su aplicación es muy sencilla y rápida (Rauth, 1995). El algoritmo usa la norma C (ec. 1):

$$C \approx \iint (\nabla^2 z(x, y))^2 dx dy \quad (1)$$

La cual es una aproximación válida a la curvatura total de la superficie $z(x, y)$ cuando $|\nabla z|$ es pequeño. La minimización de C lleva a una ecuación diferencial (ec. 2) de la forma

$$\nabla^2(\nabla^2 z(x, y)) = \sum_i F_i \delta(x - x_i, y - y_i) \quad (2)$$

Donde x_i, y_i, z_i son datos fijos. Los F_i deben elegirse de forma que $z \rightarrow z_i$ cuando $(x, y) \rightarrow (x_i, y_i)$ con condiciones de borde dados por la ecuación 3

$$\frac{\partial^2 z}{\partial n^2} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial n}(\nabla^2 z) = 0, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0 \quad (3)$$

Siendo $\frac{\partial}{\partial n}$ la derivada en la dirección normal.

Años más tarde Smith and Wessel (1990) introducen un tensor de tensiones (T), uniforme e isótropo al notar efectos oscilatorios cercanos a los puntos fijos. De esta forma se reemplaza la igualdad (2) por (4):

$$(1 - T)\nabla^2(\nabla^2 z(x, y)) - T\nabla^2 z(x, y) = \sum_i F_i \delta(x - x_i, y - y_i) \quad 0 < T < 1 \quad (4)$$

Con condiciones de borde similares, salvo sobre la derivada normal que es reemplazada por la ecuación (5):

$$(1 - T_B)\frac{\partial^2 z}{\partial n^2} + T_B \frac{\partial z}{\partial n} = 0 \quad 0 < T_B < 1 \quad (5)$$

Donde T_B representa un parámetro de tensión en los bordes.

Kriging (KG)

Este método de interpolación geoestadístico fue introducido por Krige (1951) y luego desarrollado por Matheron (1962, 1965, 1971) quien lo nombró Kriging en honor a su antecesor. Este procedimiento intenta predecir los valores en los nodos de la grilla basados en una probabilidad máxima o error mínimo.

Primero se analiza la variabilidad espacial de los datos con la función semivariograma γ (ec. 6), la cual es calculada como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [g(p_{1,i}) - g(p_{2,i})]^2 \quad (6)$$

Donde $g(p_{1,i}), g(p_{2,i})$ son $N(h)$ pares de puntos de muestra separados por una distancia aproximadamente igual a h . Luego esta función es aproximada mediante un modelo. Para considerar los valores en donde los datos están ausentes se establece un estimador lineal no sesgado (ec. 7) de la forma:

$$G^*(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i G(x_i, y_i) \quad (7)$$

Donde (x_0, y_0) es el punto de grilla en donde se quiere interpolar u obtener una aproximación de G , es decir de $G(x_0, y_0)$, y siendo $G^*(x_0, y_0)$ un estimador de $G(x_0, y_0)$. Los valores de λ_i se obtienen pidiendo que el estimador sea no sesgado (es decir que el valor esperado de $G^*(x_0, y_0)$ sea el mismo que el de $G(x_0, y_0)$) y además que la varianza del estimador sea mínima (que los λ_i minimicen el error entre ambos estimadores).

METODOLOGÍA

Corrección topográfica

El propósito de esta corrección consiste en la eliminación de los efectos gravitacionales causados por la topografía, y que no fueron tenidos en cuenta en la losa plana utilizada para el cálculo de anomalías de Bouguer. Estos pueden llegar a disminuir los verdaderos valores en decenas de mGal (Hammer, 1939). El efecto de esta desviación es mayormente local debido a la atracción gravitatoria que disminuye con el cuadrado de la distancia.

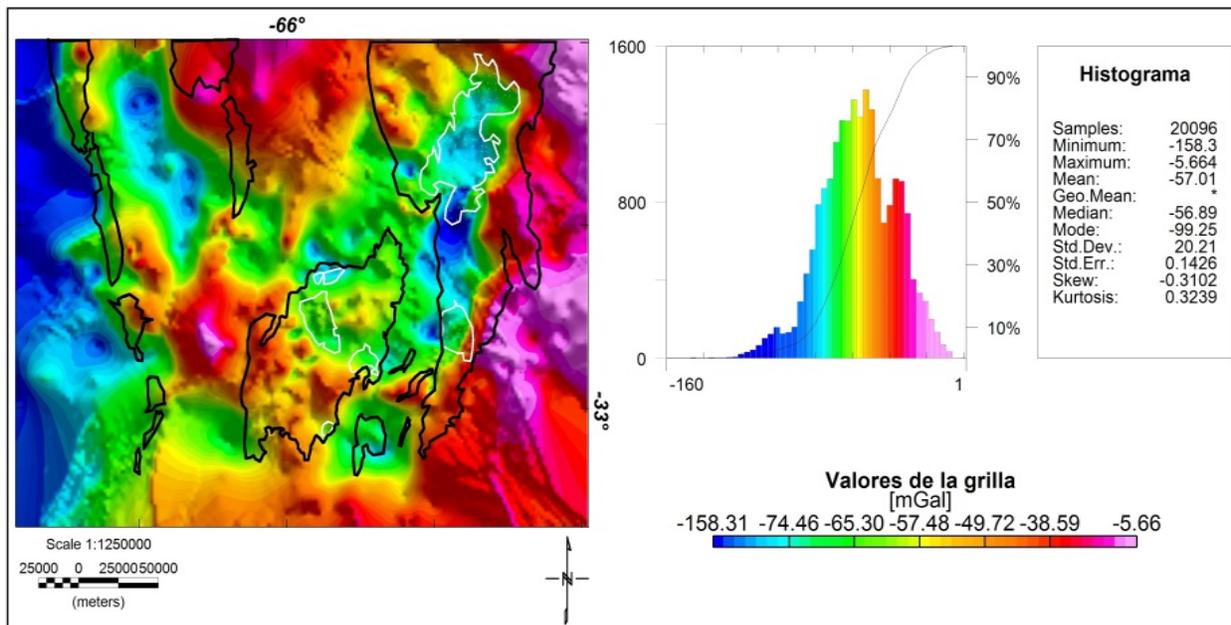


Figura 2. Mapa de anomalías de Bouguer con corrección por efectos topográficos. Todos los valores fueron referidos al IGSN71. Grillado por método de KG. En trazo negro los contornos de las sierras ubicadas en el área. En trazo blanco los principales batolitos y granitos. A la derecha el histograma de valores de la grilla.

Figure 2. Bouguer anomaly map corrected for topographic effects. All values were referred to IGSN71. Gridded with KG method. In black trace the contours of the mountains located in the area. Blank lines outline the major batholiths and granite outcrops. To the right the histogram of the grid values.

Para corregir los datos se utilizó una combinación de los métodos propuestos por Kane (1962) y Nagy (1966) la cual utiliza dos mapas de elevación digital con diferentes resoluciones para ahorrar el costo computacional. El primero, de carácter regional, con tamaño de grilla de 1' (1 minuto de arco \approx 1,85 km) con una extensión de 300 km por fuera del área de interés, y el segundo, de carácter local con resolución de aproximadamente 90 m. El método consiste básicamente en estimar numéricamente el efecto gravitacional de un prisma rectangular vertical centrado en cada

punto de la grilla con altura entre el punto medido en consideración y el modelo digital para luego sumarlo a la anomalía de Bouguer calculada.

Se destaca que en el caso de estudio, se aplicó la corrección topográfica en ambos resultados, grillado por Mínima Curvatura y por Kriging. Por razones de espacio, solo se muestra el mapa resultante por el método KG de la anomalía de Bouguer completa (Figura 2), el semivariograma aplicando un modelo lineal (Figura 3) y el mapa de las desviaciones estándar para los valores obtenidos por la interpolación (Figura 4).

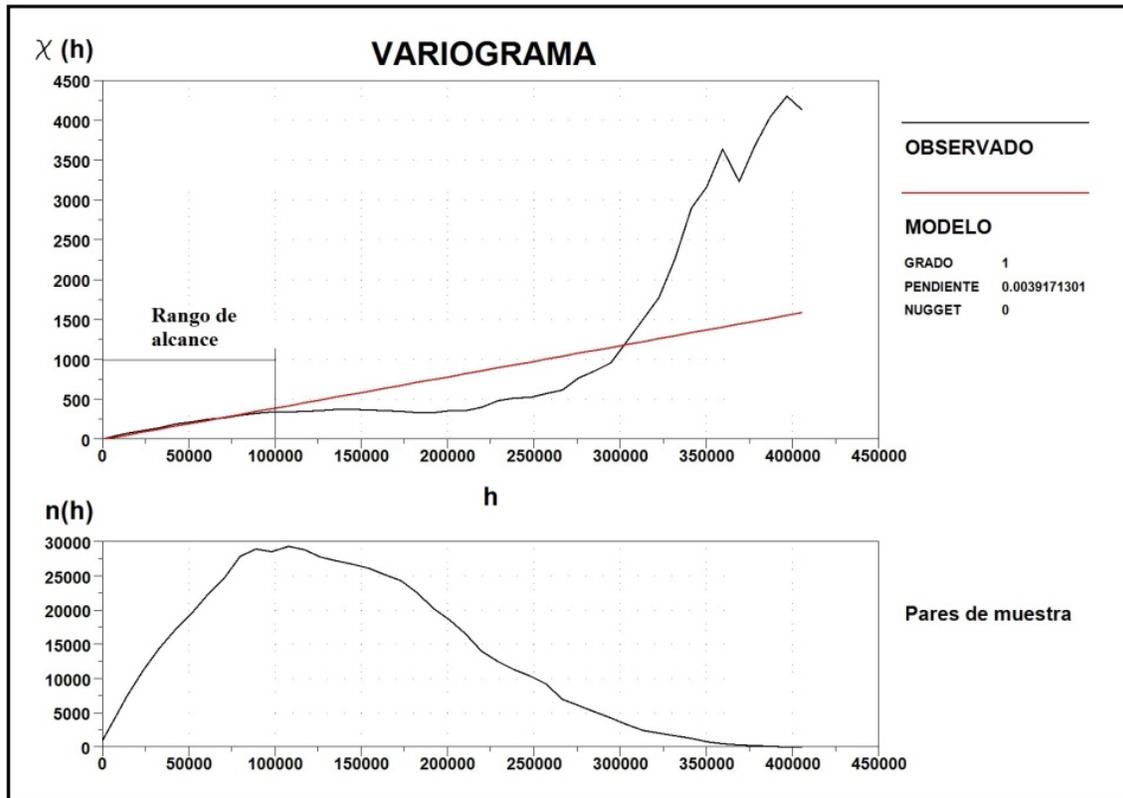


Figura 3. Semivariograma de los datos gravimétricos. El modelo (línea roja) se obtuvo con un polinomio de grado 1. Este aproxima a la función original muy por fuera del espaciamiento de los datos de la grilla hasta unos 100000 m que es el alcance considerado por el método por cada punto a grillar. Arriba: $\chi(h)$ Vs h , muestra la variabilidad de los datos vs. la distancia en metros entre los puntos de muestra. Abajo: $n(h)$ vs. h , indica el número de los pares de datos vs. la distancia en metros.

Figure 3. Semivariogram of gravimetric data. The model (red line) was obtained with a 1st degree polynomial. This approximates the original function well beyond the spacing of the gridded data to about 100000 m which is the range considered by the method for each point to grid. Top: $\chi(h)$ vs. h shows the variability of the data vs. the distance in meters between the sample pairs. Below: $n(h)$ vs. h indicates the number of sample pairs vs. distance.

Tilt (TDR)

El Angulo de Tilt (Miller and Singh, 1994) queda definido como el cociente entre la primera derivada vertical y el gradiente horizontal del campo potencial (ec. 8). Esta medida tiene la propiedad de ser positiva sobre la fuente, nula en los bordes y negativa en las demás zonas.

$$TDR = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\left(\frac{\partial f}{\partial h} \right)} \right) \quad -\frac{\pi}{2} \leq TDR \leq \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

Donde $\frac{\partial f}{\partial h} = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$

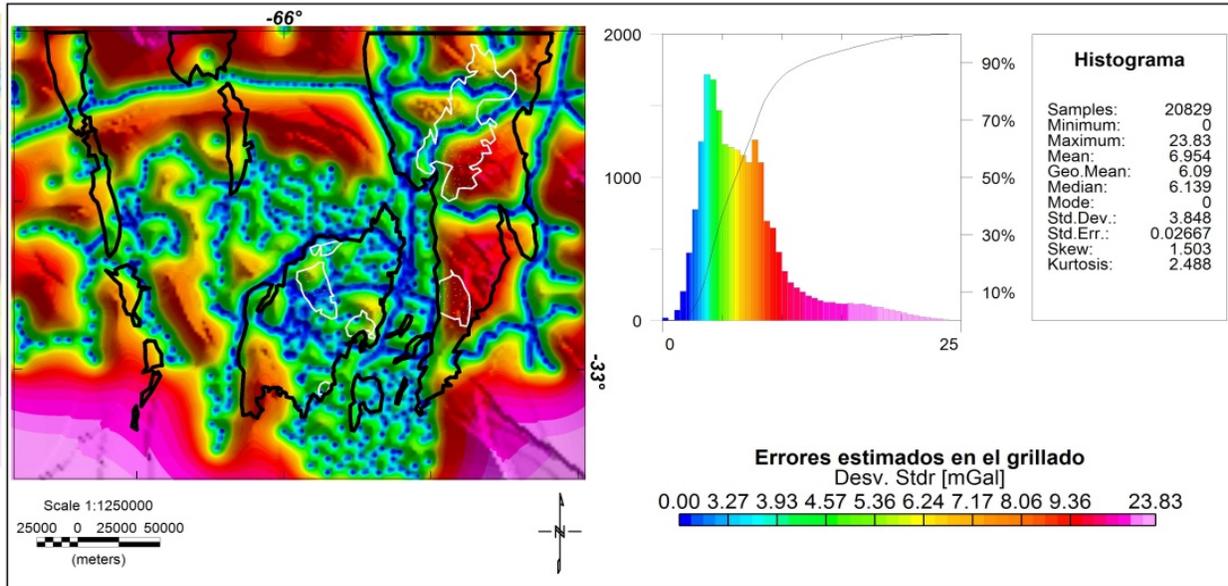


Figura 4. Mapa de desviación estándar en el método KG para cada punto de la grilla. Los valores máximos corresponden a las zonas con menor densidad de datos. Para el área de interés (Sa. de San Luis y Sa. de Córdoba) la desviación estándar no supera 10 mGal.

Figure 4. Map of the standard deviations for Kriging method for each point on the grid. The maximum values correspond to the areas with lower density of data. For the area of interest (Sa. de San Luis and Sa. de Córdoba) the standard deviation does not exceed 10 mGal.

Derivada horizontal total del ángulo de tilt (TDR_THDR)

La Derivada Horizontal Total del Angulo de Tilt fue formulada por Verduzco et al. (2004). Su característica principal es que los máximos se encuentran sobre los bordes de los cuerpos y para el caso magnético es independiente de la inclinación del campo. Matemáticamente queda expresada como (ec. 9):

$$TDR_THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial TDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y}\right)^2} \quad (9)$$

En la región de estudio se grilló el resultado de aplicar esta técnica. Nótese la fuerte correlación con los datos originales cuando se utiliza el algoritmo MC (Figura 5). Esta se ve fuertemente atenuada si se utiliza KG (Figura 6).

Segundas Derivadas Verticales

Diversas derivadas verticales del campo gravimétrico son calculadas multiplicando la transformada de Fourier de este por un factor de la forma (ec. 10).

$$VD^n = \frac{1}{n} [(\mu + \nu)^{1/2}]^n \quad (10)$$

Donde VD^n es la derivada vertical n-ésima y μ, ν los números de onda según las direcciones x e y.

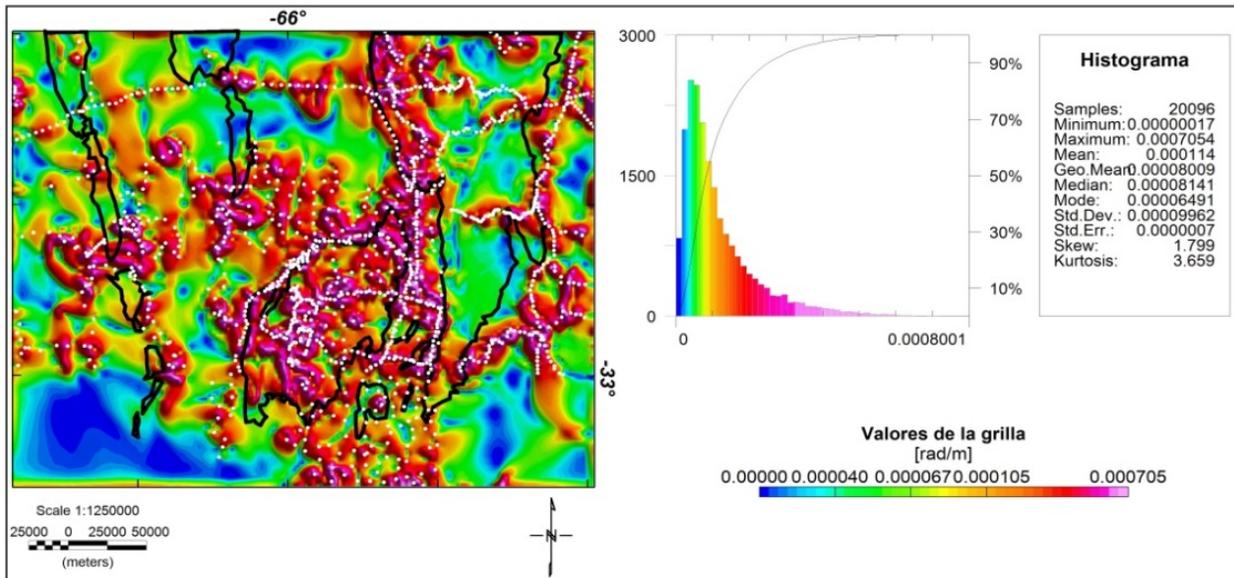


Figura 5. Mapa de derivada horizontal total del ángulo de tilt. Grillado por MC. En puntos de color blanco, la ubicación de los datos medidos. Puede notarse que los máximos se corresponden con las ubicaciones de los datos originales.

Figure 5. Map of total horizontal derivative of the tilt angle. Gridded by Minimum Curvature. The white dots represent, the location of the measured data. It can be noted a correspondence between the maximums and the locations of the original data.

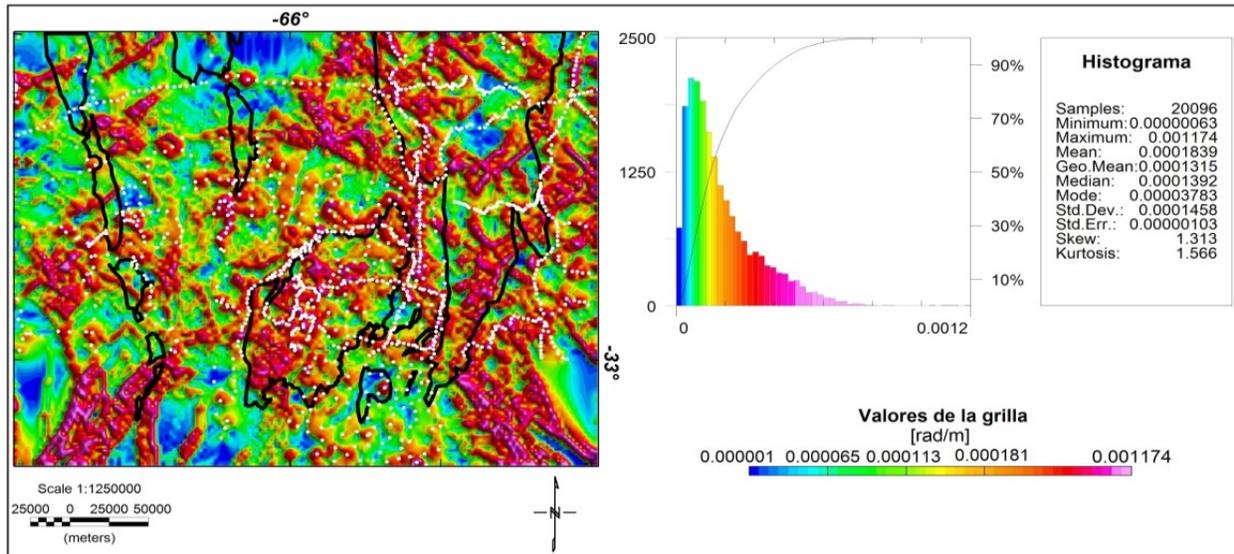


Figura 6. Mapa de derivada horizontal total del ángulo de tilt. Grillado por el método de KG. En puntos de color blanco, la ubicación de los datos medidos. A diferencia con la Figura 5, puede notarse que se eliminó la correlación entre los máximos (colores rojos) y los datos medidos.

Figure 6. Map of total horizontal derivative of the tilt angle. Gridded by KG method. The white dots represent the location of the measured data. In contrast to Figure 5, it can be noted that the correlation between the maximum (red color) and the measured data was removed.

La ecuación 10 muestra que el proceso magnifica las altas frecuencias relativas a las bajas. Es así que, mientras mayor sea el orden de la derivada, se eliminan los efectos regionales y de gran longitud de onda, y maximizan los efectos de las anomalías superficiales. La segunda derivada vertical necesita entonces una mayor calidad del dato ya

que esta realiza las altas frecuencias produciendo un aumento en el nivel de ruido (O`Haver and Begley, 1981; Wood, 1982; Milligan y Gunn, 1997).

En las Figuras 7 y 8, hemos aplicado el gradiente según z a la primera derivada vertical de la gravedad (o sea la segunda derivada en la dirección z), tanto al mapa resultante de la aplicación del método MC, como al resultante de la aplicación del método KG.

RESULTADOS

En una primera instancia, se obtuvo la grilla a partir de los valores de anomalías de Bouguer mediante el algoritmo de Mínima Curvatura, incluido en el software Oasis MontajTM. Los parámetros utilizados fueron tolerancia de 0.1%, 150 iteraciones, una tensión de 0,35 y un tamaño de celda (tc) de 2285 m. Este último fue calculado como ec. 11, luego se le aplicó la corrección por efectos topográficos.

$$tc = \frac{1}{4} * \sqrt{\frac{\text{area a grilar}}{\text{numero de datos}}} \quad (11)$$

Pudo observarse una fuerte correlación entre las ubicaciones donde fueron obtenidos los datos y los máximos en la grilla de MC para las segundas derivadas verticales (Figura 7) y demás rutinas que utilizan operadores diferenciales de orden superior (Figura 5). Estos resultados motivaron a reemplazar el grillado original por uno de tipo KG (Figura 2) puesto que representa con mayor fidelidad las disposiciones reales de los datos sin introducir mayores errores (Gao, 2001; Arfaoui and Inoubli, 2013). La aproximación al semivariograma elegido fue un modelo lineal (Figura 3) con una distancia acotada de alcance del método de 100000 m dado que el rango de este excede ampliamente el intervalo de muestreo y permite obtener una grilla final sin espacios en blanco. Para distancias mayores a esta última los datos no serán tenidos en cuenta para la interpolación. El espaciamento entre los nodos se mantuvo en el mismo valor que para la grilla de MC (2285 m).

Pueden notarse efectos de rugosidad en la superficie (Figura 2) propios de los errores en la adquisición y el tamaño de celda elegido para la representación. Duplicando el espaciamento entre los nodos pudo notarse una disminución en las altas frecuencias manteniendo los problemas de correlación al utilizar operadores diferenciales. Una forma de eliminar estos artefactos es aplicar un filtro que deje pasar las altas frecuencias para obtener las longitudes de onda de 2 a 3 veces el espaciado medio de la grilla y luego restarlo de la original. Otra forma de eliminarlos podría ser la propuesta por Pasteka et al. (2009) mediante la utilización de la regularización de Tikhonov entre otros métodos. Estos no han sido removidos con el propósito de demostrar solo los efectos del algoritmo de grillado sin introducir cambio alguno.

Del histograma adjunto a la Figura 2 es posible apreciar que los valores de anomalías de Bouguer oscilan entre los -158,3 y -5,66 mGal, encontrándose los mayores en la zona oriental mientras que los mínimos se hallan en el extremo opuesto (occidental). La distribución de estos es de tipo normal o gaussiana con media -57,01 mGal y una desviación estándar de 20,21 mGal (ver Figura 2).

Para evitar conflictos en la interpretación de los resultados por falta de confiabilidad en los datos, se introduce un mapa donde puede visualizarse la desviación estándar considerada en cada uno de los puntos del grillado (Figura 4). Se estima que estos valores son correctos en un 68% de los casos en ± 1 desviación estándar del valor real, suponiendo un modelo de aproximación adecuada del semivariograma. En esta figura puede observarse que los mayores errores son causados por la falta de datos en el área y las desviaciones estándar alcanzan un máximo de aproximadamente 25 mGal en los cuadrantes suroeste y sureste para los puntos estimados. En el resto de la zona estas no superan los 10 mGal.

Además de los problemas de correlación encontrados para la derivada horizontal del ángulo de tilt (Figuras 5 y 6), también se observó un notable cambio en las amplitudes de los valores representados para el segundo gradiente vertical (Figuras 7 y 8). Sin duda esto también puede provocar efectos notables en la deconvolución de Euler y otros métodos que utilizan este tipo de operaciones.

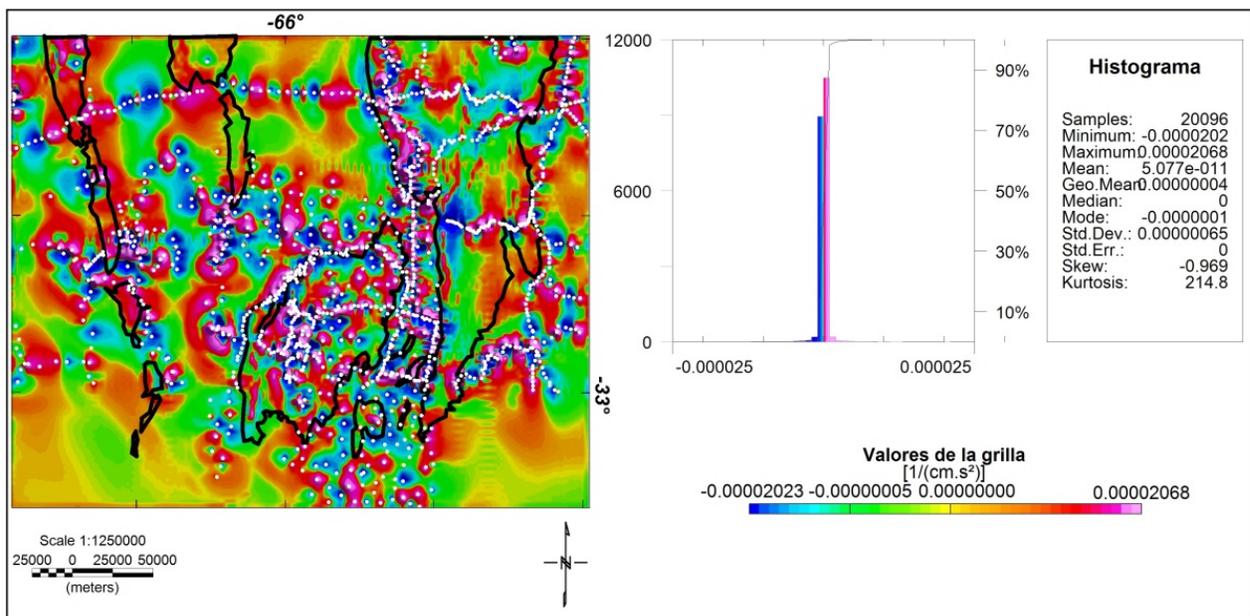


Figura 7. Derivada segunda con respecto a la vertical de las anomalías de Bouguer. Grillado por MC. Los máximos se encuentran correlacionados con los datos originales.

Figure 7. Second derivative with respect to the vertical of the Bouguer anomalies. Gridded by MC. The highs are correlated with the original data.

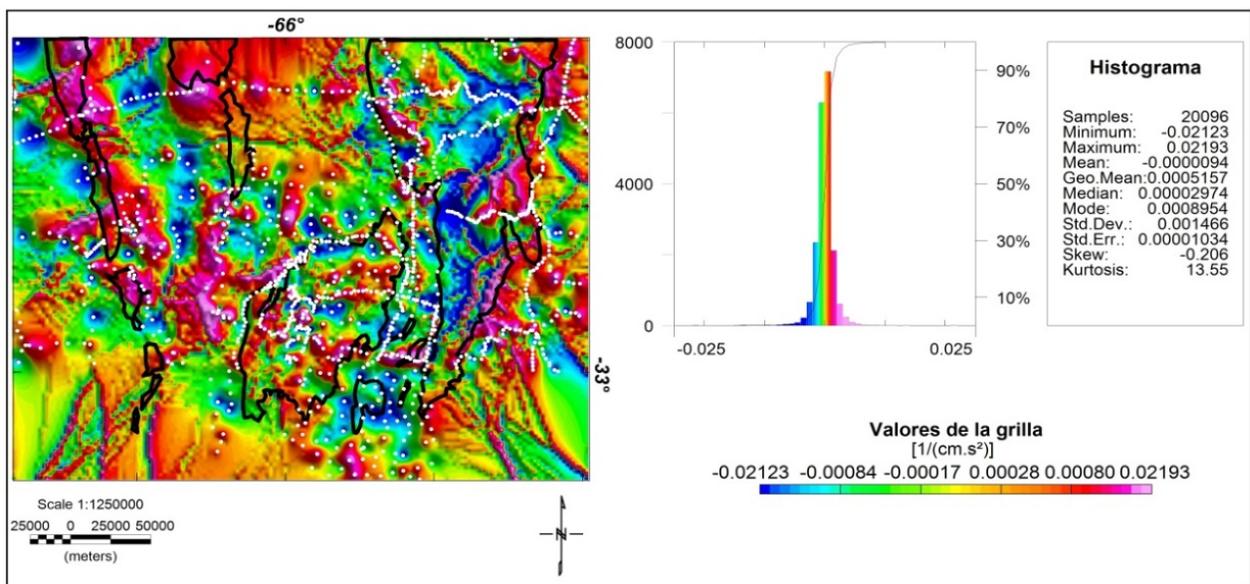


Figura 8. Derivada segunda con respecto a la vertical de las anomalías de Bouguer. Grillado por el método KG. Se puede notar una ampliación del rango de valores y que estos son mayores en valor absoluto en comparación con el método de MC.

Figure 8. Second derivative with respect to the vertical of the Bouguer anomalies. Gridded by KG method. It can be noticed a widening of the range of the values and these are larger in absolute value compared to the MC method.

CONCLUSIONES

Hemos aplicado el método de Mínima Curvatura y el método de Kriging para obtener las grillas de datos gravimétricos irregularmente espaciados en el área que comprende principalmente las Sierras de San Luis y sur de las Sierras de Córdoba (y sus alrededores). Comparando ambas metodologías se han encontrado diferencias para las zonas con menor densidad de datos de hasta 23 mGal en los mapas de anomalías de Bouguer corregidos por efectos topográficos.

El principal problema en este trabajo surge cuando se trabaja con gradientes y operadores diferenciales de orden superior. Observamos que una elección incorrecta del método de grillado causa efectos considerables en estos procesos. Se desprende a simple vista la gran correlación entre la ubicación de los datos gravimétricos y los máximos obtenidos para las derivadas horizontales totales del ángulo de tilt y segundo gradiente vertical.

Proponemos como alternativa al grillado por Mínima Curvatura, la técnica de Kriging. Los resultados obtenidos con este último representan mejor las distribuciones de los datos medidos e interpolados sin introducir efectos no deseados notables. Por otro lado, la presentación de un mapa de desviaciones estándar en cada uno de los puntos estimados por el último método brinda más seguridad a la hora de interpretar los resultados, quedando a elección del operador el uso o no de estos valores.

Agradecimientos. Los autores agradecen la ayuda desinteresada de las siguientes instituciones y personas: CONICET, Instituto Geofísico Sismológico Volponi (IGSV), al Departamento de Geofísica y Astronomía de la Universidad Nacional de San Juan, y a la Universidad Nacional del Sur (UNS). A la colaboración desde los proyectos financiados por CICITCA-UNSJ y al Dr. José Kostadinoff por su aporte a la gravimetría de la zona.

BIBLIOGRAFÍA

- Arfaoui, M., y Inoubli, M.H., (2013). Advantages of using the kriging interpolator to estimate the gravity surface, comparison and spatial variability of gravity data in the El Kef-Ouargha region (northern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8): 3139-3147.
- Briggs, I. C., (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39: 39-48.
- Escayola, M.P., Pimentel, M.M., y Armstrong, R., (2007). Neoproterozoic backarc basin: Sensitive high-resolution ion microprobe U-Pb and Sm-Nd isotopic evidence from the Eastern Pampean Ranges, Argentina. *Geology* 35(6): 495-498.
- Gao, J., (2001). Construction of regular grid DEMs from digitized contour lines: a comparative study of three interpolators. *Geographic information sciences*, 7 (1): 8-15.
- Hammer, S., (1939). Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics* 4: 184–194.
- Iannizzotto, N., Rapela, C., Baldo, E., Galindo, C. Fanning, y R. Pankhurst, (2013). The Sierra Norte-Ambargasta batholith: late Ediacaran early Cambrian magmatism associated with Pampean transpressional tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 42: 127-143.
- Kane, M.F., (1962). A Comprehensive System of Terrain Corrections Using a Digital Computer. *Geophysics*, 27(4): 455–462.
- Krige, D.G., (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the itwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52(6): 119–139.
- Lira, R., Millone, H.A., Kirschbaum, A.M. y Moreno, R.S., (1997). Calc-alkaline arc granitoid activity in the Sierra Norte Ambargasta ranges. Central Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 10: 157-177.
- Matheron, G., (1962). *Traité de Géostatistique appliquée*, Tome 1 (1962) 334 p., Tome 2 (1963) 172 p. Paris: Editions Technip.
- Matheron, G., (1965). *Les variables régionalisées et leur estimation* (Tesis doctoral) 306 p. Masson, Paris.
- Matheron, G., (1971). *The theory of regionalized variables and its applications*. Paris School of Mines publication, 211pp.
- McDonald, A.J.W., (1991). The use and abuse of image analysis in geophysical potential field interpretation. *Survey. Geophysics.*, 12: 531–551.
- Miller, H.G. y Singh, V., (1994). Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32: 213–217.
- Milligan, P.R. y Gunn, P.J., (1997). Enhancement and presentation of airborne geophysical data 1. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2): 63-75.

- Morelli, C., Gantar, C., Honkasalon, T., McConnel, K., Tanner, J.G., Szabo, B., Uotila, U. y Whalen, C. T., (1972). The International Standardization Net 1971 (IGSN71). Special Publication, 4, International Association of Geodesy and Geophysics, Paris, 194 pp.
- Nagy, D., (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31 (2): 362-371.
- O'Haver, T. C. y T. Begley, (1981). Signal-to-noise ratio in higher order derivative spectrometry. *Analytical Chemistry*, 53(12): 1876-1878.
- Rauth, M., (1995). Application of 2D methods for scattered data approximation to geophysical data sets. *Proceeding. Conference samp TA95, Jurmala, Latvia*, 38-43 pp.
- Pašteka R., Richter, F. P., Karcol, R., Brazda, K., Hajach M., (2009). Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods. *Geophysical Prospecting*, 57 (4): 507-516.
- Rapela, C.W., Heaman, L.M. y McNutt, R. J., (1982). Rb/Sr geochronology of granitoid rocks from the Pampean Ranges. Argentina. *Journal of Geology*, 90: 574-582.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Kirschbaum A. y E.G.A. Baldo, (1991). Facies intrusivas de edad carbonífera en el Batolito de Achala: ¿evidencia de una anatexis regional en las Sierras Pampeanas?. 6º Congreso Geológico Chileno, *Actas*, 1: 40-43.
- Rapela, C.W. y Pankhurst, R., (1996). The Cambrian plutonism of the Sierras de Córdoba: pre-Famatinian subduction? and crustal melting. 13º Congreso Geológico Argentino y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza), *Actas* 5: 491.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Baldo, E.G.A., Saavedra, H. y Galindo, C., (1998). Las colisiones continentales Pampeana y famatiniana. 10º Congreso Latinoamericano de Geología y 6º Congreso Nacional de Geología Económica, *Actas* 2: 404.
- Smith, W.H.F. y Wessel, P., (1990). Gridding with a Continuous Curvature Surface in Tension, *Geophysics*, 55: 293-305.
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M., Mackenzie, C., (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23:116–119.
- Wood, G. A., (1982). Data smoothing and differentiation procedures in biomechanics. *Exercise and sport sciences reviews*, 10(1): 308-362.

Recibido: 31-10-2014
 Aceptado: 13-09-2015