

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS DE ANOMALÍA MAGNÉTICA MARINA SOBRE UN NAUFRAGIO EN EL CARIBE COLOMBIANO

GEOSTATISTICAL ANALYSIS APPLICATION FOR DATA PROCESSING ON MAGNETIC ANOMALY OF A SHIPWRECK IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN

Fecha de recepción: 11 de octubre de 2010 / Fecha de aprobación: 10 de diciembre de 2010

Sary Téllez Moncada, Javier Fuentes López, Lina Marcela Fabra Camacho

Resumen

En mayo de 2009 se realizó, gracias al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, un crucero a bordo del buque oceanográfico ARC Providencia, con el objetivo de efectuar los levantamientos magnético y batimétrico de un sector adyacente a la isla Tierrabomba, en Cartagena, Bolívar.

El levantamiento magnético centró su interés sobre un área de 2,25 km², en la ubicación del naufragio del EX ARC Pedro Heredia, considerando que su susceptibilidad magnética permite la detección clara de una respuesta anómala sobre su ubicación. Para la toma de mediciones se hizo el diseño de dos esquemas de adquisición de datos, uno general y uno detallado. El equipo de adquisición empleado en el levantamiento fue el magnetómetro marino Geometrics G-882. Se recopiló aproximadamente 110.000 datos de intensidad de campo magnético total, los cuales fueron corregidos por variación diurna y anomalía regional, con el modelo IGRF 2005. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis geoestadístico de los datos, donde se incluyen los análisis exploratorio y estructural y la predicción espacial para la obtención de las superficies de confianza asociadas al valor de la anomalía magnética del área de interés.

Palabras claves: análisis estructural, análisis geoestadístico, anomalía magnética, magnetómetro, predicción espacial, superficie de confianza.

Abstract

In May 2009, was conducted through the Center for Oceanographic and Hydrographic Research and the University Distrital Francisco José de Caldas, a cruise aboard the ship ARC Providencia, in order to make magnetic and bathymetric surveys of an area adjacent to Tierra Bomba Island, Cartagena, Bolívar.

The magnetic survey was focused on an area of 2.25 km², on the location of the shipwreck EX ARC Pedro Heredia, whereas its magnetic susceptibility allows clear detection of an abnormal response on its location. For capture measurements, they made the design of two data acquisition schemes, one general and one detailed. The acquisition equipment used in the survey was the Marine Magnetometer Geometrics G-882. They captured approximately 110.000 measures of total magnetic field, which were corrected for diurnal variation and regional anomaly, with the IGRF 2005 model. Subsequently, geostatistical analysis was made of the data, which includes exploratory and

structural analysis, and spatial prediction to obtain confidence surfaces associated with the value of the magnetic anomaly on the area of interest.

Keywords: structural analysis, geostatistical analysis, magnetic anomaly, magnetometer, prediction space, confidence surface.

Introducción

El modelado del campo magnético de la Tierra permite, junto a otras técnicas, inferir la ubicación y forma de elementos anómalos que se encuentran en la litosfera, cuya detección es posible mediante la susceptibilidad magnética, obtenida de los valores del campo magnético total observado.

El estudio de las irregularidades del campo magnético de origen cortical, denominadas anomalías magnéticas, hace parte de un método geofísico que provee gran utilidad en las investigaciones sobre la estructura profunda de un área de interés. Básicamente, los mapas de anomalías magnéticas en una zona, generados con análisis estadísticos, reflejan con un grado de incertidumbre conocido, el total de campos magnéticos asociados a la magnetización de los distintos elementos, siendo estos mapas el insumo para análisis específicos que buscan la obtención de información sobre la distribución en el subsuelo de los elementos anómalos que generan las variaciones sobre las mediciones realizadas.

La aplicación del método magnético comprende, desde los estudios de las anomalías marinas lineales, ligadas a la expansión de las dorsales oceánicas, hasta la investigación de los yacimientos minerales o los estudios a pequeña escala aplicados a la arqueología [1].

Se ha evidenciado la amplia utilidad que presentan las actividades de detección, modelado y análisis de anomalías magnéticas; sin embargo, los trabajos de investigación sobre el campo geomagnético, especialmente el marítimo, en Colombia han tenido una dinámica lenta; no se han implementado formalmente estándares y metodologías que reflejen claramente la integración de distintas áreas del conocimiento, focalizadas a obtener superficies que, bajo un límite de incertidumbre conocido, reflejen el comportamiento de la anomalía magnética en una zona.

Es así como la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, y la Dirección General Marítima, desarrollaron una investigación en la que uno de los objetivos fue contribuir al diseño de una metodología de adquisición y procesamiento de datos geomagnéticos marinos.

El estudio más completo y reciente de adquisición y procesamiento de datos magnéticos, en Colombia, se realizó en el año 2008, su nombre: New Magnetic Anomalies Colombia MAM – 2008, liderado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), apoyados en consultorías con firmas multinacionales. En el estudio mencionado las mediciones de intensidad magnética total fueron corregidas por variaciones diurnas y por el modelo IGRF 2005, con lo que se obtuvo la anomalía magnética total para el país. Los rangos de las anomalías fueron normalizados por diferencias de alturas y presentan variaciones entre [-113,104] nT, incluyendo algunas zonas de las plataformas oceánicas del Caribe y el Pacífico colombianos. La zona del Caribe correspondiente al área de interés sobre el naufragio EX ARC Pedro Heredia, en el estudio de la ANH del 2008, refleja valores de [-30, 10] nT, de tal forma que este rango representó un punto de referencia para establecer el rango de valores de anomalía magnética esperada en el área de estudio [2].

Materiales y métodos

A continuación se describen los materiales empleados para la adquisición y procesamiento de los datos del levantamiento magnético, y los métodos empleados para la obtención del producto final: mapa de anomalía magnética sobre el naufragio EX ARC Pedro Heredia.

Equipo de medición

En el buque oceanográfico ARC Providencia se encuentra el equipo magnetómetro marino Geometrics G-882, utilizado para la medición de campo magnético total.

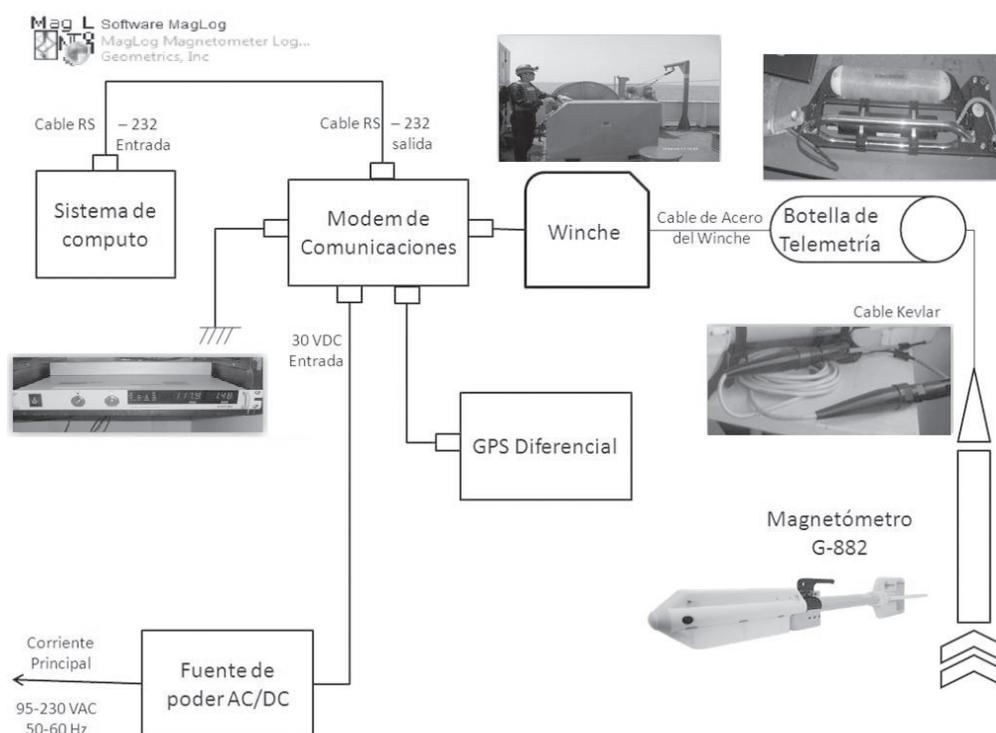


Figura 1. Componentes del magnetómetro marino Geometrics G-882. Fuente: Data Sheet Document G-882. Sitio [web](http://www.geometrics.com) www.geometrics.com.

En general, el equipo cuenta con varios componentes, que bajo una configuración establecida, permiten la detección del campo magnético y la transmisión y el almacenamiento de los datos resultantes de su operación. El principio de operación del magnetómetro es el vapor de cesio con rayo dividido autooscilante no radiactivo, de muy alta resolución, bajo un rango de operación que está comprendido entre 20.000 y 100.000 nT. El componente que contiene los sensores magnético y altimétrico es denominado Pescado, el cual cuenta con aproximadamente 1,37 m de longitud y 20 kg de peso, con la posibilidad de ampliar su peso hasta 50 kg mediante una aleta depresora, para lecturas en aguas profundas. El altímetro permite monitorear en tiempo real la altitud y profundidad a la cual se encuentra el sensor.

A los efectos de adquisición de datos con el magnetómetro Geometrics G-882, se utiliza el *software* MagLog Magnetometer Logging, que dispone Geometrics, por medio de un protocolo de transferencia de archivos (FTP), enlazado a su sitio *web*. El *software* permite la creación del proyecto de adquisición, la configuración de las comunicaciones con los demás componentes del sistema, definir la tasa de muestreo, diseñar y programar la captura de datos sobre las líneas de adquisición, configurar la apariencia visual y emisión de alertas sobre valores irregulares en los datos, calibrar los sensores, configurar el Layback para asociar las coordenadas del GPS a la posición real del sensor, entre otros.

Anomalías magnéticas

El valor de intensidad de campo magnético total medido con sensores reúne el efecto de diferentes fuentes que generan campos magnéticos sobre el lugar de medición, sin distinción alguna de las fuentes que emiten dichos campos; sin embargo, para el detalle requerido por los estudios de prospección se ha definido que la principal fuente es el núcleo de la Tierra, que cambia lentamente con el tiempo, la segunda fuente son las variaciones externas provenientes del Sol, y la tercera es la causada por heterogeneidades de la corteza que representan variaciones pequeñas del campo magnético de la Tierra y son denominadas campo anómalo de la Tierra. Esta última fuente magnética es la de interés en el presente estudio, para cuantificar su efecto sobre las mediciones, es decir, para encontrar el valor de la anomalía magnética de interés, resulta necesario extraer de las observaciones de campo magnético los efectos de las otras dos fuentes.

El efecto del campo magnético generado por el núcleo de la Tierra es denominado variación secular, y se encuentra modelado por el campo geomagnético internacional de referencia (IGRF). El efecto generado por fuentes exteriores, como el Sol, principalmente, se conoce como variación diurna, y su valor se extrae del monitoreo hecho por las estaciones de medición permanente. De tal forma que la ecuación que refleja el cálculo de la anomalía magnética de interés, en función del campo magnético observado, es la siguiente:

$$\Delta B = B_{\text{observado}} - B_{\text{IGRF}} - B_{\text{externo}} \quad (1)$$

Donde $B_{\text{observado}}$ es el valor del campo magnético medido, B_{externo} corresponde al efecto del campo magnético externo, y B_{IGRF} es el efecto del campo magnético del núcleo de la Tierra, calculado con por el modelo IGRF.

Análisis geoestadístico

El producto principal del estudio es el mapa de anomalía magnética del área del naufragio, que

puede dar lugar a otras representaciones tridimensionales considerando las coordenadas y el valor de la anomalía magnética.

La variable de interés, es decir, la anomalía magnética, es continua, aunque su medición sea discreta, luego el objetivo del análisis geoestadístico de estos datos se centró en la predicción de los valores de anomalía magnética para los puntos no muestreados, garantizando que dicha predicción se encuentra sujeta a un intervalo de confianza basado en la estructura de correlación espacial de los datos.

Previamente a la etapa de predicción se distinguen dos etapas que básicamente buscan identificar valores extremos, tendencias, evaluar si se cumplen las condiciones enunciadas anteriormente, y en general identificar la estructura de correlación de los datos:

- Análisis exploratorio de datos espaciales (AEDE)
- Análisis estructural
- Predicción

Para emplear métodos estadísticos de predicción espacial por medio de la técnica *kriging*, se realizan los supuestos de que la variable de estudio es una variable regionalizada y el fenómeno presenta estacionariedad, los cuales son necesarios considerando que en cada punto muestreado se cuenta con una sola medida, luego no es posible calcular los momentos de segundo orden en adelante.

En este orden de ideas, la técnica *kriging* que se adapta a las condiciones de los datos de anomalía magnética es el *kriging* ordinario. Con esta técnica la predicción se realiza mediante una suma ponderada, donde los pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto de predicción. La suma de los pesos es uno (1), con el fin de que su valor esperado sea igual al de la variable, se asume que el proceso es estacionario de media desconocida [3].

Se efectúan mediciones de la variable Z en los puntos S_1, S_2, \dots, S_n , y se desea predecir $Z(S_0)$ en el punto S_0 , donde no hubo medición; para dicha predicción el *kriging* ordinario propone una combinación lineal de n variables aleatorias, pondera-

das con un peso λ , de acuerdo a la distancia entre los puntos muestreados y el punto de predicción:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (2)$$

Resultados

A continuación se describen los resultados obtenidos, a partir de la utilización de los materiales y métodos expuestos.

Adquisición de datos

El crucero a bordo del buque ARC Providencia se inició el 17 de mayo de 2009, y durante tres días se adquirieron los datos magnéticos e hidrográficos en cercanías de la isla Tierrabomba, en un área delimitada por las siguientes coordenadas geográficas: WGS84: 10°20'50" N - 10°21'30" N latitud y 75°35'40" W - 75°36'20" W de longitud.

Para las dos zonas de estudio se recopilamos aproximadamente un total de 110.000 datos, pero

no todos fueron efectivos, algunos se afectaron por el viraje del buque, otros se encontraron fuera del área de interés y otros más, dada la tasa de muestreo, no presentaron mayor variación con las mediciones que le seguían. Para los dos esquemas de adquisición de datos se modeló la respuesta anómala magnética del naufragio. Para el esquema general se definió un área de 2,25 km² con 22 líneas, con una separación de líneas entre sí de 50 m, grilla denominada Pedro de Heredia General, PHG, con la cual se buscaba identificar el comportamiento de la fuente anómala en un área de investigación mayor, simulando condiciones reales de adquisición geomagnética, en las cuales no se conocen los elementos que dan lugar a la presencia de anomalías. El esquema de adquisición general cubrió un área de 0,08 km² con 8 líneas de adquisición a un intervalo de muestreo de 100 Hz y una separación de líneas entre sí de 20 m, esta grilla se denominó Pedro de Heredia Detallado, PHD.

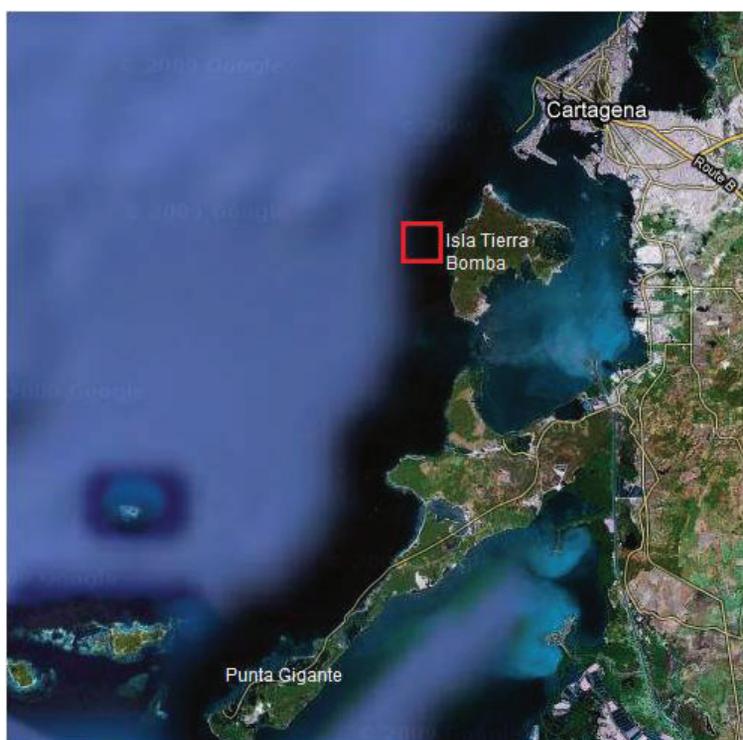


Figura 2. Localización del área de estudio. Representación generada dentro del proyecto, sobre el software Google Earth.

Obtención de la anomalía magnética

Las mediciones de campo magnético total, para las dos grillas de datos Pedro Heredia General y Detallado, PHG y PHD respectivamente, la hora de captura de la medición, junto con los valores de las coordenadas geográficas y altura elipsoidal de los puntos muestreados, fueron el insumo para calcular la anomalía magnética de interés, según lo expresado en la ecuación (1). En el *software* Oasis Montaj[®] de Geosoft, se hizo la reducción del efecto del campo magnético normal de la Tierra, con el modelo IGRF 2005. Posteriormente, con el propósito de determinar la variación del campo magnético externo o variación diurna, se utilizó como estación base de referencia San Juan (Puerto

Rico) de la red Intermagnet, conocida como la Red global de monitoreo del campo magnético de la Tierra, que cuenta con estaciones en varios países del mundo. La fuente de datos de esta estación es el United States Geological Survey (USGS) y sus coordenadas geográficas son 18°6' N de latitud y 66°12' W de longitud; la estación reporta las componentes horizontal, vertical y total del campo magnético. No obstante, el intervalo de muestreo de la estación es por minuto, y los datos obtenidos en este estudio se encuentran tomados con precisión de segundos, lo que generó la necesidad de interpolar los valores de variación diurna para las mediciones tomadas con precisión de segundos mediante las siguientes curvas:



Figura 3. Procesamiento de datos de variación diurna en el *software* Microsoft Excel[®].

Por medio de los procedimientos descritos se obtuvieron las anomalías magnéticas para los puntos muestreados, con lo que las variables de interés se redujeron, para el análisis geoestadístico sólo es necesaria la información de las coordenadas planas de los puntos muestreados y el valor de la variable de estudio.

Dada la necesidad de expresar la localización de los puntos muestreados en coordenadas planas, se llevó a cabo la transformación de coordenadas geográficas WGS84 a coordenadas planas UTM zona 18 Norte, datum WGS84.

Análisis geoestadístico de los datos de anomalía magnética

A continuación se describen el procedimiento y los hallazgos del análisis geoestadístico realizado sobre el conjunto de datos de anomalía magnética del área denominada Pedro Heredia Detallado, PHD.

Observando la variación de los datos de anomalía magnética, entre los puntos muestreados y sus adyacentes, se determinó que podía generarse una grilla de ventanas móviles que redujera la can-

tividad de registros sin afectar la variabilidad de los datos. Las ventanas móviles son rectángulos regulares que capturan los puntos muestreados contenidos en cada uno y asignan al centroide de dicho polígono la media, promedio, mínimo o máximo del valor de la variable en los puntos de muestreo contenidos en esa área.

El resultado de este procedimiento, para el caso del área de Pedro Heredia Detallado, fue una grilla con algunos datos faltantes (ventanas móviles que no contenían ningún punto muestreado), de 8 columnas por 244 filas, donde se tomó la mediana de los valores de anomalía magnética de los puntos muestreados contenidos en la ventana móvil.

En general, para los análisis exploratorio, estructural y la predicción espacial, se utilizó el *software* R-Project.

Análisis exploratorio de datos espaciales: Pedro Heredia Detallado

Inicialmente se hizo el cálculo de las medias de tendencia central y de dispersión para los datos de anomalía magnética resultantes del proceso de grillado con ventanas móviles, resumidos en la tabla 1. En ésta el rango de los valores para anomalía es amplio y las desviaciones estándar y mediana son altas; sin embargo, las medidas de tendencia central son cercanas y el coeficiente de variación es pequeño. También se detecta que el promedio no es un buen indicador del centro de los datos, dado que la desviación estándar es muy grande, luego el mejor indicador del centro de datos será la mediana. El coeficiente de asimetría indica que la distribución del conjunto de datos es relativa-

mente simétrica, y el valor de kurtosis revela un apuntalamiento alto y presencia de datos atípicos.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de la variable anomalía magnética para los datos de Pedro Heredia Detallado

Estadísticas descriptivas	
Cantidad de datos	1845
Mínimo	-1270,85791
Máximo	1597,17654
Media	47,13477
Mediana	45,79618
Desv. estándar	232,09446
MEDA	19,14775
Kurtosis	21,61958
C.Asimetría	1,93180
C.Variación	4,92406
C.Variación M	0,41811

El histograma muestra que se presenta una asimetría relativa pero pequeña. El diagrama de caja señala la concentración de datos en torno a las medidas de tendencia central y se observa que el rango intercuantílico es pequeño en relación con los bigotes superior e inferior. Adicionalmente, en el diagrama de caja se nota presencia de valores atípicos que no son considerados como tales, teniendo en cuenta el efecto generado por el naufragio sobre las mediciones de campo magnético y, por consiguiente, sobre los valores de la anomalía magnética.

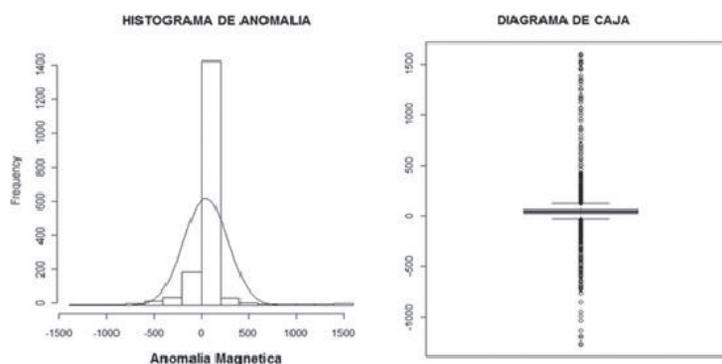


Figura 4. Histograma y diagrama de caja de los valores de anomalía magnética para PHD

Posteriormente se efectuaron las pruebas de normalidad como la de Kolmogorov–Smirnov y Shapiro Wilk, y adicionalmente se realizó el Q-Q Plot, con el *software* R-project, como se muestra a continuación:

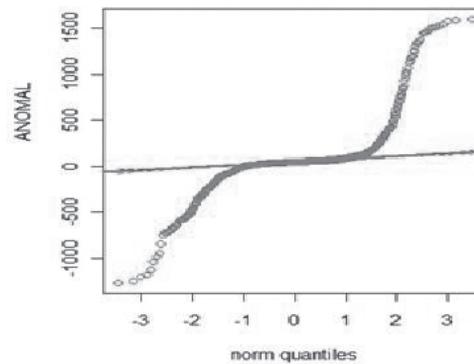


Figura 5. Q-Q Plot de la anomalía magnética

Este gráfico muestra la comparación de cuantiles entre una distribución normal y los cuantiles del grupo de datos. En el caso de que el grupo de datos siguiera una distribución normal los puntos que representan los cuantiles de la muestra se ubicarían dentro del área comprendida entre las bandas de confianza que son paralelas a la línea central que representa la distribución normal, de tal forma que al analizar el gráfico anterior se puede concluir que los datos de anomalía no se distribuyen normalmente.

A los fines de ratificar lo observado en el gráfico se realizaron pruebas de normalidad mencionadas y se obtuvo que trabajando con un nivel de confianza del 95%, e incluso del 90%, el p-valor no permitía la aceptación de la hipótesis nula, es decir, los datos no tienen una distribución de probabilidad normal.

Para intereses propios del proyecto se consideró que la superficie que represente la anomalía magnética de la zona de estudio debe ser generada mediante técnicas estadísticas de predicción, considerando que lo fundamental para su utilización es que la variable de estudio siga una distribución normal, luego fue necesario hacer una anamorfosis gaussiana, que no es más que la obtención de una variable transformada a partir de la variable de estudio, pero que se distribuye normalmente, permitiendo modelar la estructura de correlación espacial de los datos y efectuar la predicción; una

vez hecha la predicción resulta necesario revertir la transformación con el propósito de regresar a los valores de la variable original, que para este estudio, es la anomalía magnética.

Análisis estructural

Luego de la anamorfosis gaussiana, con la que se garantizó que los datos se distribuyen normalmente, se procedió a realizar los análisis sobre su estructura de correlación y si ésta permanece invariante en cualquier dirección (es decir, si el fenómeno es isotrópico). Para dicha evaluación inicialmente se hizo la estimación del semivariograma experimental en diferentes direcciones.

La Figura 6 contiene los semivariogramas experimentales en las direcciones de 0 a 180° en intervalos de 22,5° decimales, donde las direcciones de 0 y 180° presentan la misma tendencia, pero en general se observa que el fenómeno no presenta la misma tendencia en todas las direcciones, luego se concluye que el fenómeno es anisotrópico. Con la finalidad de mitigar los efectos que pueden presentarse sobre la predicción por la condición anisotrópica del fenómeno, se efectuó el siguiente procedimiento para obtener los parámetros de transformación y considerarlos en la estimación del semivariograma:

- Ajuste a sentimiento del semivariograma experimental bajo diferentes modelos teóricos de él, en diversas direcciones. Esto a fin de identificar

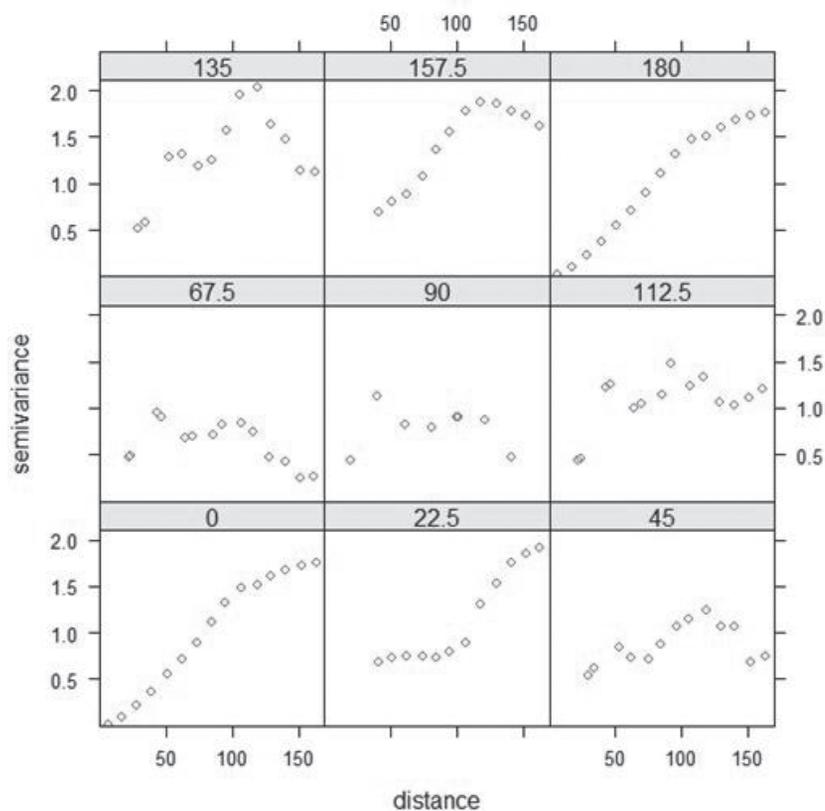


Figura 6. Semivariograma experimental en diferentes direcciones.

Fuente: Procesamiento de datos en el software R-project.

bajo un mismo modelo en qué direcciones se encuentran el rango o alcance máximo y mínimo.

- Cálculo del coeficiente de anisotropía y ángulo entre las direcciones principales.

Las pruebas se hicieron sobre los modelos esférico, exponencial, gaussiano, cúbico, potencial y de efecto hueco, en las direcciones de 0, 45, 90, y 135° decimales. Con los resultados obtenidos

para cada modelo y los valores encontrados para la corrección de anisotropía se procedió a la estimación del semivariograma, por medio de métodos como mínimos cuadrados ordinarios (MCO), ponderados (MCP) y Generalizados (MCG), con el paquete *GSTATS* del *software* R-project; máxima verosimilitud (ML) y máxima verosimilitud restringida (REML), con el paquete *geoR*. A continuación se muestra la tabla resumen con los resultados obtenidos para cada modelo:

Tabla 2. Estimación de los semivariogramas por mínimos cuadrados.

Fuente: Procesamiento de datos en R-Project con el Paquete GSTAT

Modelo	Estimador	Parámetros		
		Meseta	Rango	Efecto Pepita
Esférico	MCP	267195,800	100,939	0,000
	MCG	256770,159	102,077	9546,637
	MCO	264775,100	99,819	0,000
Exponencial	MCP	344064,200	71,690	0,000
	MCG	294771,000	51,845	0,000
	MCO	283595,800	45,968	0,000
Gaussiano	MCP	11000,660	33,761	15,109
	MCG	110039,344	33,794	655,737
	MCO	146645,526	39,405	6903,469

En la tabla anterior se presenta ausencia de la estimación para los modelos cúbico, potencial y efecto hueco, dado que el algoritmo para su cálculo no se encuentra desarrollado dentro del paquete GSTAT. Dicha estimación tampoco revela un indicador sobre el error en dicha estimación, luego la bondad del ajuste de cada modelo será evaluada mediante la validación cruzada.

Para el caso de las estimaciones por máxima verosimilitud (ML) y máxima verosimilitud restringida (REML) se utilizó el paquete geoR, pero tampoco se obtuvo la totalidad de las estimaciones; los modelos gaussiano y efecto hueco resultaron ser sistemas computacionalmente singulares, así que no fue posible obtener los resultados para estos dos métodos. A continuación se ofrecen los resultados derivados de la validación:

Tabla 3. Estimación de los semivariogramas por máxima verosimilitud.

Fuente: Procesamiento de datos en R-Project con el paquete GEO

Modelo	Estimador	Parámetros				AIC
		Meseta	Rango	Efecto Pepita	Kappa	
Esférico	REML	0,6882	119,6	0	-	-1231
	ML	0,6876	119,6	0	-	-1247
Exponencial	REML	3,06	348,6	0	-	-1209
	ML	1,713	195	0	-	-1222
Gaussiano	REML	Sistema singular				
	ML	Sistema singular				
Cúbico	REML	67,72	87,36	0	-	-1899
	ML	67,62	87,33	0	-	-1889

Modelo	Estimador	Parámetros				AIC
Potencial	REML	144,3	8788705	0	0,41	1534
	ML	58	9171635	0	0,41	1358
Efecto Hueco	REML	Sistema singular				
	ML	Sistema singular				

El modelo más indicado para la predicción será aquel cuya validación cruzada arroje el menor error cuadrático medio. En la siguiente tabla se muestran los modelos sobre los cuales se realizó el proceso de validación cruzada y el error medio cuadrático resultante para cada uno de ellos:

Tabla 4. Error medio cuadrático: validación cruzada.
Fuente: Procesamiento de datos en R-Project

Modelo	Estimador	EMC
Esférico	MCP	0,00439997
	MCG	0,00753488
	MCO	0,00439876
	ML	0,00438475
	REML	0,00438475
Exponencial	MCP	0,00438986
	MCG	0,00439636
	MCO	0,00400105
	ML	0,00438361
	REML	0,00438287
Gaussiano	MCP	0,02009253
	MCG	0,01356235
	MCO	0,05885707

De la tabla anterior se observa que el modelo que presenta menor error medio cuadrático es el modelo exponencial estimado por mínimos cuadrados ordinarios.

El objetivo del análisis estructural consiste en la selección del modelo y la técnica apropiada para la

predicción espacial, de tal forma que puede concluirse lo siguiente:

El modelo seleccionado para la predicción es exponencial con efecto pepita igual a 0, meseta de 283595,8 y rango de 45,968. La técnica de predicción espacial seleccionada es *kriging* ordinario, dado que se satisface que el fenómeno es estacionario pero su media es desconocida.

Predicción

Con el modelo de semivarianza obtenido mediante el análisis estructural de los datos, se realizó con la función “krige” del paquete *GSTAT* en el *software* R-project la predicción de la anomalía para los puntos no muestreados. Es importante resaltar que una vez hecha la predicción es de gran importancia revertir cualquier tipo de transformación con la finalidad de que los productos cartográficos y el análisis derivado de ellos, correspondan al fenómeno de estudio, que para este caso es la anomalía magnética.

Este grupo de datos contenía un total de 1.845 puntos muestreados y a partir de ellos se generó un total de 8.233 puntos predichos, de tal forma que el nivel de información se aumentó al 400% aproximadamente. El nivel de confianza empleado para todos los procesamientos estadísticos fue del 95%.

El análisis geoestadístico se aplicó de manera similar sobre los datos del área Pedro Heredia General, y los productos cartográficos obtenidos fueron los siguientes:

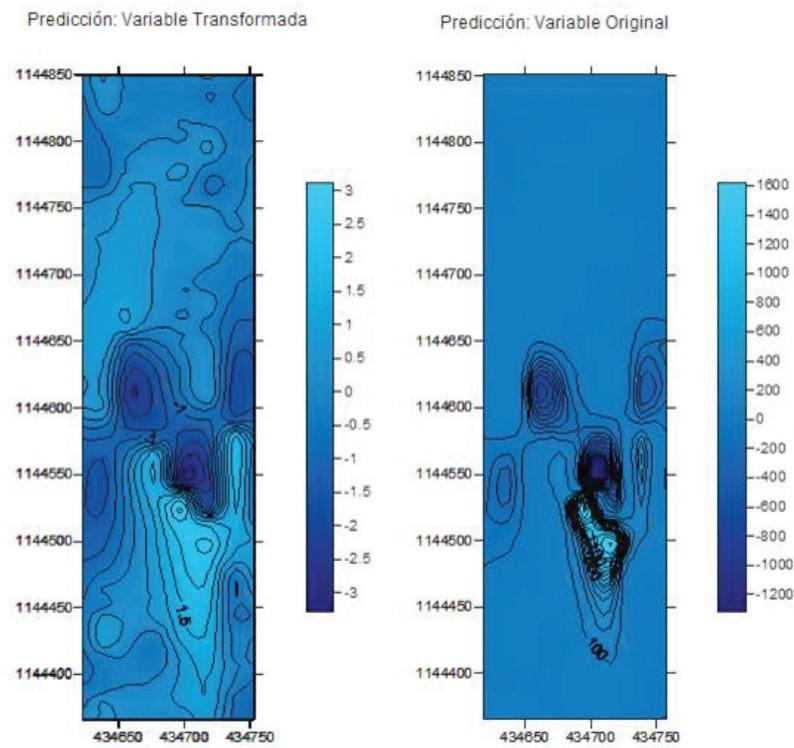


Figura 7. Predicción de la anomalía magnética para el área de Pedro Heredia Detallado.

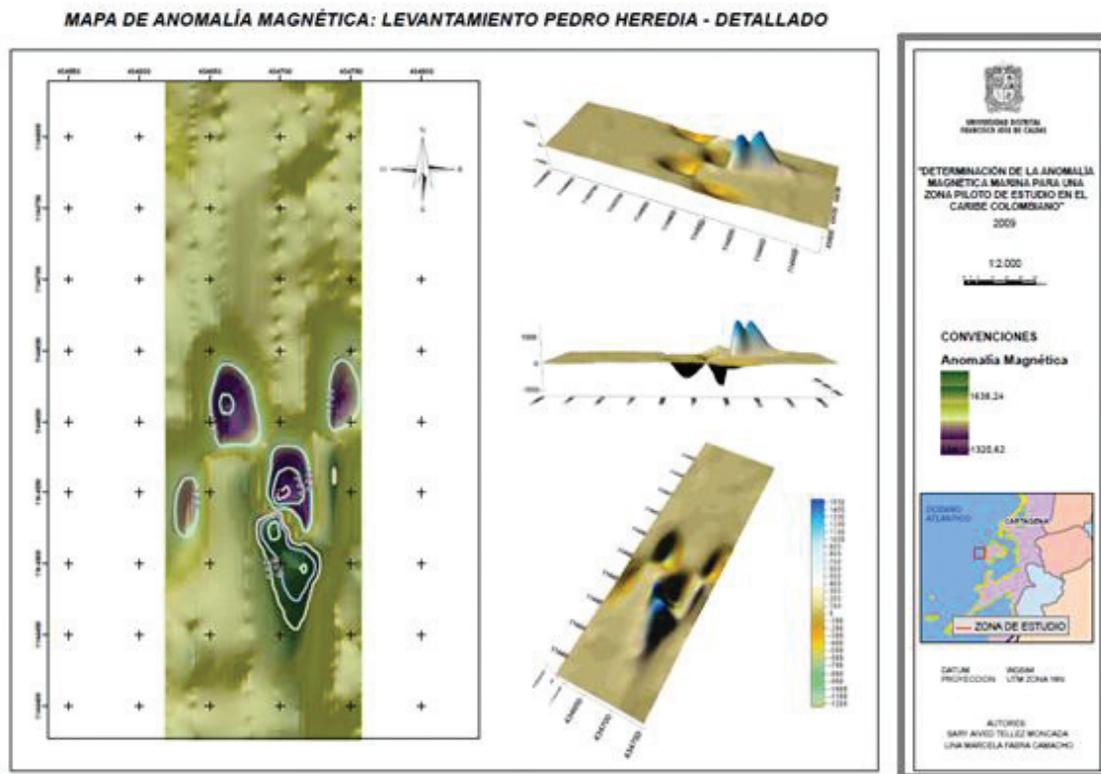


Figura 8. Vista en miniatura del mapa de anomalía magnética del levantamiento Pedro Heredia Detallado a escala 1:2000.

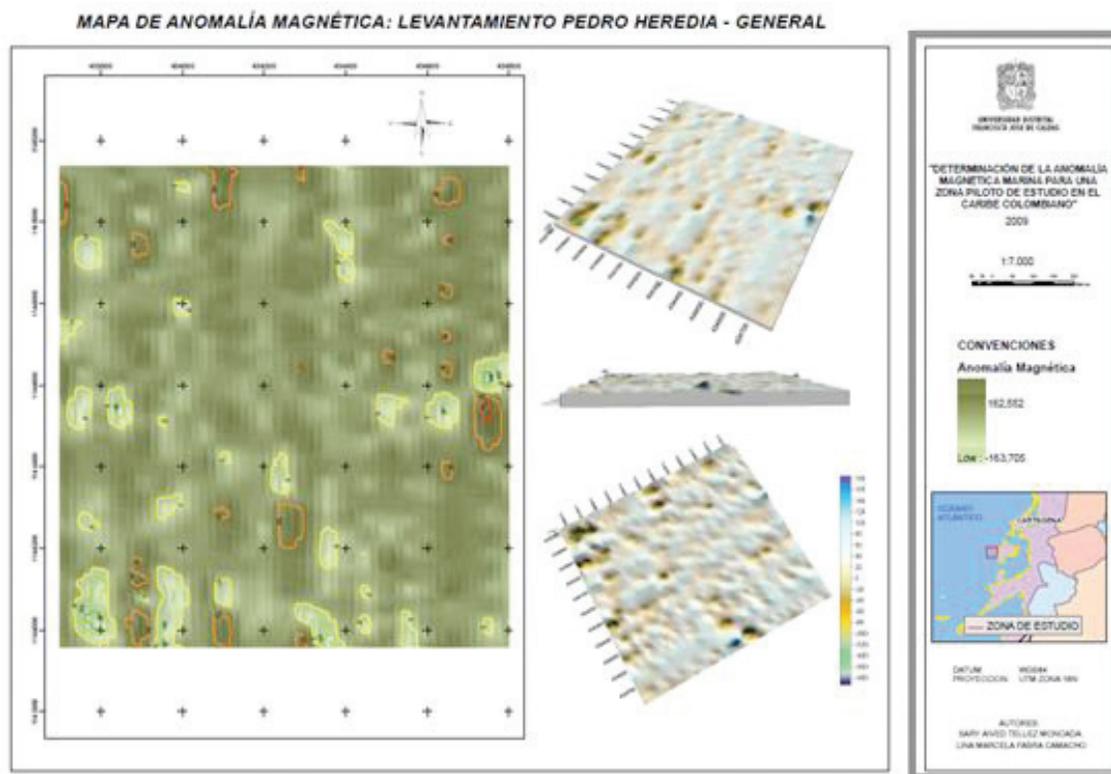


Figura 9. Vista en miniatura del mapa de anomalía magnética del levantamiento Pedro Heredia General a escala 1:7000.

Conclusiones

La anomalía magnética generada por el buque ARC Pedro Heredia varía entre -195 y 192 nT a nivel general y entre -1270 y 1597 nT a nivel detallado, siendo notable la diferencia percibida en las dos escalas, y se intuye que dicha diferencia es producto de la geometría de muestreo, es decir, en el levantamiento de escala general el magnetómetro no pasó por las zonas de mayor variación del campo magnético, mientras que en la densificación de dicho muestreo, esto es, en el levantamiento detallado, la geometría de muestreo permitió que el magnetómetro pasara tomando datos por la zona de mayor variación del campo magnético.

La transformación de coordenadas es un aspecto fundamental a considerarse dentro del análisis estadístico de los datos, dado que las técnicas de predicción estadísticas hacen uso de la distancia para el cálculo de la semivarianza ente dos puntos y para el proceso de predicción, de tal forma que las coordenadas para trabajar el análisis estadístico

por ningún motivo deberán ser coordenadas expresadas que expresen medidas angulares; por el contrario, deben ser coordenadas planas.

El modelo de semivarianza que presentó el mejor ajuste fue el exponencial con efecto pepita igual a 0, meseta de $283595,8$ y rango de $45,968$. Dicho modelo se estimó por mínimos cuadrados ordinarios y el error medio cuadrático resultante de la validación cruzada fue de $0,00400105$. Con dicho modelo, y con las características propias del fenómeno se decidió que la predicción espacial se debía efectuar por medio del *kriging* ordinario.

La predicción espacial se realizó sobre la variable transformada, que cumplió con el supuesto de estacionariedad y fue producto de la anamorfosis gaussiana sobre los datos de anomalía magnética, de tal forma que luego de la predicción resultó necesario revertir la transformación sobre los puntos muestreados y de predicción con el propósito de hacer los análisis sobre la variable de anomalía y no sobre la variable transformada.

Agradecimientos

A la tripulación de la fragata ARC Providencia del proyecto de investigación. Al ingeniero electrónico Darlin Lizcano por su valiosa colaboración en el trabajo de campo y por su capacitación y asesoría en el manejo del magnetómetro marino. A Dimar y la colaboración del capitán Juan Carlos

Acosta y el jefe José Arturo Arias. Al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas -CIOH-. Al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Al Centro de Relaciones Interinstitucionales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Bibliografía

- Montenegro, Isabel Blanco.** *Análisis e interpretación de las anomalías magnéticas de tres calderas volcánicas: Decepción, Furnas y las Cañadas del Teide.* Madrid, Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense, 1998.
- Briceño L. A.; Rey C.; Hernández O. and Zamora J. A.** (eds.). "New Magnetic Anomalies Map of Colombia". *Earth Sciences Research Journal*, vol. 12, Special Edition, pp. 7-12.
- Carrera Ramírez, Jesús; Samper Calvete, Javier.** *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrogeología subterránea.* Barcelona, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1990.
- Fabra Camacho, Lina; Téllez Moncada, Sary.** *Determinación de la anomalía magnética marina para una zona piloto de estudio en el Caribe Colombiano.* Bogotá, Tesis de Pregado en Ingeniería Catastral y Geodesia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2009.
- Boyce, J., Reinhardt, E.; Raban, A.; Pozza M.** "Marine Magnetic Survey of a Submerged Roman Harbour, Caesarea Maritima, Israel". En: *The International Journal of Nautical Archaeology*, 33.1: 122–136, 2004.
- Gomes, F. & Sandoval, J.** *Estudio geofísico integrado en la zona Yumare - Aroa, Estados Yaracuy y Falcón.* Tesis de pregado en Ingeniería Geofísica. Caracas, Universidad Central de Venezuela, 2008, 220 p.
- Larson, T. & Norris, T.** *Champaign Magnetometer survey for buried steamboats near the mouth of the missouri river.* Illinois State Geological Survey, IL US and Army Corps of Engineers, 2007.
- Lertxundi, A.** *Métodos de estadística espacial para evaluar la influencia de factores medio ambientales sobre la incidencia y mortalidad por cáncer.* España, Universidad de Girona, 2006.
- Mandea, M. and Macmillan, S.** "International Geomagnetic Reference Field—the eighth generation". En: *Earth Planets Space*, 52:1119–1124, 2000.
- Rodríguez. D. M.** *Modelo de la falla de Soapaga a partir de la correlación espectral de campos potenciales.* (Tesis Maestría en Ciencias – Geofísica). Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2008, 135 p.

SARYTÉLLEZ MONCADA. Colombiana. Ingeniera Catastral y Geodesta. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. tellez.sary@gmail.com

JAVIER FUENTES LÓPEZ. Colombiano. Economista Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja UPTC. Magister en Economía Universidad Nacional de Colombia. Docente de planta en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería. hjfuentesl@udistrital.edu.co

LINA MARCELA FABRA CAMACHO. Colombiana. Ingeniera Catastral y Geodesta Universidad Distrital Francisco José de Caldas. lina.fabra@gmail.com