

MAPA DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS DE VENEZUELA DERIVADO DE DATOS SATELITALES

NURIS ORIHUELA GUEVARA¹, ANDREÍNA GARCÍA², YANETH GARZÓN¹, JAVIER GONZÁLEZ¹, TEREPAIMA TABARE²

¹Universidad Central de Venezuela. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. e-mail: nurisorihuela@gmail.com

²Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales. MPPCTII. e-mail: andreina_garcia@hotmail.com

Recibido: enero de 2010

Recibido en forma final revisado: marzo de 2011

RESUMEN

Se presenta un mapa a escala 1:2.000.000 de la anomalía magnética de campo total en Venezuela, proyectada a cuatro mil (4000) metros de altura sobre el nivel medio del mar, en la ventana geográfica 0° a 13° de latitud Norte y 58° a 74° de longitud Oeste. La base de datos utilizada cuenta con 188.072 puntos de muestreo con un espaciamiento de 1,9' (3,7 km). Los valores de campo magnético se calcularon usando el modelo combinado EMAG2 el cual se desarrolló a partir de datos satelitales de la misión CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), así como de datos terrestres y marinos de la Red Mundial. La comparación estadística del modelo combinado con el levantamiento aeromagnético de Venezuela sobre 2187 estaciones permite establecer su confiabilidad. El trabajo presenta una revisión general de las anomalías magnéticas de las principales provincias geológicas de la geografía nacional y clasifica magnéticamente a nuestro territorio en tres grandes franjas dominadas por anomalías positivas al Norte, negativas en el segmento intermedio y compuestas al sur de nuestro territorio.

Palabras clave: Anomalía magnética, Modelo combinado, Geología, Satélite.

MAP OF MAGNETIC ANOMALIES OF VENEZUELA DERIVED FROM SATELLITE DATA

ABSTRACT

We present a map at 1:2.000.000 scale from the total field magnetic anomaly in Venezuela, projected to four thousand (4,000) meters above mean sea level in the geographic window from 0° to 13° North latitude and 58° to 74° West longitude. The database used has 188.072 sampling points with spacing of 1.9' (3.7 km). The magnetic field values were calculated using the combined model EMAG2 which developed from satellite data from the CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) mission as well as terrestrial and marine data from the global network, the statistical comparison of the combined model with the aeromagnetic survey of Venezuela on 2187 stations allows establishing its reliability. The paper presents an overview of the magnetic anomalies of the main geological provinces of Venezuela geography and it classified our territory magnetically into three broad bands north dominated by positive anomalies, negative in the intermediate segment and composite anomalies in the south of Venezuela territory.

Keywords: Magnetic anomaly, Combined model, Topography, Geology, Satellite.

INTRODUCCIÓN

Estudios geomagnéticos se han desarrollado en Venezuela desde principios del Siglo XX. Durante la década de los años treinta y a comienzo de los años cincuenta, se realizaron vuelos aeromagnéticos en las cuencas sedimentarias destinados a la exploración de hidrocarburos. A finales de los años cincuenta, se desarrollan estudios aeromagnéticos al norte del estado Bolívar, entre los años 1973 y 1975 se ejecutan estudios similares en el hoy Estado Amazonas, en

ambos casos los objetivos fueron geológico-mineros. Durante el año 1976 se realiza el levantamiento aeromagnético de la Sierra de Perijá y entre los años 1981 y 1982 se contratan vuelos aeromagnéticos para cubrir todas las cuencas sedimentarias y parte de la región costa afuera. Producto de la integración de esta información se publica en el mapa aeromagnético de Venezuela a escala 1:500.000, el cual cubre la totalidad de las cuencas con potencial petrolífero identificadas para la fecha del estudio. Este mapa fue compilado y publicado por Corpoven en 1989.

Las publicaciones previas que involucran la compilación de mapas de anomalías magnéticas en Venezuela, se asocian en la mayoría de los casos a tesis de grado de la Universidad Simón Bolívar (González, 2006) y de la Universidad Central de Venezuela (Adrián, 2004; Azuaje, 2004; Díaz, 2004; Escorihuela, 2004; Lozano, 2004; Pérez, 2004; Vargas, 2004; Morgado, 2005) en este último caso la totalidad de los trabajos citados son integrados y publicados en Rodríguez *et al.* 2006.

Existen publicaciones que soportan parcialmente las interpretaciones relacionadas con el basamento de las cuencas sedimentarias venezolanas en mapas magnéticos (Feo-Coccedo *et al.* 1984) razón fundamental de los vuelos aeromagnéticos promovidos por la industria petrolera venezolana (Meneven, 1983) y trabajos destinados al análisis de las provincias magnéticas venezolanas (Bonini, 1984).

En este trabajo, como complemento de los estudios existentes, se presenta el mapa de anomalías magnéticas derivado de datos satelitales (Modelo de Anomalía Magnética EMAG2) lo que permite disponer de una malla regular de medidas de campo magnético terrestre aspecto que representa la condición necesaria para generar mapas capaces de representar el comportamiento de las variaciones de magnetización del subsuelo con elevada estabilidad espacial.

El mapa presentado, al reflejar contornos isoanómalos a 4.000 m de altura, nos permite realizar interpretaciones geológicas del subsuelo de nuestro territorio sin perturbación derivada de ruidos culturales o rasgos geológicos superficiales.

MODELO GEOMAGNÉTICO

El Earth Magnetic Anomaly Grid EMAG2 (Maus *et al.* 2009) es un modelo combinado que se genera a partir de mediciones compiladas de satélites, adquisiciones aéreas y marinas. La resolución de este modelo es de 2 arco minuto y fue reducido a 4 km por encima del geode.

La secuencia seguida para la obtención del modelo EMAG2 fue la siguiente:

1- Combinación de los mallado a 4 km de altitud por encima del geode a través del método de mínimos cuadrados. Ésta se realizó con la malla preexistente en áreas continentales, y la resolución fue de 1 minuto de arco a una altura de 4 km por encima del geode.

2- Procesamiento de las mediciones marinas y aéreas. Las mediciones sobre los océanos provienen principalmente de 3 fuentes: archivos de información marina provenientes

del Geophysical Data System (GEODAS) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); de la información marina y aeromagnética adquirida en el año 2001 para la edición del Antarctic Digital Magnetic Anomaly Project (Golynsky *et al.* 2001) y la información aérea obtenida a partir del Project Magnet del Naval Research Lab (NRL).

3- Combinación de la información satelital con la malla a 4 km de altitud, generado por el método de mínimos cuadrados con una función de correlación anisotrópica sobre los océanos, con el modelo de campo magnético MF6 generado a partir de mediciones de la misión satelital CHAMP.

ANOMALÍA MAGNÉTICA DE CAMPO TOTAL Y PROVINCIAS GEOLÓGICAS

En la figura 1 se presenta el mapa de anomalía magnética de campo total de Venezuela, tomando como base de cálculo la anomalía magnética previamente descrita. La ventana geográfica en estudio 0° a 13° de latitud Norte y 58° a 74° de longitud Oeste, representa un área de 2.562.768 km². Dentro de la misma se proyectaron 188.072 valores de anomalía magnética con un espaciamiento de 1,9' (3,7 km) a 4.000 m de altura sobre el nivel del mar, cubriendo la totalidad del territorio venezolano así como parte de países vecinos. Las anomalías magnéticas se expresan como rasgos compuestos que asocian altos y bajos magnéticos que se complementan positiva o negativamente en función de los contrastes laterales de susceptibilidad magnética y de la posición relativa de los cuerpos respecto a la orientación del vector campo total en el área de estudio.

Sistema insular: El sistema insular se caracteriza por la presencia de anomalías magnéticas en el intervalo de -132 a 175 nT. La orientación preferencial de los contornos, permite la asociación de los bajos y altos observados, a la respuesta magnética del basamento de las Antillas holandesas y venezolanas y al arco de las Antillas Menores, respectivamente. A partir de esta observación, se tiene que el rumbo preferencial de la respuesta magnética del basamento de las Antillas de Venezuela es de N80°O y la respuesta magnética del basamento del arco de las Antillas Menores tiene orientación preferencial N29°E.

Se observa la presencia de altos de anomalías de campo magnético total ubicados al sur de la plataforma de las Antillas venezolanas y holandesas dentro del rango de 175 a -64 nT. Al norte de las mismas destacan anomalías negativas, dentro del rango de -132 nT a -64 nT.

Resulta de interés la anomalía ubicada al norte de las islas las Aves y el Archipiélago Los Roques, cuyos valores están

en el rango de -130 nT a -35 nT, con rumbo preferencial N78°O el cual es sub paralelo al Alto de Curazao. El centro de esta anomalía está levemente desplazado hacia el sur con respecto al eje principal del Alto de Curazao.

En la Península de Paraguaná, se observa un bajo de anomalías magnéticas de orientación preferencial N80°E con valores entre -10 y 7 nT, el cual se prolonga del oeste hasta el sistema de fallas de Urumaco; con un alto subparalelo al sur del mismo en el rango de 86 a 52 nT.

Sistemas montañosos: La Cordillera de la Costa se caracteriza por la presencia de valores de anomalía en el intervalo de -22 nT a 36 nT, con orientación preferencial N94°W. La Serranía del Interior se distingue por tener contornos magnéticos en el orden de -3 a 34 nT, con orientación preferencial Este-Oeste. Sobre el área de la Fosa de Cariaco, se observan anomalías en el intervalo de 18 a 28 nT. Destaca un bajo de anomalía magnética ubicado entre los meridianos 65,5° y 66,5° oeste y entre los paralelos 10° y 10,5°; con un rango entre -49 y -29 nT, y una orientación preferencial de N72°O, y un alto asociado al sur, con valores en el rango de 11 nT y -6 nT.

El límite sur de la Península de Araya está muy bien delimitado, los contornos de anomalías tienen dirección preferencial Este-Oeste, su intervalo está entre 49 nT a 60 nT y sigue la orientación preferencial del sistema de fallas de El Pilar. La parte este de la fosa de Cariaco se distingue por ser un alto magnético en el área de la Península de Araya, la longitud de este alto es de aproximadamente 40 km y sus valores están en el rango de 18 a 28 nT.

Por limitaciones de la fuente original de datos utilizada para la generación del mapa presentado en la figura 1, no se dispone de suficiente información para extender el análisis de anomalías magnéticas a la región del sistema montañoso andino.

Cratón de Guayana: Entre los paralelos 4° y 6° de latitud norte y los meridianos 61° y 64° de longitud oeste, no se dispone de datos magnéticos. La respuesta magnética del Cratón es principalmente positiva. A lo largo del curso del río Orinoco, se distingue un corredor magnético, con una dirección preferencial N59°E, y cuyos valores oscilan entre -371 nT y -56 nT, representando la zona de bajos de anomalías magnéticas más relevante y extensa del territorio venezolano. La misma se extiende desde el oeste del río Caura, hasta el Delta del Orinoco costa afuera y se asocia, al sur, con una zona de altos, en el intervalo de 16 nT y 319 nT, esta anomalía compuesta se asocia al contacto entre la Provincia de Imataca y el Complejo Supamo.

En el estado Amazonas se distingue una alineación de altos magnéticos en el rango de -6 nT y 125 nT, presentados como cuerpos aislados, cuya alineación tiene una orientación preferencial N-S, la cual produce una forma cóncava hacia el Este, y que podría ser de interés para la exploración minera de nuestro país.

Llanos Centrales: En las Cuenca Barinas-Apure y Oriental, se observa una alineación de bajos de anomalías magnéticas en dirección N70°E con valores en el rango de -56 nT y -155 nT. Esta zona constituye una franja de anomalías magnéticas de gran relevancia que divide el territorio en sentido NE-SW. Esta alineación principal de mínimos de anomalías magnéticas se extiende desde los Andes Colombianos al Sur, hasta el Delta del Orinoco, al Este; y sin duda alguna, constituye uno de los rasgos más importantes de la respuesta magnética del subsuelo presente en el territorio venezolano.

La respuesta magnética del Alto del Baúl, se puede asociar a dos anomalías positivas, sub paralelas seccionadas por el bajo magnético de carácter regional descrito en el párrafo anterior. Estas anomalías se ubican entre los meridianos 65.5° y 67.5° oeste y los paralelos 8° y 9° norte, con un rango anómalo entre 0 nT y 95 nT, con orientación preferencial N70°E y el segundo, ubicado entre los meridianos 64.5° y 66° oeste y los paralelos 7.5° y 8.5° norte, el cual está en el rango de 0 nT a 53 nT, con una orientación preferencial aproximada de N67°E. En la siguiente tabla (ver tabla 1) se presentan las anomalías magnéticas en diversas localidades de nuestro territorio ubicadas sobre las provincias fisiográficas conocidas. Las localidades seleccionadas se consideran representativas de las provincias en cada caso, pues no se intenta ser exhaustivo dado que el producto principal de este trabajo se concentra en el mapa de anomalías magnéticas de Venezuela (Figura 1).

Tabla 1. Anomalía magnética por localidad referencial en las provincias fisiográficas en Venezuela

Provincia	Loc. Ref.	Latitud (°)	Longitud (°)	AM* (nT)
Sistema Insular				
Isla ⁽¹⁾	Los Monjes	12,33	-71,53	-69
Isla ⁽²⁾	Las Aves	12,03	-67,70	16
Isla ⁽³⁾	Los Roques	11,80	-66,60	70
Isla ⁽⁴⁾	La Orchila	11,80	-66,17	9
Isla ⁽⁵⁾	La Blanquilla	11,80	-64,47	49
Isla ⁽⁶⁾	La Tortuga	10,90	-65,33	31
Isla ⁽⁷⁾	Margarita	11,00	-63,93	51
Isla ⁽⁸⁾	Los Testigos	11,27	-63,57	19
Escudo Guayanés				
Penillanura del norte ⁽⁹⁾	Ciudad Piar	7,50	-63,30	-307
Penillanura del Casiqu. ⁽¹⁰⁾	Curamoni	2,60	-66,20	-34
Tepuy ⁽¹¹⁾	Chimatá-tepui	5,30	-62,07	-9
Sistemas Montaños				
Sistema Andino ⁽¹²⁾	Pico Bolívar	8,53	-71,03	-2
⁽¹³⁾	Perijá	10,13	-72,83	-5
Cordillera de la Costa ⁽¹⁴⁾	Macizo Ávila	10,53	-66,80	30
⁽¹⁵⁾	Caracas	10,57	-66,47	4
Serranía del Interior (orient) ⁽¹⁶⁾	Las Piedras	10,20	-63,60	15
Llanos				
Occid. ⁽¹⁷⁾	El Yagual	7,50	-68,47	-121
Centr. ⁽¹⁸⁾	Las Mercedes	9,13	-66,43	-55
Orient. ⁽¹⁹⁾	Aguasay	9,43	-63,70	-85
Lago de Maracaibo ⁽²⁰⁾	Bachaquero	9,90	-71,06	-47
Delta del río Orinoco ⁽²¹⁾	Tucupita	9,13	-62,06	-137

*AM: anomalías magnéticas

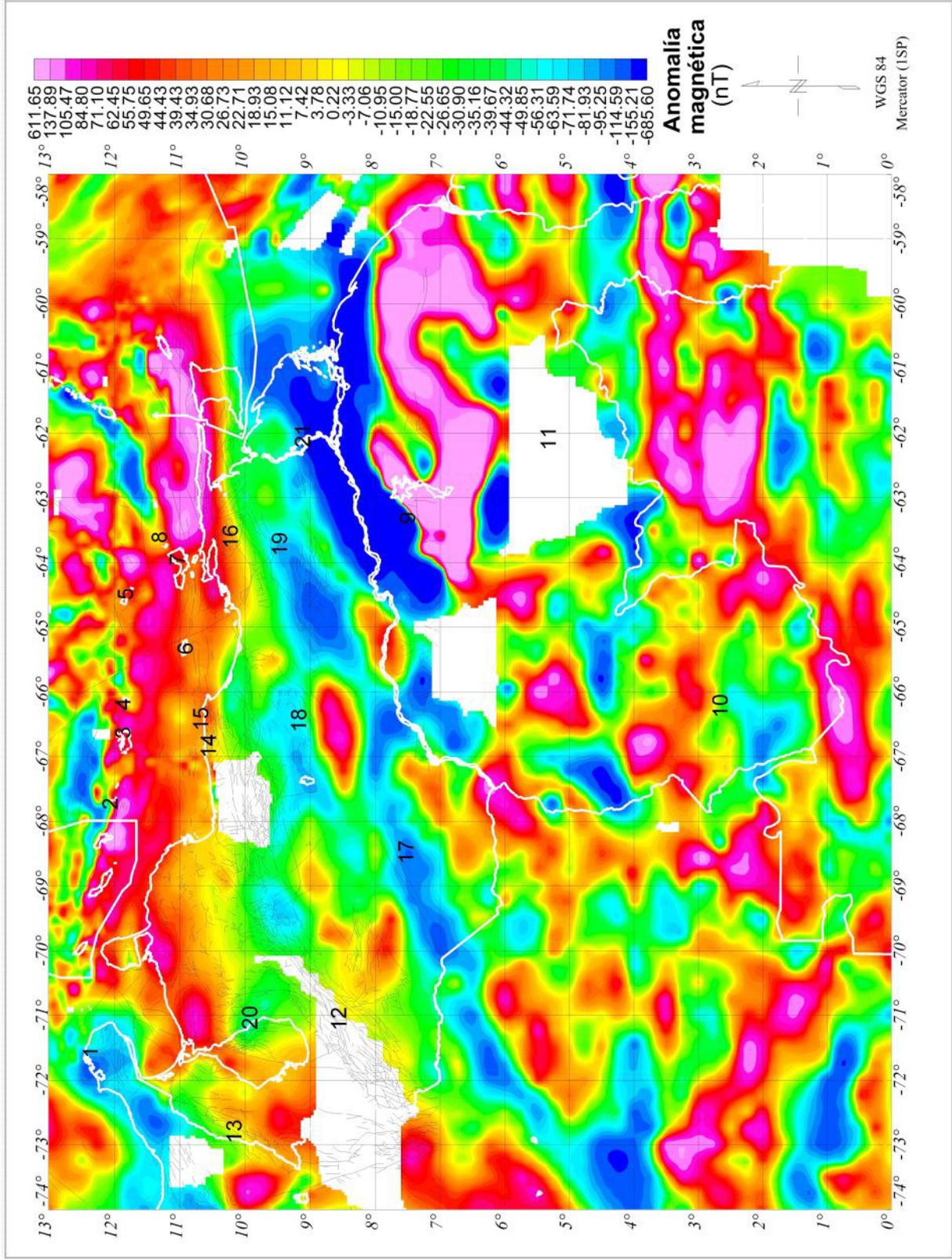


Figura 1. Mapa de anomalías magnéticas satelitales de Venezuela (Fuente: mapa base de fallas: USGS, 2004)

ANOMALÍAS MAGNÉTICAS SATELITALES VS. ANOMALÍAS AEROMAGNÉTICAS

Con el objeto de evaluar la consistencia entre los datos aeromagnéticos y los datos satelitales se realizó un análisis comparativo en la ventana geográfica 7°30' a 9°15' de latitud norte y 66°30' a 68°00' de longitud oeste, franja localizada al sur del estado Guárico y en el extremo oriental de los estados Barinas y Apure. Dentro de esta ventana se localizan 54.381 estaciones aeromagnéticas levantadas por la empresa Hunting Survey Geology and Geophysics Ltd (Meneven, 1983) a una altura de vuelo de 500 m sobre el nivel del mar.

En la base de datos satelitales, se identifican 2.187 estaciones con localización geográfica coincidente con la base aeromagnética, representando estas estaciones los puntos de muestreo que soportan el análisis comparativo de las bases de datos. Para ello se estimó un modelo lineal cuyos parámetros se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Modelo lineal planteado para comparar anomalías magnéticas aéreas y satelitales

R ²	0,743	Estim	Des. Est. Error	Valor t	Pr (> t)
C(*)	interc.	-4575	57,05	-76,05	<2e-16
	AM(*) aérea	0,46	0,00585	79,47	<2e-16
R(*)	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-87,71	-15,06	-0,50	13,54	94,65

(*) C: Coeficientes, R: Residuales, AM: Anomalías magnéticas

La representación gráfica del modelo planteado se presenta en la figura 2, la cual corresponde al gráfico cruzado entre anomalía magnética aérea y satelital, adicionalmente se agrega una línea de tendencia que muestra la buena correlación encontrada. Se debe destacar que la base de datos y mapas correspondientes a levantamientos aéreos cuentan con una constante sumada a los valores de campo de 10000.

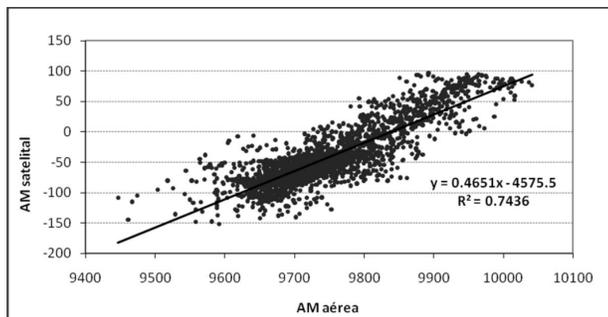


Figura 2. Anomalía magnética aérea vs. anomalía magnética satelital

Como instrumento comparativo adicional se presenta la superposición de los mapas, aéreo y satelital, en la ventana de comparación estadística (Figura 3) incorporando un segmento adicional en sentido este del mapa satelital para evaluar la continuidad de las tendencias magnéticas en la dirección dominante en la región. Esta superposición resalta la consistencia de tendencias de contornos isoanómalos en ambos mapas.

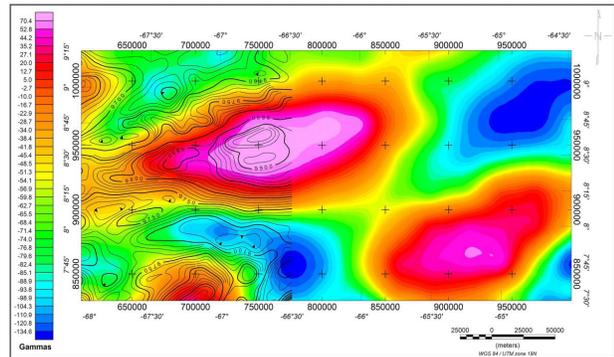


Figura 3. Mapas de anomalías aéreas y satelitales superpuestos

(Los contornos isoanómalos al fondo representan las anomalías magnéticas satelitales, mientras que los contornos isoanómalos representados con líneas de color negro representan las anomalías magnéticas aéreas)

CONCLUSIONES

El mapa de anomalías magnéticas a escala 1:2.000.000 es una herramienta de trabajo para todo investigador dedicado a la caracterización del subsuelo profundo de nuestro territorio. La posibilidad de contar con una malla de datos de disposición regular, garantiza la estabilidad espacial que antecede al cartografiado y con ello aumenta la confianza en la interpretación geológica de las diversas provincias presentes en nuestro país.

Se puede dividir magnéticamente nuestro territorio en tres grandes franjas, la primera vinculada con el Sistema Montañoso del Caribe y la plataforma continental, dominada por altos magnéticos propios de los contrastes asociados con la presencia de rocas ígneas y metamórficas en afloramiento o a poca profundidad en el subsuelo de la región.

La segunda zona se extiende de los piedemonte hasta las cuencas de nuestro territorio donde dominan anomalías magnéticas negativas destacando el corredor magnético regional que se prolonga desde los llanos colombianos hasta la Cuenca Oriental de Venezuela.

La tercera, asociada al Cratón de Guayana y a la franja sur de la cuenca Barinas-Apure que se caracteriza por anoma-

lías magnéticas compuestas, que se prolongan en los llanos colombianos y que se encuentran limitadas al norte por el corredor regional de anomalías negativas en la zona central de las tres descritas en estas conclusiones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen las facilidades para la utilización de bases de datos del ICGEM y la NOAA y el apoyo brindado por Franz Barthelmes y Stefan Maus.

REFERENCIAS

- ADRIÁN, N. (2004). *Estudio aeromagnético del Escudo de Guayana en la zona El Manteco, norte del Estado Bolívar*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 132.
- AZUAJE, R. (2004). *Estudio aeromagnético de la zona de Cupacuy, norte del Estado Bolívar*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 129.
- BONINI, W. (1984). *Magnetic provinces in western Venezuela. The Caribbean American Plate Boundary and Regional Tectonics*, Memoria 162, Geol. Soc. Am. Mem., pp. 161-173.
- CORPOVEN. (1989). *Mapa de anomalías magnéticas de Venezuela. Escala 1:500.000, 24 hojas en proyección cónica conforme de Lambert*.
- DÍAZ, A. (2004). *Estudio geofísico integrado del sur-oriente del país, San Rafael de Imataca, Estado Bolívar*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 98 p.
- ESCORIHUELA, N. (2004). *Interpretación de datos aeromagnéticos con fines de exploración minera en la zona San Rafael-El Callao Escudo de Guayana, Estado Bolívar*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 109.
- FEO-CODECIDO, G., SMITH, F., ABOUD, N., DI GIACOMO, E. (1984). *Basament and Paleozoic rock of the Venezuelan Llanos basins*. The Caribbean American Plate Boundary and Regional Tectonics. Memoria 162, Geol. Soc. Am. Mem., pp. 175-187.
- GOLYNSKY, A., MASOLOV, V., JOKAT, W. (2001). *Magnetic Anomaly Map of the Weddell Sea Region: A new compilation based on Russian data*. Polarforschung, 67 (3), pp. 125-132.
- GONZÁLEZ, W. (2006). *Compilación de datos magnéticos en el norte de Venezuela y el Caribe y un estudio de prueba en el graben de Espino*. Trabajo especial de grado, Universidad Simón Bolívar, p. 155.
- LOZANO, L. (2004). *Interpretación de datos aeromagnéticos confines de exploración minera en la zona circundante al Río Antabare. Estado Bolívar*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 99.
- MAUS, S., BARCKHAUSEN, U., BERKENBOSCH, H., BOURNAS, N., BROZENA, J., CHILDERS, V., DOSTALER, F., FAIRHEAD, J., FINN, C., VON FRESE, R., GAINA, C., GOLYNSKY, S., KUCKS, R., LÜHR, H., MILLIGAN, P., MOGREN, S., MÜLLER, R., OLESEN, O., PILKINGTON, M., SALTUS, R., SCHRECKENBERGER, B., THÉBAULT, E., CARATORI, Y. (2009). *EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine measurements*. J. Geophys. Res., Estados Unidos, DOI: 10.1029, p. 30.
- MENEVEN. (1983). *Informe inédito para CORPOVEN: Aeromagnetic Survey 1981-1982, Contract CAR-62*. Canadá, GEOTERREX LTD, p. 120.
- MORGADO, L. (2004). *Análisis geofísico en la región Guri al nordeste del Estado Bolívar, Venezuela*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p.168.
- PÉREZ, M. (2004). *Análisis geofísico integrado en la región de Guarento al noreste del Estado Bolívar*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 111.
- RODRÍGUEZ, I., GRANDE, S., ADRIÁN N., AZUAJE, R., DÍAZ, A., ESCORIHUELA, N., LOZANO, L., MORGADO, L., PÉREZ, M., VARGAS, E. (2006). *Modelaje cortical del Escudo de Guayana, Venezuela, con base en datos gravimétricos y magnéticos*. En: Backbone of the Americas-Patagonia to Alaska, 3 al 7 abril, Geol. Soc. Am.
- VARGAS, E. (2004). *Análisis integrado de datos geofísicos con fines de prospección minera de la región noreste del Estado Bolívar*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 129.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2004). *Faults of the Caribbean region*. Central Energy Resources Team. Denver. Colorado. Recuperado el 02 de mayo de 2009 de <http://certmapper.cr.usgs.gov/data/we/ofr97470k/spatial/shape/flt6bg.zip>