

Estadística básica y espacial comparativa entre datos gravimétricos satelitales y terrestres en la Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela

Yaneth Garzón^{*}, Javier González y Nuris Orihuela

Laboratorio de Interpretación del Subsuelo, Departamento de Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Ciudad Universitaria de Caracas, Caracas, Venezuela.

** yanethgc@gmail.com*

RESUMEN

Se realizó un análisis estadístico comparativo entre valores de anomalía de Bouguer (AB) calculados a partir de modelos combinados con datos satelitales y valores de anomalía de Bouguer basados en datos terrestres en la Faja Petrolífera del Orinoco a través del uso de herramientas estadísticas básicas, la implementación de modelos lineales y métodos geoestadísticos. Para todos los casos se observan similitudes entre los datos satelitales y terrestres en términos numéricos y estadísticos. En general, los dos conjuntos de datos presentan una dependencia lineal positiva mutua, un alto coeficiente de correlación y una tendencia análoga de aumento de la gravedad con la latitud, representada por los modelos lineales planteados. Al establecer un intervalo de confianza del 95% alrededor de los valores estimados en localizaciones no observadas, a partir de datos terrestres, se determinó que en un 90% de los casos los datos satelitales correspondientes cumplen con los límites de incertidumbre establecidos. Estos resultados, aunados a las correspondencias numéricas y espaciales observadas, permitieron validar los datos de satélite como equivalentes a los terrestres. En la Faja Petrolífera las diferencias de cota mayores a 20 metros, la distribución espacial de los datos y el instrumental empleado son las fuentes de error responsables de las diferencias de anomalía de Bouguer encontradas. Adicionalmente, se demostró de forma comparativa que los datos satelitales, al tener una distribución homogénea de las mediciones a lo largo de las zonas en estudio, permiten una mejora sustancial en la representación de los rasgos geológicos observados en los mapas de anomalía de Bouguer.

Palabras clave: Geoestadística, análisis comparativo, datos satelitales, estadística, Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela.

ABSTRACT

In this paper we present a comparative statistical analysis between Bouguer anomaly values calculated from land and satellite data acquisitions in the Faja Petrolífera del Orinoco by using basic statistical tools, linear models and geostatistical methods. Numerical and statistical similarities have been observed between the data sets. In general, the linear models show positive linear dependence, high correlation coefficient and similar increment of gravity with latitude. On the other hand, by proposing a 95% confidence interval around the values of unobserved locations estimated from land data, 90% of the satellite based observations satisfy the established uncertainty limits. These results, added to the

numerical and spatial similarities seen before, let us to validate satellite data as equivalent to land data. In the Faja Petrolífera, the sources of error that produce Bouguer anomaly differences between land and satellite data are related to differences on elevation values greater than 20 meters, spatial distribution of data, and set of measure instruments used. Also it was demonstrated that homogeneous distribution of measurements along the selected area is important to obtain a substantial improvements in geological features observed in the Bouguer anomaly maps.

Key words: geostatistics, comparative analysis, satellite data, statistics, Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, a partir de las misiones satelitales la comunidad científica tiene la capacidad de acceder al conocimiento de la física de la Tierra a escala global, siendo el mayor beneficio la gran capacidad de muestrear información en espacio y tiempo con precisión (Barlier y Lefebvre, 2001). Este avance en las tecnologías espaciales ha dado inicio a una nueva etapa en los estudios de gravedad terrestre. Específicamente en Venezuela una gran cantidad de investigaciones apoyadas en el método gravimétrico han sido de vital importancia en el campo de las Ciencias de la Tierra por su aporte de información valiosa sobre las características geológico-estructurales del subsuelo.

Misiones satelitales como GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) y CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) han permitido recopilar datos gravimétricos y magnéticos de alta precisión y resolución, a partir de los cuales se han generado modelos gravitacionales de la Tierra en conjunto con información terrestre, aérea y satelital contenida en la base de datos de anomalías gravimétricas globales (Pavlis *et al.*, 2005).

En general, la estimación de diversos modelos geopotenciales (representación del potencial gravitatorio de la Tierra) ha sido uno de los propósitos principales de las misiones satelitales (Rapp, 1998). Los Modelos Geopotenciales Globales (MGG) pueden ser derivados del análisis de las mediciones de los satélites únicamente, o ser modelos combinados de información satelital, terrestre, marina y aérea.

En estudios recientes en Venezuela (García, 2009), se han generado resultados preliminares de buena calidad al disponer de datos satelitales gravimétricos de alta resolución derivados del modelo de geopotencial EGM2008, que combina datos de la misión satelital GRACE, altimétricos, terrestres y marinos, alcanzando el grado 2160 en la serie de armónicos esféricos (Pavlis *et al.*, 2008).

No obstante, es importante establecer un método de calificación de estas mediciones satelitales a través de la comparación con datos medidos en tierra, compilados en las bases de datos utilizadas durante los últimos 60 años por diversos intérpretes. Con este objeto, en esta investigación se empleó la geoestadística como herramienta fundamental para la validación de los datos satelitales en función de los datos terrestres y establecer suposiciones sobre los posibles errores de observación y sus causas asociadas.

UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

El estudio se realizó en el área occidental de la Faja Petrolífera del Orinoco comprendida por los meridianos 64°30'O y 68°00'O y los paralelos 7°30'N y 9°15'N. (Figura 1). El dato horizontal usado está referido al elipsoide World Geodetic System 1984 (WGS84), mientras que el dato vertical se refiere al nivel medio del mar. Igualmente, se usó el Sistema de Coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) Zona 19 N.

FUENTE DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS

Los datos de gravedad terrestre (Figura 1) fueron extraídos de Rodríguez (1977), del cual se recopilaron un total de 765 estaciones de anomalía de Bouguer (AB), que contenían adicionalmente información relativa a coordenadas y topografía. Del procesamiento de estos datos gravimétricos, la única información implícita es la densidad de reducción, la cual es igual a 2.23 g/cm³ (valor obtenido a partir de un perfil de Nettleton realizado en el área). Los datos son presentados directamente en AB, por lo cual no es posible contar con los valores de gravedad observada originales, necesarios para reprocesarlos a otra densidad de reducción.

Por otro lado, los datos satelitales procesados (Figura 1) fueron obtenidos de García (2009), los cuales fueron derivados del modelo de geopotencial EGM2008 a partir de la expansión en términos de series de armónicos esféricos (Pavlis *et al.*, 2008; Tapley *et al.*, 2005). Dentro del área estudiada se localizan 5724 estaciones gravimétricas satelitales, espaciadas una distancia de 3.7 km. Estos datos originalmente reducidos con una densidad de 2.67 g/cm³ se reprocesaron con una densidad de Bouguer igual a 2.23 g/cm³, para adecuarlos a los datos de AB terrestres.

MUESTREO DE LOS DATOS

Los datos de anomalía de Bouguer satelital y terrestre presentan resolución diferente. Por ello, se aplicó un procedimiento especial a los datos para llevar todo a una resolución única (Figura 2). Este proceso se hizo programando una rutina que permitió muestrear solamente aquellos datos

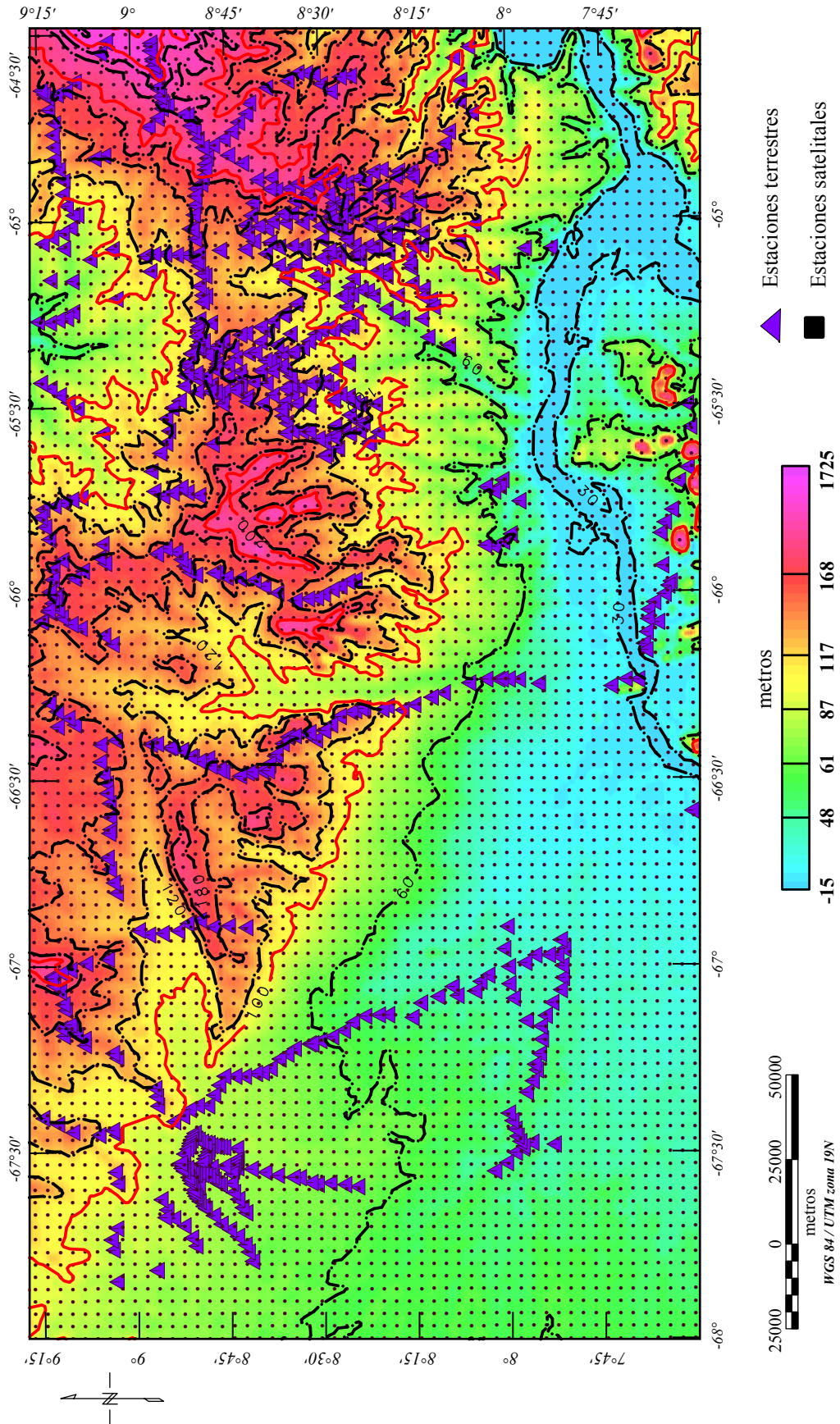


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona en estudio y mapa de ubicación de las estaciones gravimétricas. Los triángulos de color violeta representan las estaciones terrestres y los puntos negros la localización de las estaciones satelitales. Nótese la mayor cobertura de los datos satelitales respecto a los terrestres.

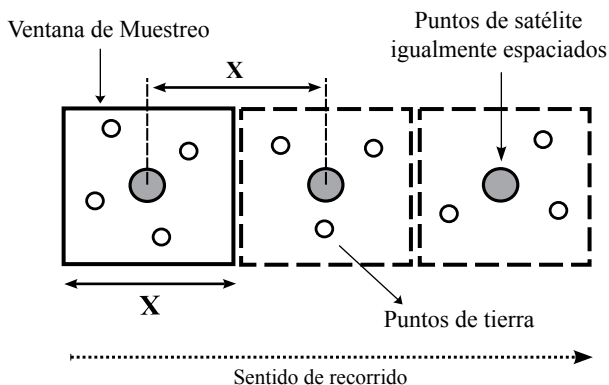


Figura 2. Esquema del procedimiento para muestrear los datos de satélite y tierra. Se selecciona un punto de satélite y a partir de la definición de una ventana de muestreo se buscan los puntos de tierra contenidos dentro de ella. Luego se calcula un promedio de los puntos terrestres ponderado por el inverso del cuadrado de la distancia y se asigna ese valor al punto satelital escogido.

satelitales con un equivalente en tierra, para poder hacer la comparación estadística punto a punto. Este procedimiento consistió en la selección de un punto de satélite y la definición de una ventana de muestreo donde se buscan los puntos de tierra contenidos dentro de ella. Posteriormente, se calcula un promedio de los puntos terrestres ponderado por el inverso del cuadrado de la distancia y se asigna ese

valor al punto satelital escogido.

Luego de aplicar la rutina de muestreo programada en *R Project*, se obtuvieron un total de 596 datos de satélite con al menos un punto equivalente en tierra.

METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

Una vez llevados los datos a resolución única, se compararon los datos satelitales y los datos terrestres empleando procesos estadísticos adecuados que se esquematizan en el diagrama de la Figura 3.

La estadística básica comprendió el cálculo de los descriptivos básicos, así como la generación de los histogramas de frecuencia y gráficos Cuantil - Cuantil (Q-Q) para evaluar numéricamente el comportamiento de las variables implicadas, en función de su distribución de probabilidad, comparándola con una distribución normal.

El análisis de regresión se realizó aplicando modelos lineales con la finalidad de observar tendencias en conjunto entre las variables gravimétricas, topográficas y geográficas. Al remover las tendencias se realizó la evaluación de los residuales correspondientes para determinar si se continuaba el proceso o si el modelo planteado satisfacía las variabilidades encontradas para cada caso.

La metodología geoestadística empleada está

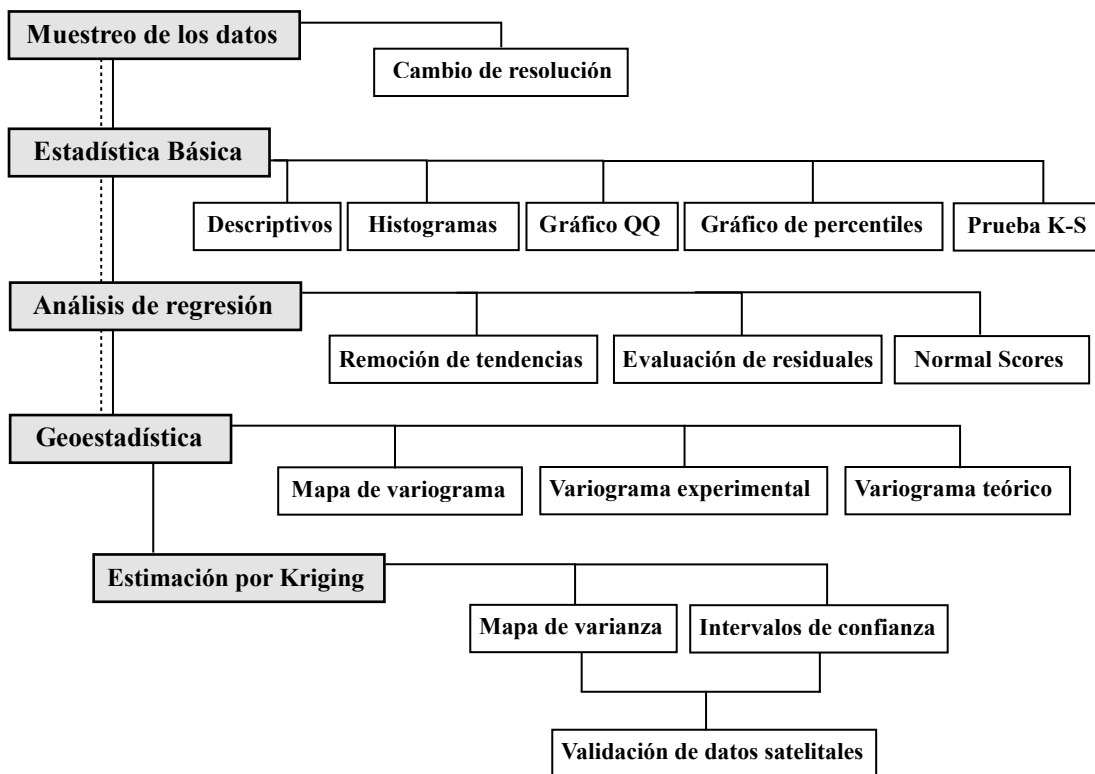


Figura 3. Metodología estadística empleada durante la comparación numérica y espacial de los datos satelitales y terrestres. Comprende estadística básica (histogramas, descriptivos, entre otros), la aplicación de modelos lineales sobre diversas variables y finalmente el uso de la geoestadística como herramienta de comparación numérica y espacial.

conformada por cuatro pasos principales. En principio, se generó el mapa de variograma de la variable en cuestión, con el objetivo de determinar las direcciones principales de anisotropía (máxima y mínima continuidad). Luego a partir de estas direcciones se generaron los variogramas experimentales que se ajustaron con modelos teóricos con unos parámetros dados, como etapa antecedente al proceso de *kriging*.

Finalmente, el cálculo de la varianza al momento de resolver las ecuaciones de *kriging* permitió establecer intervalos de confianza alrededor de los valores estimados (95%) y determinar qué porcentaje de los datos se encuentran dentro de los límites de incertidumbre de la variable (Figura 4).

Los datos gravimétricos se analizaron empleando el

software de programación estadística R (R Development Core Team, 2009) y los paquetes de análisis geoestadístico SP (Pebesma y Bivand, 2005) y gstat (Pebesma, 2004).

RESULTADOS

Estadísticos básicos y modelos lineales

Se realizó la estadística descriptiva de los datos satelitales y terrestres muestreados previamente (Tabla 1), donde se observan los valores por intervalo de los datos de anomalía de Bouguer satelitales y terrestres.

Se generaron además para cada variable el histograma de frecuencia y gráfico Q-Q para evaluar cualitativamente

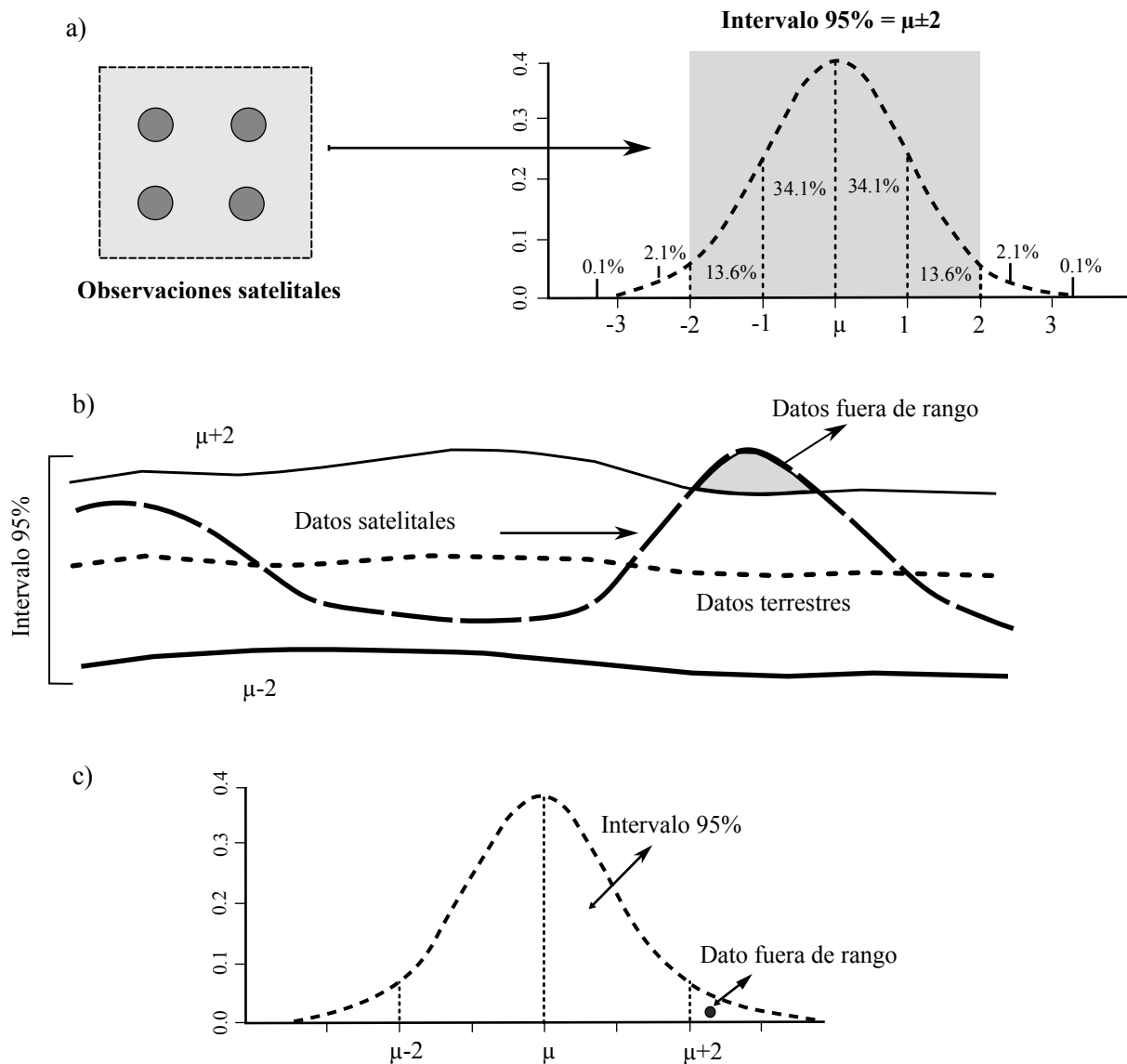


Figura 4. Método de los límites de incertidumbre. a: Cada estimación contiene información sobre su distribución en términos de su media y varianza, con lo cual se puede definir el intervalo de 95% equivalente a sumar o restar a la media dos veces la desviación estándar. b: Una vez definidas las superficies de incertidumbre se verifica si la correspondiente a los datos satelitales se encuentra dentro de los límites establecidos o si se encuentran fuera de rango (zona en color gris). c: Un dato fuera de rango equivale a que se encuentre por fuera de la distribución de la estimación del punto terrestre correspondiente.

Tabla 1. Estadígrafos descriptivos básicos de las cotas y anomalía de Bouguer (AB) de los datos satelitales y terrestres.

Variable (n=596)	Mín.	1er. cuartil	Mediana	Media	3er. cuartil	Máx.	Desv. estándar
Cotas satelitales (m)	7.0	79.0	122.0	118.4	151.0	310.0	47.8
Cotas terrestres (m)	29.6	75.2	123.3	119.7	150.3	315.6	51.6
AB satélite (mgal)	-55.9	-5.1	4.5	2.7	13.8	36.5	15.5
AB terrestre (mgal)	-59.3	-9.7	1.2	-0.1	10.1	37.0	15.4

la distribución de los datos de anomalía de Bouguer (Figura 5). Con base en la inspección visual, se puede observar que ambos histogramas muestran distribuciones similares y el gráfico Q-Q presenta un ajuste modesto a la recta teórica normal. Por otro lado, la prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S) apunta al rechazo de la hipótesis que indica que las distribuciones de estas variables son normales. Sin embar-

go, se decidió continuar el análisis teniendo en cuenta esta condición para las ecuaciones de *kriging*.

Dada la similitud en la distribución de las variables, se realizó un gráfico de dispersión para determinar el grado de dependencia lineal. La Figura 6 muestra la relación positiva lineal que existe entre AB satelital y AB terrestre, la ecuación que la describe y el valor del coeficiente de

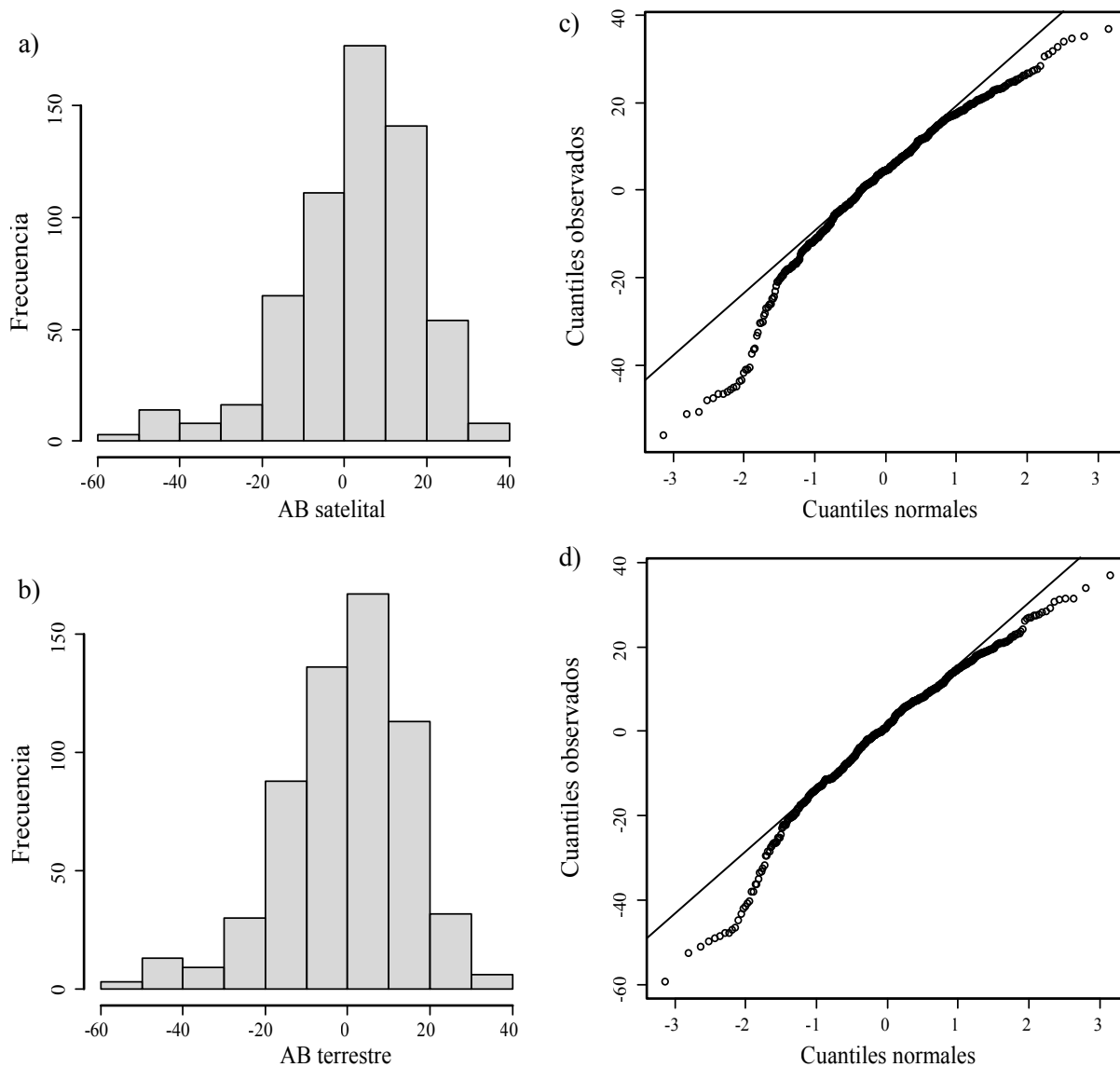


Figura 5. Histogramas de frecuencia para AB satelital (a) y AB terrestre (b) y Gráficos Q-Q para AB satelital (c) y AB terrestre (d). Nótese la similitud entre las distribuciones de las variables y el ajuste relativo a las rectas normales teóricas.

Tabla 2. Estadígrafos descriptivos básicos de las diferencias de cotas y anomalía de Bouguer (AB) de los datos satelitales y terrestres.

Variable (n=596)	Mín.	1er. cuartil	Mediana	Media	3er. cuartil	Máx.	Desv. estándar
Diferencia AB	-24.1	-0.3	2.8	2.8	5.5	19.3	5.2
Diferencia Cota	-77.8	-14.6	-0.6	-1.3	8.3	165.9	27.6

ajuste ($R^2=0.883$), el cual al ser elevado implica que ambas variables se comportan espacialmente de forma similar. Asimismo, el coeficiente de correlación lineal obtenido es de 0.94, indicando que AB satelital y AB terrestre están notablemente correlacionadas. Igualmente, el valor del intercepto de la ecuación del modelo lineal (-2.6322) muestra que existe una subvaloración sistemática de la AB satelital respecto de la AB terrestre.

Diferencias de anomalía de Bouguer

Uno de los objetivos de la investigación era cuantificar y caracterizar las diferencias entre los conjuntos de datos. Las diferencias se calcularon restando el valor satelital a su valor de equivalente en tierra para AB y elevación.

Si los errores que causan las diferencias entre los datos de anomalía de Bouguer y cota (satelital y terrestre) fuesen casuales o aleatorios, los valores deberían ser normales centrados en cero. Para evaluar esto se hace uso de los descriptivos básicos, que son mostrados en la Tabla 2. Las diferencias de AB presentan una media de 2.8 miligales, lo cual es consistente con la desviación sistemática encontrada para el modelo lineal planteado en la Figura 6 para AB satelital y AB terrestre.

Luego, se realizaron el histograma de frecuencia y el gráfico Q-Q para las diferencias de cota y AB, para

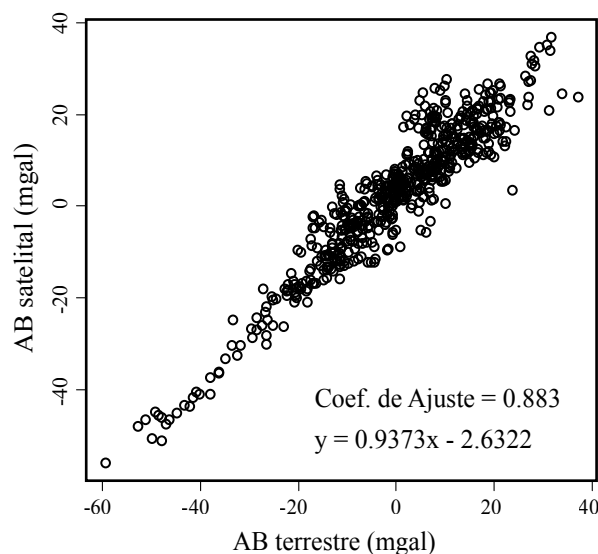


Figura 6. Gráfico de dispersión de anomalía de Bouguer (AB) satelital contra AB terrestre. Se observa una buena dependencia lineal positiva entre las variables, representada con un coeficiente de ajuste $R^2=0.883$.

evaluar el tipo de distribución presente en estos datos. Las diferencias de anomalía de Bouguer (Figura 7) muestran un ajuste aproximadamente normal y una asimetría positiva en el caso de las diferencias de cotas. Igualmente, se presentan algunos valores extremos negativos y positivos, los cuales además pueden verse en el gráfico Q-Q distorsionando el ajuste con la distribución normal teórica.

Modelos lineales para diferencias de anomalía de Bouguer y cota

Como primer paso se realizó el gráfico de dispersión diferencias de AB contra diferencias de cota, el cual no mostró tendencias claras, por lo que se decidió verificar la existencia de alguna tendencia dependiente de otras variables, en este caso de la longitud y latitud. (Figura 8)

Se plantearon dos modelos lineales en función de la latitud y longitud, para diferencias de cota y anomalía de Bouguer. En ambos casos, ni la longitud ni el intercepto son significativos; es decir, las diferencias de cota y anomalía dependen solo de la latitud. Los nuevos modelos, solamente con la latitud, se muestran en las Tablas 3 y 4. Para los dos casos, la latitud tiene una alta significancia estadística dentro del modelo en términos del p-valor y los residuales tienen valores medios muy cercanos a cero. Sin embargo, el bajo valor del coeficiente de ajuste encontrado para ambos casos ($R^2=0.057$ y $R^2=0.050$), implica que solamente un 5% de la variabilidad de los datos está siendo explicada por esta tendencia. En general, se podría decir que no existe dependencia lineal significativa.

Las diferencias de cota y AB tienen una componente sistemática de variabilidad en dirección norte-sur, traducida en la disminución con incrementos en la latitud. En el caso de las cotas esta tendencia puede ser producida por alguna fuente de error dependiente de la localización. Para AB se relaciona con la variación con la latitud de las cotas y un posible efecto de arrastre del satélite durante el recorrido

Tabla 3. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para diferencias de cota.

	R^2	0.057	Estimado	Desv. est.	Valor t	$Pr(> t)$
Error						
Coeficientes	Intercepto	135.5	22.7	5.9	4.2e-09	
	Lat	-15.8	2.6	-6.0	2.9e-09	
Residuales	Min.	1Q	Mediana	3Q	Máx.	
	-78.8	-13.0	1.4	11.1	149.5	

norte-sur por la órbita correspondiente.

Una vez expuestas las tendencias, se retiran de los datos y se obtienen los residuales, los cuales, se distribuyen normalmente con sus valores centrados en cero como lo muestran los histogramas y gráficos Q-Q de la Figura 9, cumpliendo con el principio de estacionariedad. Al remover las tendencias el coeficiente de correlación entre los residuales aumenta.

En resumen, los resultados anteriores indican que parte de las diferencias entre los datos de tierra y de satélite se deben a una tendencia sistemática norte-sur en la estimación de la topografía.

Geostatística: Kriging

Normalización de los datos terrestres a partir de conteo normal (normal score)

Frecuentemente, en Ciencias de la Tierra, se hace la suposición de que la variable estudiada presenta una distribución de probabilidad de tipo normal. Pero en muchas ocasiones esta conjetura puede ser objetada al emplear pruebas estadísticas no paramétricas (como la prueba K-S), las cuales no suponen una distribución de probabilidad para los datos. Los datos de AB terrestre originales sin muestrear (762 estaciones) fueron sometidos a la prueba K-S,

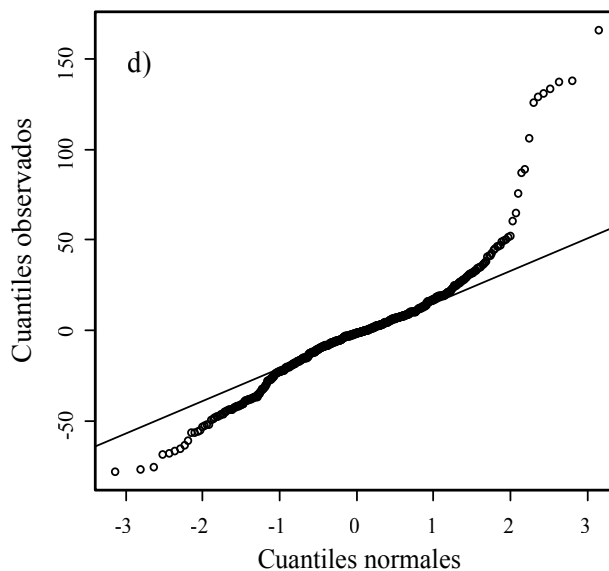
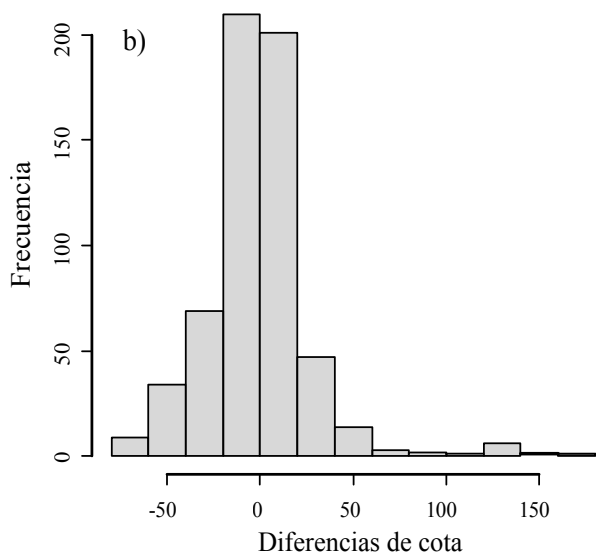
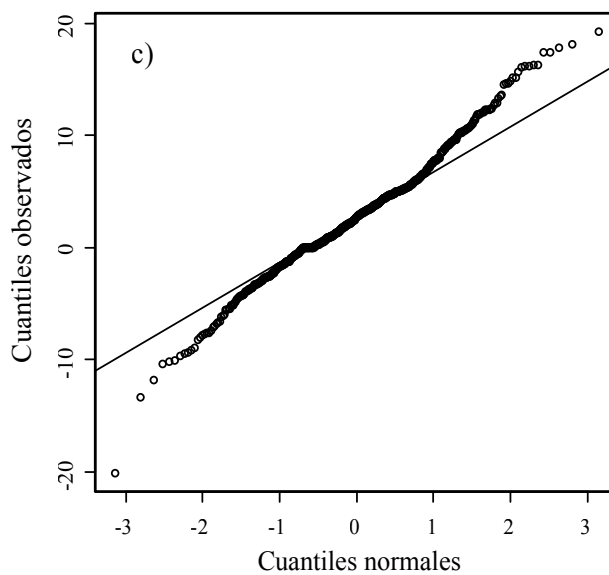
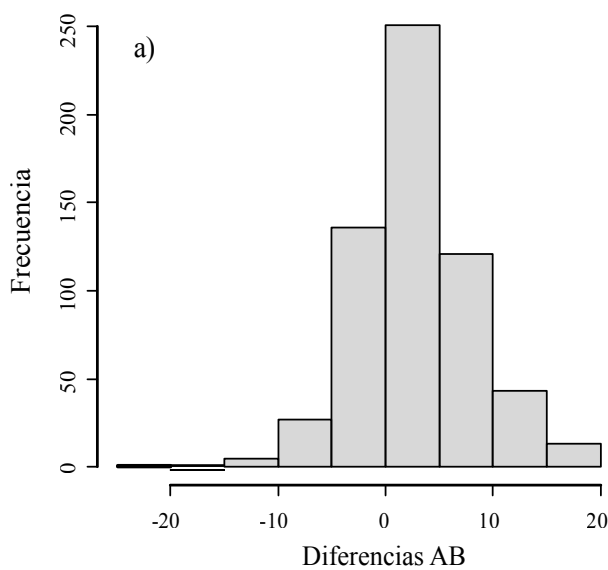


Figura 7. Histograma de frecuencia para (a) diferencias de anomalía de Bouguer (AB) y (b) diferencias de cota. Gráficos Q-Q para (c) diferencias de AB y (b) diferencias de cota. Nótese que las diferencias de AB presentan una distribución aparentemente normal y un buen ajuste a las rectas normales teóricas. Para las cotas hay valores extremos positivos que sesgan la distribución.

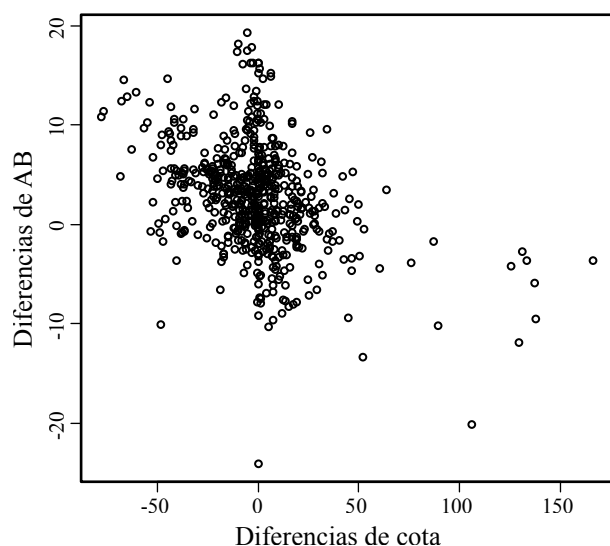


Figura 8. Gráfico de dispersión diferencias de anomalía de Bouguer (AB) contra diferencias de cota. Nótese la ausencia de tendencias claras.

obteniéndose un p-valor igual a 0, con lo cual se rechazó la hipótesis de normalidad.

Una vez determinada en los datos gravimétricos terrestres la ausencia de normalidad, se transformaron a partir de *normal scores* empleando la fórmula de Blom (1958), con la finalidad de forzarlos a seguir una distribución normal. Para los cálculos basados normalidad de los datos (incluyendo el *kriging*), se utilizaron los valores transformados, pero después fue necesario realizar la transformación inversa empleando un método basado en la media móvil, que requería los datos terrestres originales y su función de distribución de probabilidad acumulada y los datos terrestres estimados por el *kriging*.

Variografía

Para realizar la variografía correspondiente previa al *kriging*, se emplearon los datos de tierra y satelitales normalizados. Para ello, se generaron los mapas de variograma para evaluar direcciones preferenciales de continuidad (Figura 10). Los valores empleados para el *cutoff* o distancia máxima de alcance del variograma y *width* o ancho de las ventanas de búsqueda de puntos, fueron de 1.3 y 0.07, respectivamente. Se debe recordar que las unidades de distancia son grados, ya que así están expresadas las coordenadas de ubicación. Igualmente, se observó que la tendencia de mayor continuidad para los datos de tierra y satelitales está a 320° (grados a partir del norte) y la de menor continuidad a 230°.

Posteriormente, se realizaron los variogramas experimentales en las dos direcciones principales de continuidad observadas en el mapa previo. La distancia máxima de alcance fue de 1.1 y el ancho de la ventana de búsqueda

igual a 0.06 para ambos casos.

El paso siguiente fue ajustar un variograma teórico al experimental (Figura 11). El modelo final de mejor ajuste utilizado para los dos conjuntos de datos fue un modelo esférico. Los parámetros de ajuste para el variograma terrestre fueron: meseta (*sill*) = 0.97, efecto pepita (*nugget*) = 0, rango = 0.95 y relación RangoMenor/RangoMayor igual a 0.69 (elipse de anisotropía). Por otro lado, los datos satelitales se ajustaron con un *sill* de 0.98, *nugget* cero, rango mayor igual a 0.97 y relación RangoMenor/RangoMayor igual a 0.76. Es evidente que el ajuste del variograma experimental con el modelo elegido no es apropiado en la dirección de mínima continuidad por lo menos para el caso terrestre, y aplicando los modelos teóricos planteados queda una anisotropía zonal no resuelta (característica por las mesetas distintas en las direcciones principales de continuidad). Algunos autores recomiendan una combinación de modelos anidados para aproximar el comportamiento de anisotropía zonal. El objetivo principal es modelar la continuidad a partir de la suma de estructuras isotrópicas, es decir, especificar estructuras en el modelo de covarianza que contribuyan exclusivamente en direcciones particulares para que se incremente la meseta solo en éstas direcciones (Deutsch y Journel, 1992; Goovaerts, 1997; Chilès y Delfiner, 1999).

Desafortunadamente, no fue posible emplear los modelos anidados ofrecidos por el paquete *gstat* debido a que el ajuste a los variogramas empíricos es bastante modesto y carece aparentemente de funciones que permitan visualizar modelos de variogramas complejos. Por lo tanto, no se consideró la anisotropía zonal para el proceso de *kriging* y se ajustó la meseta solamente para la dirección de máxima continuidad.

Estimación por *kriging*

Una vez obtenida la variografía, se procedió a la estimación por *kriging* para AB terrestre. Para estas estimaciones puntuales se empleó como mallado de destino la misma distribución de localizaciones satelitales, a efectos de poder realizar punto a punto la comparación posterior.

La Figura 12 corresponde a los mapas finales, producto de la predicción hecha por el *kriging* para AB terrestre y satelital. En el caso terrestre (Figura 12a), es notable ver

Tabla 4. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para diferencias de anomalía de Bouguer.

R ²	0.050	Estimado	Desv. est. Error	Valor t	Pr(> t)
	Lat	-2.9	0.5	-5.6	2.7e-08
Residuales	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-27.7	-2.8	0.3	3.0	15.5

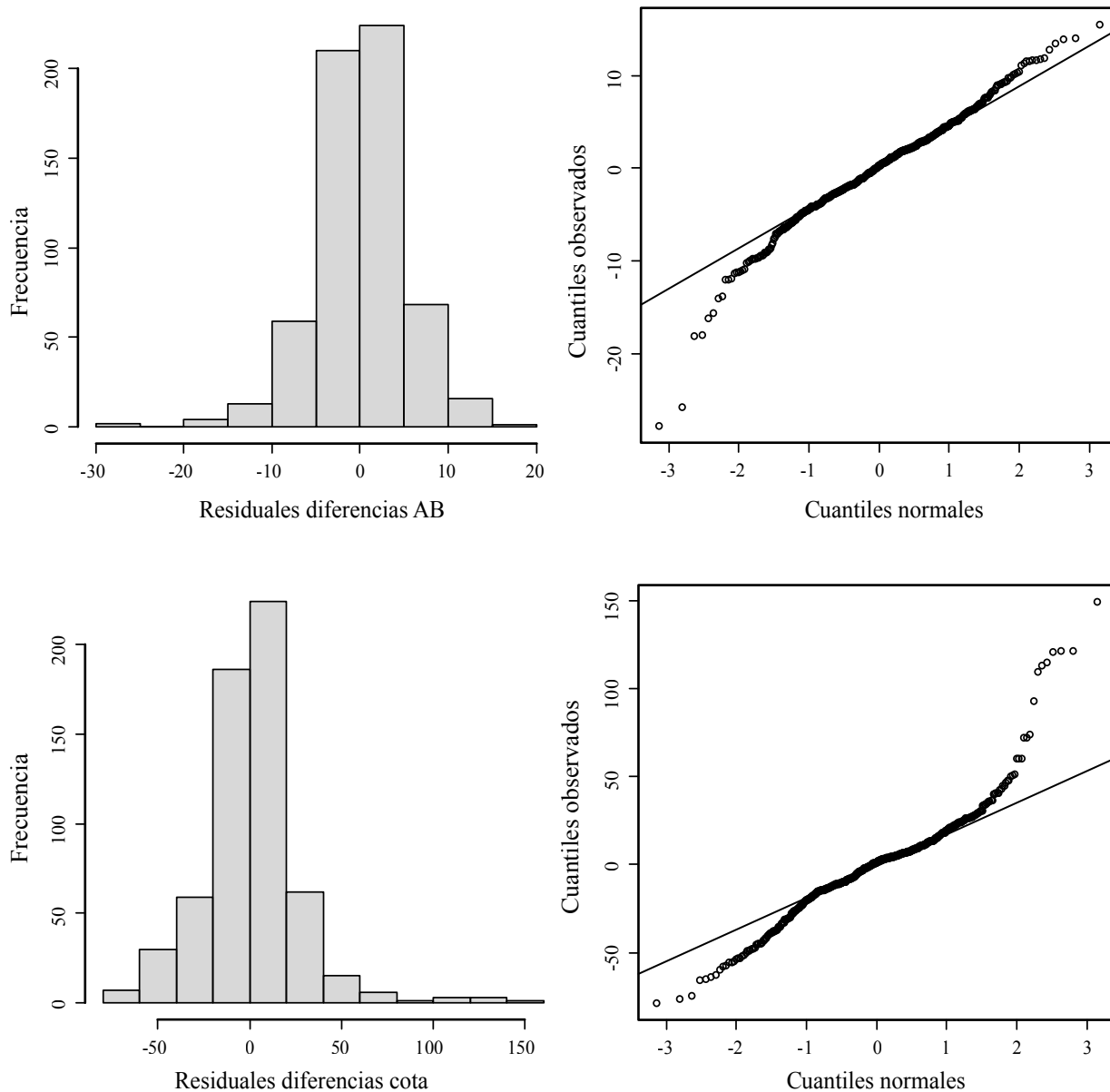


Figura 9. a: Histograma de frecuencia para residuales del modelo lineal planteado para diferencias de cota; b: residuales del modelo lineal para diferencias de anomalía de Bouguer (AB). Gráfico Q-Q para residuales de diferencias de cota (c) y residuales de diferencias de AB (d). Nótese que presentan una distribución aparentemente normal centrada en cero y un buen ajuste a las rectas normales teóricas, cumpliendo con el principio de estacionariedad, lo cual implica que no quedan tendencias lineales por remover.

que presenta en general suaves tendencias y muy poca presencia de ruido, dado que los datos tienen una distribución muy agrupada en perfiles, con amplias áreas vacías de datos donde las estimaciones vienen dadas por los promedios de puntos alejados. El mapa de AB satelital (Figura 12b), muestra la influencia de dos efectos regionales muy marcados con amplios gradientes hacia la región central del mapa y en dirección E-O y NO-SE, hecho que contrasta con el comportamiento de las isoanómalas en el mapa AB terrestre generado a partir del *kriging*, donde la dirección preferencial es NO-SE y se enmascara totalmente la tendencia E-O.

De igual manera, la Figura 13, correspondiente al mapa de profundidad al tope de basamento de la zona elaborado a partir de datos de levantamientos aeromagnéticos, datos gravimétricos e información geológica del subsuelo obtenida de los pozos ubicados en el área (Rodríguez, 1977), guarda una alta correspondencia con la respuesta gravimétrica observada en el mapa de anomalías de Bouguer satelital. Evidentemente, el enmascaramiento del efecto regional visto en las tendencias del mapa de AB terrestre, puede estar relacionado con la ausencia de datos en algunas zonas, dado que los datos fueron adquiridos en perfiles aproximadamente N-S.

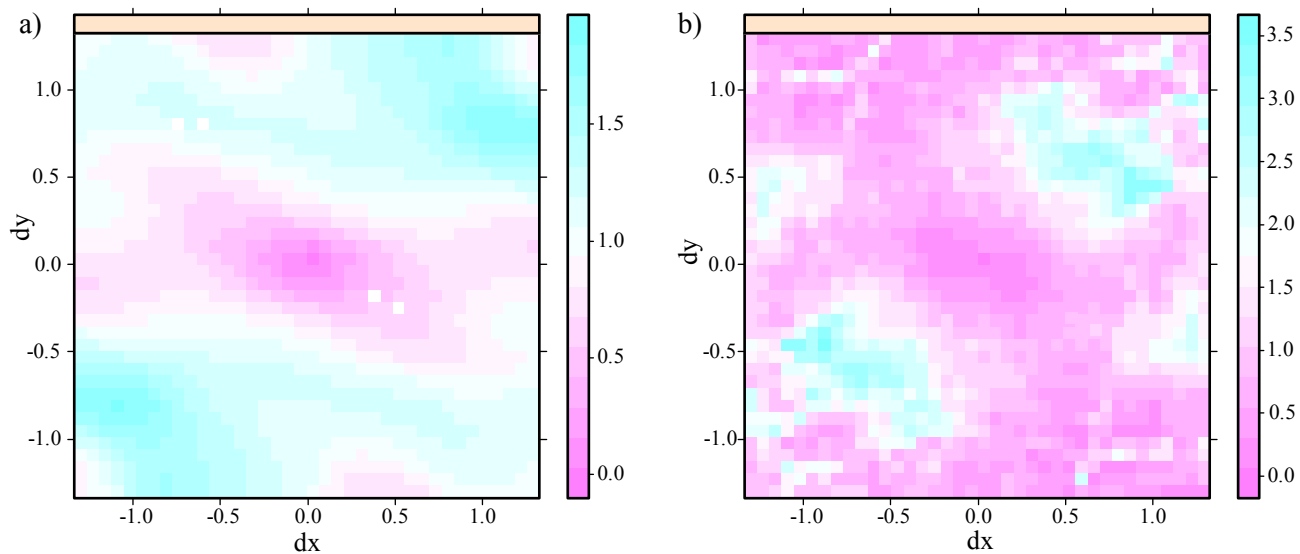


Figura 10. Mapa de variograma para anomalía de Bouguer satelital (a) y anomalía de Bouguer terrestre (b). Se presentan las direcciones de máxima y mínima continuidad correspondientes, las cuales son similares para ambos conjuntos de datos.

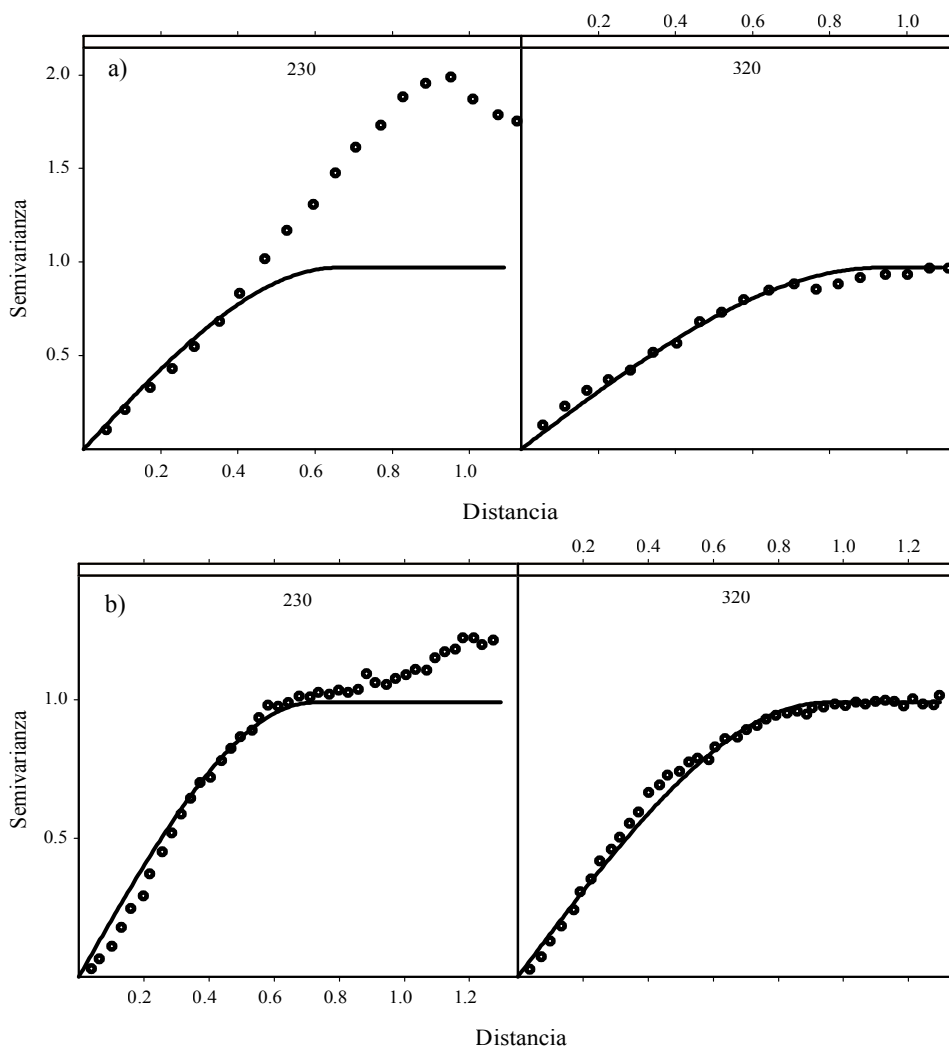


Figura 11. Variograma experimental y teórico anomalía de Bouguer satelital (a) y anomalía de Bouguer terrestre (b). Para las direcciones de máxima y mínima continuidad (gráficos a derecha e izquierda, respectivamente) el comportamiento es análogo entre los datos terrestres y satelitales.

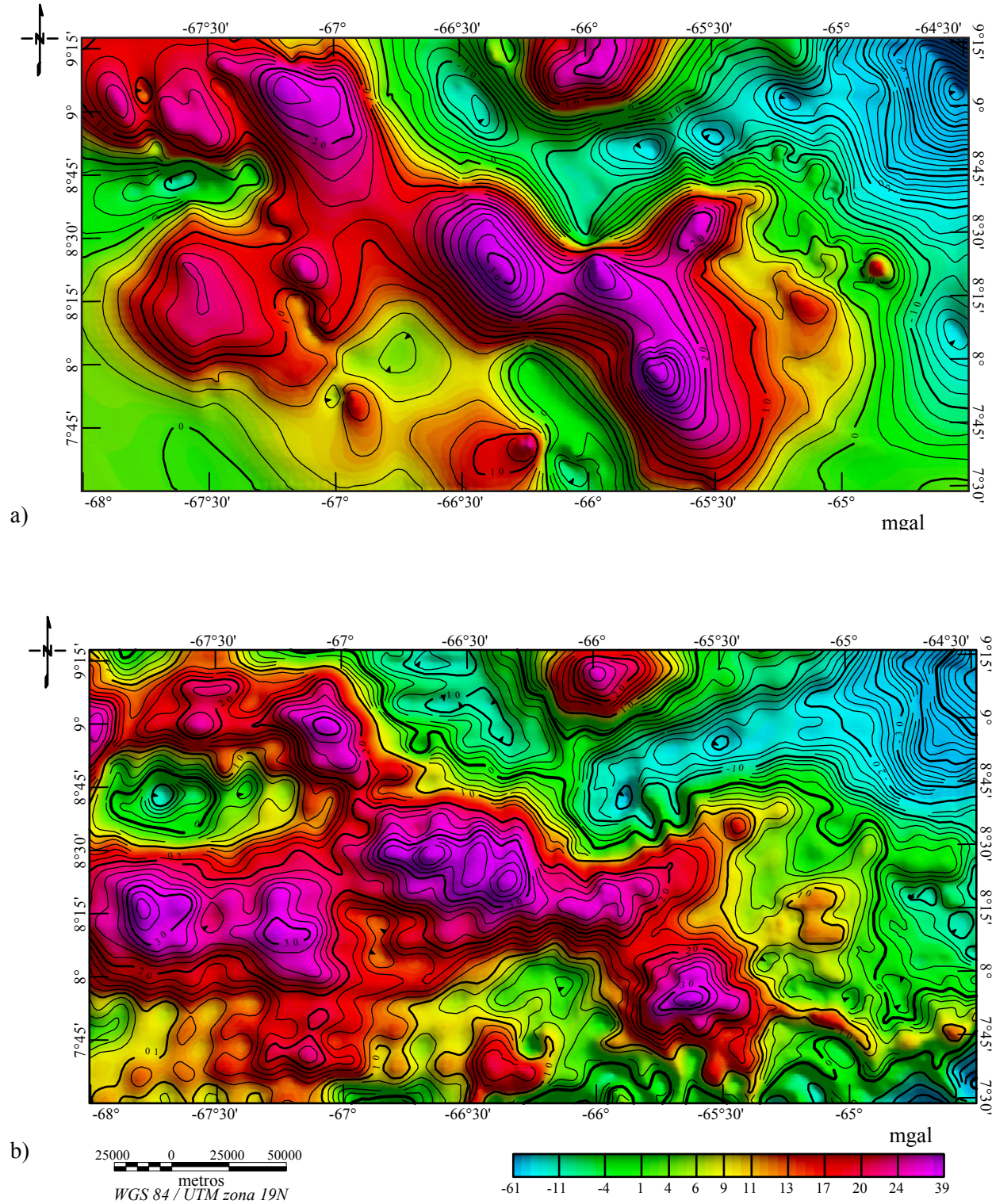


Figura 12. a: Mapa de anomalía de Bouguer terrestre estimado a partir de *kriging*, tomando como referencia las localizaciones satelitales. Se observa a priori una tendencia regional marcada en dirección NO-SE. b: Mapa de anomalía de Bouguer satelital estimado empleando *kriging*. Nótese las tendencias regionales marcadas en dirección NO-SE y E-O; esta última se encuentra enmascarada en el mapa de anomalía de Bouguer terrestre estimado.

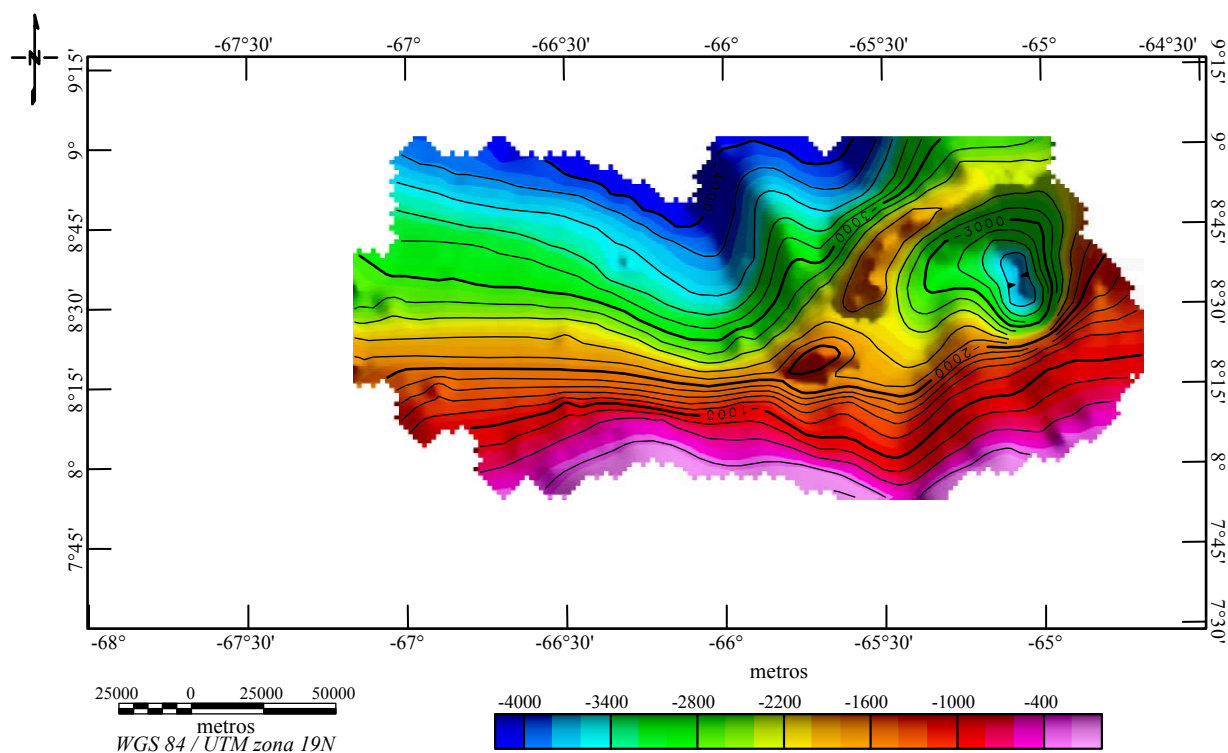


Figura 13. Mapa de profundidad al tope de basamento a partir de datos aeromagnéticos, gravimétricos y de geología de superficie estimada a partir de mínima curvatura. Nótese la tendencia en profundidad en dirección E-O, lo cual es coincidente con el comportamiento encontrado en el mapa satelital de anomalía de Bouguer. Modificado de Rodríguez (1977).

Intervalos de confianza

A partir de los valores puntuales de varianza generados por el *kriging*, se calcularon las superficies asociadas a los intervalos de confianza alrededor de los valores estimados para los datos de tierra (incertidumbre permitida) para un intervalo del 95%.

La finalidad de esta prueba era comprobar que las mediciones de AB satelital se encontraban dentro de dicho intervalo permitido. Hay que tomar en cuenta que los intervalos de confianza están sujetos a la geometría de los datos y que las zonas de baja varianza son aquellas donde se ubican más datos.

Los cálculos indican que con un 90% de probabilidad los datos de satélite cumplen con esa condición. La Figura 14 muestra los datos fuera del intervalo de confianza (círculos amarillos) y ubicación de los puntos con diferencias de cota mayores a 20m (cuadros celestes) sobre el mapa de varianza para AB terrestre. En el mapa tres situaciones completamente distintas pueden observarse:

La primera, señalada por los óvalos blancos, corresponde con aquellas zonas de varianza mínima (donde se ubican los datos). En estas zonas, el intervalo de confianza es reducido y las diferencias entre los datos terrestres y satelitales tiende a ser más notoria; por lo tanto, la probabilidad de que los datos estimados se ubiquen fuera del intervalo

de confianza es mayor. No obstante, existen diferencias de cota entre las fuentes por encima de los 20 metros por lo que las diferencias encontradas entre los valores de anomalía satelitales y terrestres en estos puntos estimados pueden estar asociadas con estas diferencias de cota.

La segunda, enmarcada en rectángulos punteados, representa regiones donde no existían datos de tierra originalmente y que fueron estimados a partir del *kriging* pero con una varianza muy alta, por encima de los 120 mgal². En este caso los datos de satélite son los datos que deberían considerarse como robustos, dado que se encuentran a lo largo de toda el área.

Por último, los óvalos negros son áreas que contienen datos originales de tierra y donde las diferencias de cota, al ser inferiores a 20 metros, no representan un factor de error significativo en la estimación de AB. Se cree que el factor instrumental pudiera estar influyendo, sin embargo, no se dispone de información suficiente para cuantificar errores asociados a dicha causa en ningún espacio del área de estudio.

La distribución espacial inherente a los datos utilizados para realizar los mapas es importante para obtener resultados de calidad que permitan establecer interpretaciones sólidas y precisas del comportamiento gravimétrico en profundidad de las estructuras presentes en determinada zona de estudio. Es importante generar mapas con datos

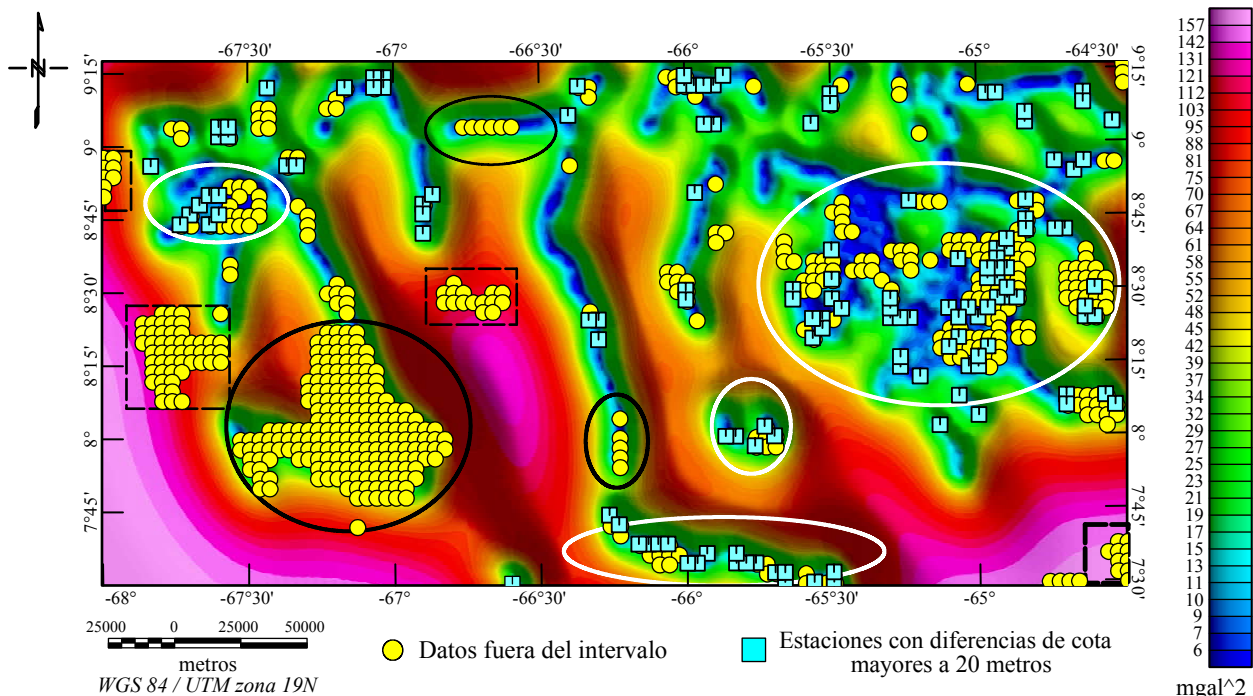


Figura 14. Ubicación de los puntos con diferencias de cota mayores a 20 m (rectángulos celestes) y datos fuera del intervalo de confianza (círculos amarillos) sobre el mapa de varianza de *kriging* para anomalía de Bouguer terrestre. Los óvalos blancos son zonas de mínima varianza con diferencias de cota mayores a 20 metros. Los rectángulos punteados representan regiones con estimaciones de *kriging* con varianza alta. Los óvalos negros son áreas donde las diferencias de cota son inferiores a 20 metros y la varianza es muy pequeña.

distribuidos de la forma más regular posible, característica principal de los datos de origen satelital, la cual no siempre es posible encontrar en datos adquiridos en tierra.

A partir de todo el estudio estadístico previo se mostró que los datos generados por medidas satelitales tienen ventajas sobre los datos adquiridos tradicionalmente en tierra, en lo relacionado con la homogénea distribución de los datos medidos, dado que la incertidumbre asociada al empleo de los datos satelitales es menor a la incertidumbre obtenida al utilizar datos terrestres interpolados a partir de pocas observaciones.

CONCLUSIONES

Los datos de AB satelital y terrestre presentan distribuciones de frecuencia similares y mediante las transformaciones necesarias se ajustan a los estándares de normalidad necesarios para la generación del mapa a partir de *kriging*. El coeficiente de correlación entre las variables es de 0.93 y presentan una relación lineal creciente.

Las diferencias de AB tienen una componente sistemática de variación con la latitud, que aunque poco significativa en términos de coeficiente de ajuste, debió ser estimada para ser removida antes del proceso de *kriging*. Dicha tendencia puede estar relacionada con el efecto de arrastre del satélite durante el recorrido norte-sur por la órbita correspondiente y la variación de las cotas en esta dirección.

El análisis geoestadístico apunta a que al establecer intervalos de confianza del 95% alrededor de los datos terrestres, los datos del modelo combinado con datos satelitales se encuentran dentro de estos límites en un 90% de los casos. El 10% de datos fuera de rango puede ser explicado a partir de diferencias de cota mayores a 20 metros, el instrumental empleado durante la adquisición, problemas de borde y de estimación del predictor debido a la ausencia de datos en ciertas zonas.

Es primordial además el aprovechamiento de las tecnologías espaciales para los estudios de gravedad terrestre. Los beneficios inherentes a estas adquisiciones satelitales son innegables y se han puesto de manifiesto en esta investigación: datos de calidad, libres de costo y con disponibilidad casi inmediata a la comunidad científica.

REFERENCIAS

- Barlier, F., Lefebvre, M., 2001, A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences, en Bleeker, J.A.M., Geiss, J., Huber, M.C.E. (eds.), The Century of Space Science: Dordrecht, Holanda, Kluwer Academic Publishers, 1623-1651.
- Blom, G., 1958, Statistical Estimates and Transformed Beta-Variables: New York, John Wiley & Sons, 176 pp.
- Chilès, J., Delfiner, P., 1999, Geostatistics-Modeling Spatial Uncertainty: New York, John Wiley & Sons, 720 pp.
- Deutsch, C., Journel, A., 1992, GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide: New York, Oxford University Press, 340 pp.
- García, A., 2009, Mapas de Anomalía de Bouguer y Anomalía Magnética

- de Venezuela elaborados a partir de datos satelitales: Caracas, Venezuela, Universidad Central de Venezuela, tesis pregrado, 173 pp.
- Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for Natural Resources Evaluation: New York, Oxford University Press, 483 pp.
- Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S., Schmidt, D., Trimmer, R., 2005, A Preliminary Gravitational Model to Degree 2160: Journal of Geodesy, 79, 467-478.
- Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S., Factor, J., 2008, An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, en 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, Abril, 13-18.
- Pebesma, E., 2004, Multivariable geostatistics in S: the gstat package: Computers & Geosciences, 30, 683-691.
- Pebesma, E., Bivand R., 2005, Classes and methods for spatial data in R: R News, 5(2), 9-13.
- R Development Core Team, 2009, R: A language and environment for statistical computing: R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, disponible en: <<http://www.R-project.org>>, consultado el 17 de Julio de 2010.
- Rapp, R., 1998, Past and future developments in geopotential modeling, en Forsberg, R., Feissel, M., Dietrich R. (eds.), Geodesy on the Move: Berlin-New York, Springer Verlag, 58-78 pp.
- Rodríguez, I., 1977, Proyecto "Investigación de la Faja Petrolífera del Orinoco por métodos geofísicos no convencionales", Fase I: Caracas, Instituto Tecnológico – Foninves, reporte técnico, 103 pp.
- Tapley, B., Ries, J., Bettadpur, S., Chambers, D., Cheng, M., Condi, F., Gunter, B., Kang, Z., Nagel, P., Pastor, R., Pekker, T., Poole, S. Wang, F., 2005, GGM02 - An improved Earth gravity model from GRACE: Journal of Geodesy, 79, 467-478.
- Manuscrito recibido: Febrero 17, 2011
Manuscrito corregido recibido: Mayo 23, 2011
Manuscrito aceptado: Junio 7, 2011