

ANOMALÍAS MAGNETICAS BANDEADAS DE LA PLACA CARIBE

Nuris Orihuela Guevara *, Andreina Garcia, Mariano Arnaiz

Resumen. El origen y la evolución de la placa Caribe han sido objeto de múltiples y variados estudios sin que, hasta la fecha, exista una propuesta de aceptación generalizada. Un elemento fundamental en este campo de la investigación es el establecimiento de las características de la corteza oceánica presente en el subsuelo de la placa, dado que permitiría identificar las condiciones de origen, el período geológico de su formación y su posible localización geográfica para esta primera etapa de su evolución.

Los resultados de esta investigación nos permiten afirmar que una fracción importante de las conclusiones de los trabajos previos están en plena vigencia: la orientación del bandeo magnético en la Cuenca de Venezuela y la existencia de un conjunto de bandas de orientación preferencial oeste-este paralelas a las Antillas de Sotavento y norte-sur paralelas al Elevado de Aves. La respuesta magnética de la sección triangular al sureste de la Cuenca de Venezuela, representa la zona quieta Cretácica (CMQZ: Cretaceous Magnetic Quiet Zone) por lo cual exhibe una importante atenuación de la componente bandeada de la anomalía magnética, lo que permite afirmar que la totalidad del subsuelo del Caribe Oriental cuenta con material cortical oceánico bandeado.

En relación con el intervalo de esparcimiento registrado en las bandas magnéticas del Caribe, esta investigación propone el intervalo comprendido entre los cronos M23 y M0 y parte de CMQZ. Las longitudes de onda asociadas con las anomalías identificadas orientan a pensar que la dorsal relacionada con la formación de la corteza oceánica Caribe fue una dorsal de esparcimiento lento, la dorsal Centro Atlántica.

La secuencia de cronos del interior de placa Caribe tiene una orientación NE-SO, y reflejan dos ciclos de rotación horaria. Los cambios de atributos en la dirección paralela a los cronos revelan la presencia de dos fallas transformantes en el subsuelo de la región. La relación propuesta con la Cresta Centro Atlántica lleva a identificar las fallas transformantes como la prolongación en el interior del Caribe de la falla de Vema y la falla de Doldums.

Palabras clave: Anomalía bandeada, Crono, Cresta centro Atlántica, CMQZ, Placa Caribe.

Extended Abstract. Despite the many different studies on the origin and evolution of the Caribbean Plate, no proposal has been widely accepted so far. A key element within this field of research is the characterization of the oceanic crust in the plate subsurface, as it would clarify the conditions in which it originated, the geological period when it formed, and its possible geographical location at this first evolution stage.

Based on partial results of this research, we can say that the conclusions of previous studies are currently valid to a great extent, namely the NE-SW orientation of the striped magnetic anomalies in Beata and Aves rise, the Venezuelan and Colombian basin's and the existence of preferentially W-E oriented stripes parallel to the Leeward Antilles (Figure 1). The magnetic response of the triangular section in the southeast of the Venezuelan Basin represents CMQZ (Cretaceous Magnetic Quiet Zone) and therefore shows a considerable attenuation of the stripe pattern, indicating that the whole East Caribbean subsurface features oceanic crustal material.

As for the period recorded by the Caribbean magnetic stripes, we propose the interval between chronos M23 and M0, and part of CMQZ. The wavelengths of the identified anomalies suggest that the ridge associated to the formation of the Caribbean ocean floor was a slow-spreading, the Central Atlantic Ridge.

There are three sources of magnetic anomalies superimposed in the study area:

1. Long wavelength anomalies, associated with the Earth's magnetic field and expressed as a field that grows in SE-NW direction.
2. Short wavelength anomalies, associated with lateral superficial contrasts of the Antilles.
3. Middle wavelength anomalies, which incorporate three sources: the magnetic effect of the Caribbean LIP, the magnetic effect of the stripes associated with the oceanic basin

* N. Orihuela G., UCV
nurisorihuela@gmail.com

beneath the LIP coverage, and the magnetic effect related to Curie isotherm irregularities.

The integration of effects produced by the three abovementioned sources suggests that the Eastern Caribbean reflects middle wavelength magnetic anomalies dominated by the striped effect of the original crust (Figure 4d). This is confirmed by both the marine and aerial profiles of the region. In all cases (Figures 7, 8a, b, c) the profiles reflect magnetic anomaly stripes with superimposed LIP expressions and the Curie isotherm variation, even though these two sources are not able to overshadow the striped effect. This is due to the vertical magnetic contrasts produced by the stripes versus the sub-horizontal contrasts of the LIP effect and the greater depth of the Curie effect.

The behavior reflected by the Curie isotherm map (Figure 3) serves to understand that the magnetic anomaly (Figure 2) reflects a section of long wavelengths anomalies of near-to-cero amplitude in the segment between the south of the Beata Ridge and northwestern Venezuela. Based on the favorable conditions for the characterization of the Caribbean striped sequence from profiles located on that segment of the Venezuelan Basin, Figure 5 presents DSDP15GC profile (Figure 6) in a scale that facilitates the comparison of the striped pattern with the one reported for the North Atlantic (Bird *et al.* 2007) in the M25-M0 chron sequence.

The Caribbean stripes reveal a sequence with wavelengths indicating that the spreading velocity of the associated ridge was low compared to the velocities of the currently active ridges, and the spreading rates, considering the time they formed, are more associated with the Atlantic than with the Pacific.

Comparison of the striped anomaly signatures from the inner Caribbean with those of the Central Atlantic is based on the similarity of the anomalies featured by both regions (M4, M10, M16, M18-M19, M20, M21, M22, M23) and on the low spreading velocity associated to the ridge that gives rise to the Caribbean chrons (Table 4).

The association of the Caribbean seafloor with the Central Atlantic prompts examination of the relative position of the Mesozoic chron sequences in both regions. The average chron orientation of the Central Atlantic southern segment is N8E (Figure 11). In the Caribbean, equivalent sequences have a

N61E orientation (Figure 10). If the chron sequence of the Caribbean is formed by the same spreading ridge that the Central Atlantic, then a 53°-clockwise rotation of the Caribbean sequence is required after the formation of Mesozoic chrons.

Figure 9 shows data related to CMQZ characterization. This profile has a E-W orientation and extends between the central section of the Venezuelan Basin and the Lesser Antilles. The record reveals the anomaly that marks the beginning of CMQZ. As can be appreciated in Figure 11, the anomaly marking CMQZ beginning has a relevant amplitude in the Central Atlantic.

If the whole CMQZ anomaly of the Central Atlantic is compared to the Caribbean record (Figure 9), it becomes clear that from the 100% of the Atlantic magnetic record (Figure 11), 38% of CMQZ record is preserved in the eastern region of the Venezuelan Basin —a percentage reached in the western wall of the Aves Ridge.

Keywords: Magnetism, Stripped anomaly, LIP, Curie isotherm, Chron.

INTRODUCCIÓN

El dato magnético es el menos utilizado en los estudios asociados con la tectónica Caribe, por una parte por la complejidad del manejo de un dato vectorial y por otra por la existencia de otras técnicas, como la gravimetría y la sísmica, que aportan información con mayor facilidad de visualización (Pindell & Kennan, 2009). Actualmente se cuenta con una amplia gama de fuentes de datos potenciales para los estudios de la tectónica Caribe. Destacan los modelos combinados que incorporan datos satelitales, tanto gravimétricos como magnéticos (Pavlis *et al.* 2012; Maus *et al.* 2009) y datos de levantamientos aéreos (USGS, 2002) y marinos desarrollados durante las últimas 4 décadas (Quesnel *et al.* 2009).

Ghosh *et al.* (1984), hacen una recopilación de los datos magnéticos marinos existentes hasta la fecha de su publicación y concluyen que el subsuelo marino del Caribe Oriental se encuentra bandeado. En ese trabajo se identifica un eje de esparcimiento sub paralelo al Elevado de Beata, anomalías de orientación este-oeste al sur de la Cuenca de

Venezuela, norte-sur paralelo al Alto de Aves y una zona triangular no bandeada en el extremo suroriental de la referida cuenca (Figura 1).

Una importante fracción de los resultados de Ghosh *et al.* (1984) es ratificada en este estudio; sin embargo, surgen nuevos elementos que permiten

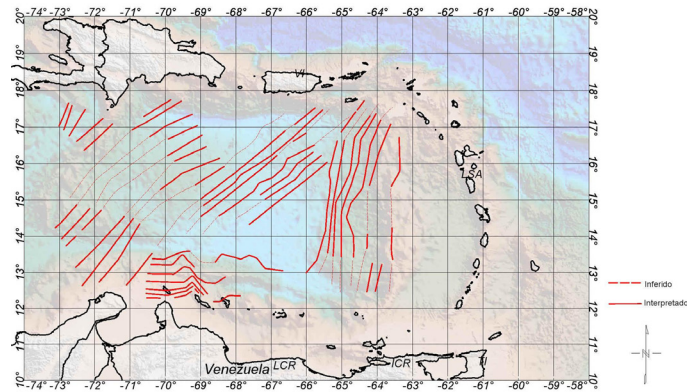


Figura 1. Anomalías magnéticas bandeadas (Modificado de Ghosh *et al.* 1984)

Figure 1. Striped magnetic anomalies (Adapted from Ghosh *et al.* 1984)

profundizar en la comprensión del subsuelo del Caribe Oriental. Desde el año 1984 a la presente fecha se han incorporado nuevos levantamientos geofísicos, tanto marinos como aéreos, y más recientemente los modelos integrados con la incorporación de medidas satelitales, con lo cual se logra ampliar y mejorar la información base para enfrentar un estudio magnético de la región.

En este trabajo abordamos la revisión de los perfiles magnéticos marinos de libre acceso del National Geophysical Data Center (NGDC), con el objeto de caracterizar las firmas magnéticas del suelo Caribe y compararlas con las firmas descritas de otros océanos (Nakanishi *et al.* 1992; Muller *et al.* 1997; Bird *et al.* 2007; Tominaga & Sager, 2010). Se analizan perfiles magnéticos de las provincias interiores de la placa Caribe: Elevado de Nicaragua, Cuenca de Colombia, Alto de Beata, Cuenca de Venezuela, Alto de Aves, todas de origen oceánico, con registros de cronos que permiten el establecimiento de edades y velocidades de esparcimiento asociadas con la dorsal de formación.

DATOS

La caracterización de las anomalías magnéticas, de cualquier región del mundo, cuenta en los actuales momentos con bases de datos generadas a partir de modelos combinados que integran datos satelitales con terrestres y marinos, (Maus *et al.* 2009) lo que permite generar mapas a escalas de visualización continental que resultan de gran utilidad al

momento de iniciar estudios geofísicos de carácter regional. La caracterización de anomalías de menor longitud de onda, como las requeridas en este trabajo, amerita la utilización de datos de adquisición marina que permitan la identificación de fuentes menos profundas.

Entre 70 levantamientos marinos del National Geophysical Data Center (NGDC- www.ngdc.noaa.gov/mgg/dat/), fueron seleccionados 18 para caracterizar las anomalías magnéticas bandeadas del interior del Caribe (Tabla 1).

Los criterios de selección de los levantamientos indicados en la Tabla 1 se vinculan fundamentalmente con la cobertura y al muestreo asociado, procurando con ello una distribución homogénea entre las provincias geológicas en estudio y un muestreo capaz de discriminar anomalías con longitudes de onda en los rangos característicos de los cronos mesozoicos del Caribe, así como variaciones propias de la zona quieta Cretácica (CMQZ).

Los levantamientos marinos destinados a la grabación de datos geofísicos, están conformados por secuencias de perfiles que van de un perfil regional a múltiples perfiles de menor alcance con longitudes y orientaciones variables, en este caso fueron seleccionados perfiles de orientación NE-SO; perpendiculares a ellos y grupos de orientación N-S y E-O.

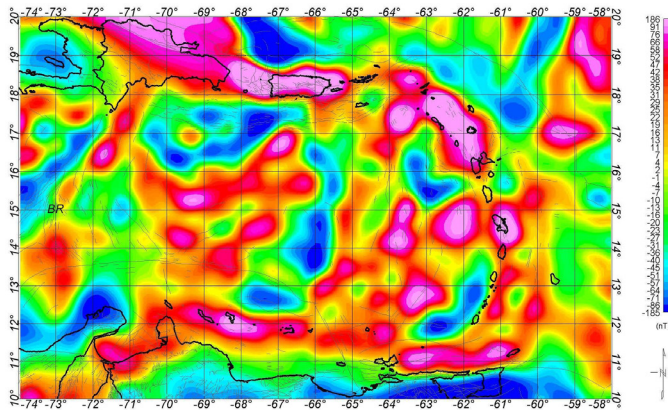


Figura 2. Anomalía de campo magnético del Caribe Oriental, modelo combinado-NGDC-720
Figure 2 Magnetic anomaly of the Eastern Caribbean, combined model NGDC-720

MÉTODO

Con los juegos de datos antes descritos, se dispone de la información necesaria para abordar la caracterización de las anomalías magnéticas del Caribe Oriental.

El abordaje de esta tarea se realiza a partir de los perfiles extraídos de los levantamientos marinos, controlando las tendencias regionales (Figura 2) a partir del modelo magnético combinado (Maus, 2010).

La caracterización de las diversas fuentes de anomalías se realiza mediante un modelo teórico, representativo de las provincias presentes en el subsuelo Caribe (Figura 4) y desde la descripción de cada una de ellas se establece la preponderancia de las anomalías bandeadas. Las anomalías bandeadas son analizadas a partir de perfiles marinos (Figuras 7, 8 y 9), con orientación y localización seleccionados según el lapso de formación y su orientación respecto a las provincias geológicas. La caracterización de las anomalías bandeadas requiere identificar las firmas para cada crono según la edad, estas descripciones y su modelaje se encuentran disponibles en diversos trabajos para las dorsales oceánicas activas. En este caso fueron utilizadas las firmas de las dorsales Centro Atlántica y Pacífico Este (Nakanishi *et al.* 1992; Müller *et al.* 1997; Bird *et al.* 2007; Tominaga & Sager, 2010).

RESULTADOS

Producto del modelaje teórico y el análisis de perfiles magnéticos marinos se establece:

Fuentes de anomalías magnéticas

En la zona en estudio se encuentran tres tipos de fuentes de anomalías magnéticas sobreimpuestas:

1. Anomalía de longitud larga, asociada con el campo magnético de la Tierra y que se expresa como un campo que crece en sentido SE-NO.
2. Anomalías de longitud corta, asociadas con los contrastes laterales superficiales de las Antillas.
3. Anomalías de longitud media que incorporan tres fuentes: el efecto magnético de la gran provincia ígnea del Caribe (LIP), el efecto magnético del bandeado asociado con la cuenca oceánica que infrayace la cobertura LIP y el efecto magnético asociado con las irregularidades de la isoterma de Curie.

Por las edades establecidas para la gran provincia ígnea (LIP) (Sinton *et al.* 1998; Révillon *et al.* 2000) y por el lapso de su formación, se puede afirmar que la misma no tiene bandeado asociado, por lo cual, su carácter de longitud media se vincula con la extensión de su cobertura en la región. El caso de las anomalías bandeadas de la corteza oceánica y las generadas por las variaciones laterales de la isoterma de Curie, se asocian con una longitud media por la profundidad de la fuente que, en nuestro caso, puede alcanzar niveles de profundidad superior al promedio, como

consecuencia de la flexión cortical por la carga LIP.

Disponer de mapas que reflejen las anomalías magnéticas de mayor longitud de onda aporta el insumo necesario para la estimación de la profundidad de la isoterma de Curie, esto es, la superficie que describe la máxima profundidad a la cual las rocas del subsuelo Caribe son capaces de retener magnetismo por inducción del campo magnético terrestre.

La aplicación de la secuencia metodológica descrita para este tipo de estudios (Wasilewski & Mayhew, 1992; Tanaka & Ishikawa, 2005; Sharma *et al.* 2006; Trifonova *et al.* 2009) y la revisión de trabajos previos que la implementan (Bansal *et al.* 2010; Chiozzi *et al.* 2005; Rajaram *et al.* 2009; Anand *et al.* 2010) llevó a la estimación de la profundidad de la isoterma de Curie en el Caribe Oriental (Figura 3).

Estos primeros resultados permiten establecer que esta superficie presenta importantes variaciones, con una mínima profundidad del orden de 17 km en la zona sur oriental de la Cuenca de Venezuela, coincidiendo con la franja de anomalías negativas propuesta como zona triangular sin bandeo (Ghosh *et al.* 1984). La máxima profundidad establecida para la isoterma de Curie en la sección marina es de 24 km, presente en el extremo occidental de la Cuenca de Venezuela y en la Cuenca de Grenada, el menor gradiente de esta superficie se identifica en el extremo occidental de la Cuenca de Venezuela, entre el sur del Alto de Beata y el noroccidente de Venezuela (Figura 3).

Este comportamiento de la isoterma de Curie se asocia con la existencia de un elevado flujo térmico en la sección oriental de la Cuenca de Venezuela (Clark *et al.* 1978). El registro reportado sobre un perfil que corta la isoterma en la zona de mínima profundidad, refleja un flujo térmico de $2,70 \mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$, valor que supera el promedio esperado en una cuenca oceánica, $1,98 \pm 0,22 \mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$ (Smith, 1975).

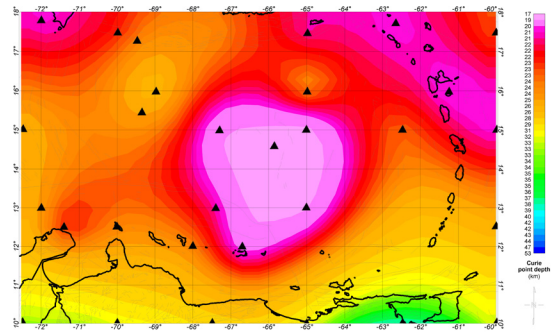


Figura 3. Isoterma de Curie del Caribe oriental
Figure 3. Curie isotherm of the Eastern Caribbean

La identificación de la placa Caribe como una gran provincia ígnea (LIP) (Coffin *et al.* 2006) requiere su asociación con actividad mantelar. La mayoría de los modelos presentados para explicar el origen de esta placa tectónica recurre a su formación al oeste de su posición actual (Pindell *et al.* 2006; Hastie & Kerr, 2010), dentro de los actuales terrenos del Océano Pacífico y con ello, tanto las anomalías bandeadas como la cobertura LIP, se originan en esa región del planeta, confiriéndole a la placa Caribe el carácter de placa alóctona.

Los resultados presentados en este trabajo sugieren una respuesta alternativa al origen de la cobertura LIP al proponer la existencia en el subsuelo del Caribe Oriental, del relicto de actividad mantelar, responsable de la surgencia de la cobertura de rocas máficas intrusivas y extrusivas descritas como representativas del LIP Caribe (Sinton *et al.* 1998; Révillon *et al.* 2000).

Características de anomalías de longitud media

Para esta caracterización se realizaron estimaciones cuantitativas derivadas de un modelo genérico (Figura 4) representativo de un perfil de orientación O-E; localizado a 14° de latitud norte, sin magnetización remanente, con susceptibilidad magnética de 0,0025 para los basaltos tanto del LIP como del bandeo y 0,005 para el manto superior sobre la isoterma de Curie.

Tomando como referencia el perfil previamente indicado, se estimaron los efectos teóricos de cada una de las fuentes de longitud media presentes en la región. Para ello se utilizó el módulo GM-SYS del software Oasis Montaj (Geosoft Inc, 2007).

Del resultado de los modelados realizados, se pueden establecer el siguiente conjunto de características generales para las fuentes magnéticas:

1. Anomalías bandeadas originadas por esparcimiento de corteza oceánica (Figura 4a).

- Presentes en la Cuenca de Venezuela y los flancos del Elevado de Aves y Alto de Beata.
- Amplitudes pico a pico promedio de 100 a 150 nT en zonas sin variaciones significativas asociadas con otras fuentes de anomalías de longitud media.
- Alteración sin perder carácter bandeado en zonas donde se localiza el adelgazamiento lateral de la isoterma de Curie.

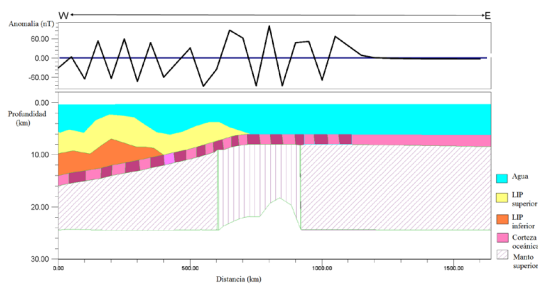


Figura 4a. Efecto magnético de la corteza bandeada
Figure 4a. Magnetic effect of striped crust

2. Anomalías asociadas con la cobertura LIP (Figura 4b).

- Efecto de amplificación leve (10%) de anomalía bandeadas en zonas con coberturas extensas LIP siempre y cuando la magnetización sea igual o superior a la corteza oceánica original y no exista flexión por carga.
- Amplitudes pico a pico de 50 a 70 nT con longitudes de onda superior a las del bandeo.
- Efecto de atenuación plana de anomalías bandeadas en zonas con cobertura LIP extensa y flexión por carga asociada.
- Incremento de longitud de onda de anomalías bandeadas en los segmentos de solape de capas LIP sobre capas oceánicas.

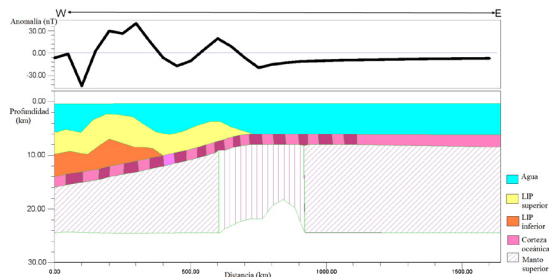


Figura 4b. Efecto magnético de la cobertura LIP
Figure 4b. Magnetic effect of LIP coverage

3. Anomalías asociadas con variaciones laterales de la isoterma de Curie (Figura 4c).

- Su efecto, aun cuando se asocie con leves variaciones de propiedades magnéticas de las rocas del manto superior, es más significativo que la influencia de la cobertura LIP.
- La amplitud pico a pico máxima es de 150 nT y se asocia con la zona de mayor adelgazamiento de la isoterma Curie dentro de la zona triangular.

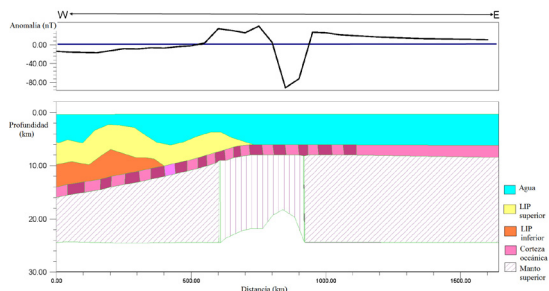


Figura 4c. Efecto magnético de la isoterma de Curie
Figure 4c. Magnetic effect of Curie isotherm

La integración de los efectos de las tres fuentes (Figura 4d) antes descritas, nos permite observar que el Caribe Oriental refleja anomalías magnéticas de longitud media dominada por el efecto bandeo de la corteza original. Esto se corrobora al revisar los perfiles, tanto marinos como aéreos, levantados en la región. En todos los casos los perfiles reflejan anomalías bandeadas con expresiones superpuestas del LIP y la variación derivada de la isoterma de Curie, sin que estas dos últimas fuentes sean capaces de opacar el efecto bandeo. Este dominio se debe a los contrastes magnéticos verticales derivados del bandeo contra contrastes sub horizontales del efecto LIP y la mayor profundidad del efecto Curie.

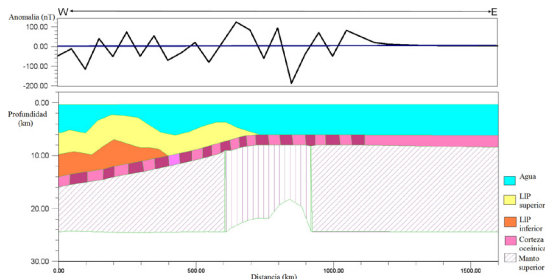


Figura 4d. Efecto magnético integrado de las 3 fuentes
Figure 4d. Magnetic effect from the integration of the three sources

Anomalías bandeadas con baja influencia de la isoterma de Curie

Por la conducta descrita para el mapa de la isoterma de Curie (Figura 3) se puede entender que el campo magnético refleje, en el segmento comprendido entre el sur del Elevado de Beata y el noroccidente venezolano, una franja de anomalías de longitud larga con amplitud cercanas a cero (Figura 2), lo que explica que en ese mismo segmento la secuencia de anomalías bandeadas se aprecie con escasa deformación.

Basándonos en las condiciones favorables para la caracterización de la secuencia bandeada Caribe, a partir de perfiles localizados en ese segmento de la Cuenca de Venezuela, se presenta en la Figura 5 el perfil DSDP15GC (Tabla 1) a una escala que facilita la comparación del patrón del bandeo con el reportado para el Atlántico Central (Bird *et al.* 2007) en la secuencia de cronos M25 a M0.

La secuencia bandeada identificada a partir de las características descritas para el Atlántico Central, con firmas de los cronos comprendidos entre M25 y M0 (Bird *et al.* 2007) permite sugerir que la secuencia bandeada del Caribe Oriental refleja la secuencia de cronos M23 a M4 para un intervalo comprendido entre 150,69 Ma y 126,57 Ma, del Jurásico Tardío a Cretácico Temprano, al menos en la sección muestreada por el perfil de trabajo.

Tabla 1. Levantamiento con identificación del NGDC (www.ngdc.noaa.gov/mgg/dat/) vs. provincias geológicas.

Table 1. Surveys with NGDC identification (www.ngdc.noaa.gov/mgg/dat/) vs. geological provinces

Levantamiento	Año	Provincias Cubiertas
v2608	1969	EN; CC
rc1310	1970	CC;AB;CV;AA;CG
dspd15gc	1970	EN;CC;CV;AS;AA;CG
ch100l12	1971	CC
u471cb	1971	AS;CV
wi932010	1972	CV;AA;CG
72001821	1972	CC;AB;CV
74010907	1975	CC;AB;CV
rc1904	1975	CV;AA;CG
ig1504	1975	AS
inmd02mv	1977	CC;AB;CV
rc2103	1977	CC;CV;AS;CG
ig2403	1977	EN;CC;AB
fm0107	1978	EN;CC;AB;CV
rc2109	1978	CC;AB;CV
rc2116	1978	CC;AB;CV
fml-85-4	1985	CV
87002211	1987	CC;CV

EN: Elevado de Nicaragua, CC: Cuenca de Colombia, CV: Cuenca de Venezuela, AB: Alto de Beata, AA: Alto de Aves CG: Cuenca de Grenada AS: Antillas de Sotavento

Las firmas de las anomalías asociadas con los diversos cronos es única a nivel mundial; la diferencia fundamental entre diversos centros de esparcimiento se asocia con la longitud de onda (distancia entre cronos) que depende de la velocidad de esparcimiento en cada dorsal (Müller *et al.* 1997).

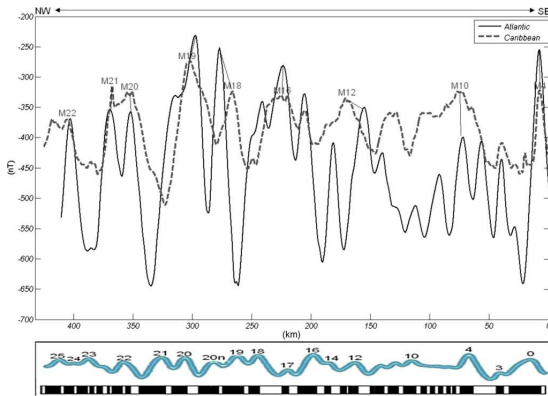


Figura 5. En el nivel superior, comparación de la secuencia bandeada del perfil DSDP15GC (segmento punteado) con un perfil localizado en el Atlántico Norte (segmento continuo) entre 31° y 34° de latitud norte; en el nivel inferior modelo teórico de cronos mesozoicos del Atlántico Central (Modificado de Bird *et al.* 2007).

Figure 5. Comparison of DSDP15GC profile's striped sequence (top) with a profile located in the North Atlantic (bottom) between latitudes 31° and 34° N (Adapted from Bird *et al.* 2007).

Si estimamos la separación entre los cronos M21 y M20 para el perfil Atlántico de la Figura 5, ésta es del orden de 17 km, la misma separación reflejada por iguales cronos del perfil Caribe. Al comparar esta longitud en cronos de la Cuenca de Nauru, localizada en el Océano Pacífico (Murphy, 2004) encontramos que la separación entre M21 y M20 alcanza 74 km. Estas longitudes nos permiten afirmar que, para los lapsos equivalentes (146,56Ma a 144,70Ma), la velocidad de esparcimiento de la dorsal que formó el Caribe y el Atlántico Norte es de 0,91cm/año mientras para el bandeo del Pacífico la velocidad promedio es de 3,98cm/año. Comparación similar realizada para los cronos M19 y M18 permite establecer: 20 km de separación en cronos del Atlántico, 31 km en el Caribe y 61 km en el Pacífico, revelando tasas de esparcimiento de 1,08 cm/año 1,68 cm/año y 3,30 cm/año, respectivamente.

El bandeo Caribe revela una secuencia con longitudes de onda, indicativas de una velocidad de esparcimiento de la dorsal asociada, baja respecto a las velocidades conocidas en las dorsales actualmente activas. Las tasas de esparcimiento, para la época de su formación, guardan mayor similitud con el Océano Atlántico que con el Océano Pacífico.

La presencia de la secuencia de cronos característica del Mesozoico (M25 a M0) en el suelo Caribe y su distribución con disminución de edad de oeste a este, con los segmentos más jóvenes frente a la sección occidental del territorio venezolano, abre la incógnita sobre la presencia de la secuencia magnética siguiente en tiempo geológico, representada por la Zona Quieta Magnética Cretácea (CMQZ). La firma magnética de esta zona revela que la misma se inicia con una anomalía de amplitud superior al promedio de los cronos Mesozoicos, seguida de una secuencia anómala sin patrón establecido con amplitudes del orden de las decenas de nano teslas, hasta alcanzar el crono C34 que inicia la secuencia de anomalías Cenozoicas. La revisión de la sección oriental de la Cuenca de Venezuela revela la presencia de anomalías similares a las asociadas con el inicio de la CMQZ, sin alcanzar la presencia del crono C34, con lo cual la sección triangular identificada como no magnética (Ghosh *et al.* 1984) es el reflejo de parte de la CMQZ con la influencia magnética adicional del adelgazamiento de la isoterma de Curie.

A partir de las observaciones previamente señaladas, se extiende la identificación de cronos del interior de la Placa Caribe a otros perfiles marinos, ampliando el área de estudio a zonas donde la influencia de la Isoterma de Curie se incrementa. Sin embargo, como fue establecido por el modelaje teórico, la perturbación no impide la identificación de las anomalías bandeadas presentes en la zona.

Anomalías bandeadas

De los levantamientos indicados en la Tabla 1, fueron seleccionados tres (3) grupos de perfiles con el propósito de describir el comportamiento de los atributos de los registros magnéticos marinos de las provincias interiores del Caribe (Figura 6).

La selección se basó en la orientación preferencial descrita en trabajos previos (Ghosh *et al.* 1984) para las anomalías de la región, confirmados por trabajos recientes (USGS, 2002), según los cuales las anomalías bandeadas del interior del Caribe se orientan preferencialmente en sentido NE-SO (Figura 1).

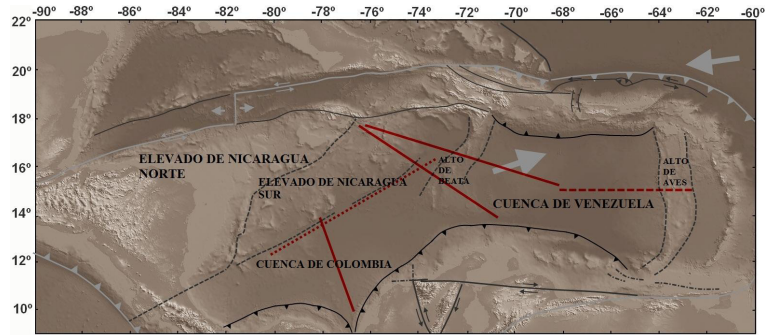


Figura 6. Localización de perfiles seleccionados, grupo 1, línea punteada, grupo 2, línea continua, grupo 3, línea discontinua
Figure 6. Location of selected profiles: group 1 (dotted line), group 2 (solid line), group 3 (dashed line)

Grupo 1: Perfiles de orientación NE-SO, permiten establecer la existencia de variaciones laterales de amplitud en cronos con rangos de edad similares.

Grupo 2: Perfiles de orientación NO-SE, al correr perpendiculares a los cronos permiten identificar las longitudes de onda de las anomalías y en combinación con los perfiles del grupo 1 permiten establecer posibles desplazamientos laterales de cronos de la misma edad, lo que representa posibles fallas transformantes presentes en el suelo Caribe.

Grupo 3: Las características difusas de los cronos de la sección oriental de la Cuenca de Venezuela, llevan a la selección de un grupo específico de levantamientos destinados a describir e identificar los cronos de esta sección del interior del Caribe. La Tabla 2 identifica los levantamientos seleccionados para cada grupo de datos.

Tabla 2. Distribución de levantamientos por grupo de perfiles.

Table 2. Survey distribution by profile groups.

Grupo	Levantamiento	Responsable
1	72001821	CNEXO-France
	74010907	Universidad de Hawái
	87002211	IFREMER-France
	ig2408	Inst. Goefísica. Univ. Texas
	inmd02	Inst. Oceanog. Scripps
	rc2109	Obs. Geol. Lamont-Doherty
	rc2116	Obs. Geol. Lamont-Doherty
	dsdp15gc	Inst. Oceanog. Scripps
	fm0105	Inst. Goefísica. Univ. Texas
	ch100L12	Inst. Oceaong. Woods Hole
2	rc1310	Obs. Geol. Lamont-Doherty
	rc1904	Obs. Geol. Lamont-Doherty
	rc2103	Obs. Geol. Lamont-Doherty
	v2608	Obs. Geol. Lamont-Doherty
3	wi932010	Ofic. Oceanog. Naval-US
	u471cb	Grupo Geol. Del Pacifico-USGS
	ig1504	Inst. Goefísica. Univ. Texas
	fml-85-4	Inst. Oceaong. Woods Hole

Perfiles por grupo de datos

Seguidamente se describen los perfiles tipo por grupo de datos que soportan la interpretación de firma de cronos, edades y posición de fallas transformantes.

El perfil tipo del grupo 1 con orientación NE-SO se presenta en la Figura 7, en él se observa una disminución de la amplitud de las anomalías en la sección central, este comportamiento se asocia con una banda con un ancho promedio de dos (2) a tres (3) grados localizada entre la franja norte costera Venezolana, el segmento sur de Alto de Beata y la fracción central de la Cuenca de Colombia.



Figura 7. Perfil magnético SO-NE, grupo 1, se destacan con flechas negras posición de fallas
Figure 7. Group 1 SW-NE magnetic profile (black arrows show fault location)

La presentación de los perfiles del grupo 2 con orientación NO-SE, se realiza en tres segmentos, perfiles localizados al sur de la banda de disminución de amplitud del grupo 1, representado por un perfil que se prolongan a través de la Cuenca de Colombia (Figura 8a). Un perfil que se encuentran dentro de la banda de baja amplitud (Figura 5) y la sobrepasa al norte, cortando las Cuencas de Venezuela y Colombia hasta alcanzar el Elevado de Nicaragua (Figura 8b) y el tercer perfil localizado completamente al norte de la franja de amplitud disminuida, que se prolonga de la Cuenca de Venezuela al Elevado de Nicaragua (Figura 8c).

En la Figura 8a se observa el perfil tipo localizado en la sección sur del grupo 2; en el mismo se identifica una secuencia de cronos con amplitud comprendida entre 450 nT y 150 nT. En la Figura 8b, el perfil que se prolonga de sureste a noroeste entre las dos zonas de amplitud diferenciable, en el extremo SE la amplitud de las anomalías van de 200 nT a 70 nT, en el segmento NO la amplitud va de 600 nT a 120 nT. En la Figura 8c se presenta

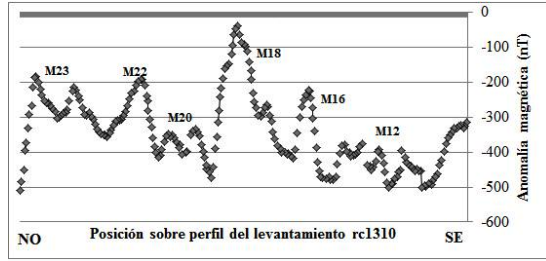


Figura 8a. Perfil Sur de anomalías magnéticas, grupo 2. Se identifican los cronos Mesozoicos registrados, la totalidad del perfil se localiza en la Cuenca de Colombia.

Figure 8a. Southern profile of magnetic anomalies (Group 2) showing identified Mesozoic chrons (whole profile in the Colombian Basin).

el perfil localizado al norte de la franja de baja amplitud, en este caso las anomalías observadas se encuentran entre 450 nT y 100 nT.

Los perfiles del grupo 3, están destinados a identificar en el Caribe Oriental, las variaciones del campo magnético durante la Zona Quieta Cretácica (CMQZ). Para ello fue seleccionada la anomalía marcadora del inicio de este evento a nivel mundial, tomando como firma de referencia su registro en el Atlántico Central; esta selección obedece a la afinidad de las firmas magnéticas. La Figura 9 ilustra el perfil tipo seleccionado para esta caracterización, la anomalía marcadora del inicio del evento (lóbulo positivo) alcanza anomalías que van de 200 nT a 250 nT en los perfiles que le registran.

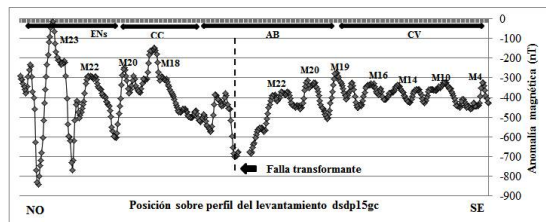


Figura 8b. Perfil Central de anomalías magnéticas, grupo 2. Se identifican los cronos Mesozoicos registrados, la posición del cruce de la falla transformante (línea punteada) y el segmento por provincia geológica según la identificación de la Tabla 1.

Figure 8b. Central profile of magnetic anomalies (Group 2) with identified Mesozoic chrons, position of transform fault (dotted line) and segment by geological province according to Table 1.

La información revelada por los perfiles de las Figuras 7, 8 y 9 se integra en la Tabla 3, el grupo 1 permite identificar la presencia de una zona de baja amplitud (magnetización) dentro del Caribe reflejando la presencia de dos fallas transformantes

que le delimitan, los tres perfiles del grupo 2 revelan que la falla transformante localizada al norte presenta saltos de cronos en sentido Este del orden de 3 grados (3°) mientras la del sur no revela saltos medibles a la escala de trabajo. La secuencia de cronos se establece basado en la firma de cronos del Atlántico Central (Bird *et al.* 2007), se identifica la secuencia M23 (150,69 Ma.) a M0(120,6 Ma.) en las provincias interiores del Caribe Norte. Al Sur, en la Cuenca de Colombia el crono más joven identificado es el crono M14 (134,81 Ma.). El grupo 3 revela la presencia de CMQZ en la Cuenca Venezuela, la comparación con la firma del Atlántico Central permite establecer el intervalo grabado en el suelo Caribe de este importante intervalo del magnetismo planetario.

Tabla 3. Distribución de cronos por provincia geológica.

Table 3. Chron distribution by geological province.

Cronos	Intervalo (Ma.)	Provincia
M23 a M0	150 a 120	Elevado de Nicaragua Sur Cuenca de Colombia Norte Alto de Beata Cuenca de Venezuela Occidental
M23 a M14	150 a 135	Elevado de Nicaragua Sur Cuenca de Colombia
CMQZ	120 a 100	Cuenca de Venezuela Oriental

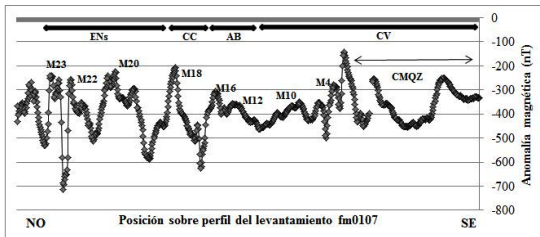


Figura 8c. Perfil Norte, anomalía magnética, grupo 2. Se identifican los cronos Mesozoicos registrados y el segmento por provincia geológica según la identificación de la Tabla 1.

Figure 8c. Northern profile of magnetic anomalies (Group 2) with identified Mesozoic chronos and segment by geological province according to Table 1.

La Tabla 4 presenta la posición geográfica de los cronos mesozoicos para los tres perfiles del grupo 2. Los cronos identificados en el perfil de la Figura 8c se correlacionan con los cronos del extremo noroccidental del perfil 8b, por encontrarse ambos grupos de cronos al norte de la falla transformante (Figura 10).

Los cronos del perfil representado en la Figura 8a, se correlacionan con los cronos del extremo suroriental de la Figura 8b, por encontrarse ambos al sur de la falla transformante. Ambos grupos de cronos revelan un desplazamiento al este del grupo sur de cronos respecto al grupo norte, en un segmento estimado en 3°. Ambos grupos de cronos presentan una orientación N61E y se prolongan, en el norte, hasta el segmento occidental de la Cuenca de Venezuela.

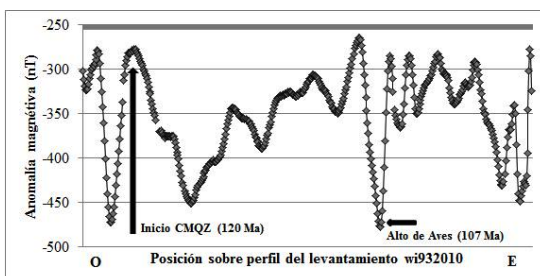


Figura 9. Perfil magnético, grupo 3, se destaca con flecha vertical el inicio de CMQZ

Figure 9. Magnetic profile (Group 3). Vertical arrow stands for beginning of CMQZ

El límite de la secuencia de cronos mesozoicos (M0) y el inicio de la CMQZ, se puede visualizar en el perfil 8c. Su descripción se realiza a partir del perfil tipo del grupo 3 de datos (Figura 9). La Zona Quieta Cretácica (CMQZ) se prolonga entre 120 y 84 Ma, se caracteriza por una serie de alteraciones de baja amplitud del campo magnético con dos anomalías positivas destacadas que marcan el inicio y el fin de la secuencia. La correlación de firmas entre el registro CMQZ del Atlántico Central y del Caribe Oriental permite seguir las alteraciones del campo magnético dentro del Caribe hasta 107 Ma., esta edad coincide con la pared occidental del Elevado de Aves.

Tabla 4. Posición geográfica de cronos mesozoicos y velocidad promedio de esparcimiento por perfil.

Table 4. Geographical position of Mesozoic chrons and average spreading velocity of each profile.

Perfil/V(cm/a)	Crono	Lat.	Long.	
fm0107	M0	15.1061	-69.556	
	M4	15.2926	-70.1114	
	M10	15.4384	-70.5272	
	1.9	M16	16.0966	-72.2041
		M18	16.5145	-73.0633
		M20	16.9299	-73.8589
		M22	17.1132	-74.2926
	M23	17.3681	-75.0677	
dsdp15gc	M4	12.8346	-70.2349	
	M10	13.18	-70.7922	
	1.6	M14	13.7251	-71.6273
		M16	13.9627	-72.0569
		M18	14.1324	-72.3417
		M20	14.5797	-73.0251
	M22	14.8209	-73.3284	
	1.8	M18	15.77	-74.4283
M20		16.0727	-74.8262	
M22		16.6651	-75.3229	
M23		17.1015	-75.8551	
rc1310	M16	10.3632	-77.3746	
	M18	10.911	-77.8354	
	1.8	M20	11.3572	-78.2647
		M22	11.5766	-78.5038
		M23	12.1277	79.0572

Para establecer esta edad se supone que la velocidad de esparcimiento entre 120 y 84 Ma es constante en el Atlántico Central (2,2 cm/año) y se prorratea el tiempo transcurrido entre la anomalía de inicio y la anomalía presente en el extremo oriental de la Cuenca de Venezuela, a partir de esta posición la presencia del Elevado de Aves y el Arco de Antillas Menores impide el seguimiento del CMQZ Caribe.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La ratificación de las edades de los cronos mesozoicos propuestos por Ghosh *et al.* (1984) para el interior de la placa Caribe es uno de los principales resultados de este estudio. Se complementa con la estimación de la velocidad promedio de esparcimiento de la dorsal oceánica que le forma, con la identificación adicional de la CMQZ, y dos fallas transformantes (Vema y Doldrums) presentes en el interior del Caribe.

Cronos Mesozoicos

Se identifica el crono M23 como el más antiguo del suelo Caribe. La revisión comparativa de firmas de las anomalías bandeadas del interior del Caribe con las del Atlántico Central se basa en la similitud de anomalías marcadoras en ambas regiones (M4, M10, M16, M18-M19, M20-M21, M22, M23) y en la baja velocidad de esparcimiento asociada con la dorsal que da origen a los cronos Caribe (Tablas 4 y 5).

Tabla 5. Comparación de velocidad de esparcimiento Caribe con los Océanos Atlántico y Pacífico.

Table 5. Comparison of spreading velocities of Caribbean with Atlantic and Pacific oceans.

Atlántico Central	Caribe V (cm/año)	Pacífico V(cm/año)		
		Phoenix	Hawái	Japón
V(cm/año)	(cm/año)			
1,44	1,8	6	4,4	6,1
Bird, <i>et al.</i> 2007	Este trabajo	Nakanishi, <i>et al.</i> 1992		

La baja velocidad de esparcimiento de la Cresta Centro Atlántica no permite el despliegue completo de la secuencia de cronos mesozoicos. Esto obedece, en algunos lapsos a la existencia de periodos de inversión muy cortos que no permiten su registro o conducen a la superposición de cronos. Por ello, mientras en la secuencia Caribe o Atlántico Central identificamos la secuencia M4 – M10, para el mismo intervalo de tiempo en el Pacífico se identifican los cronos M4-M5-M6-M7-M8-M9-M10. Igual circunstancia se aplica a la secuencia M10 – M16, en el Atlántico Central y el Caribe se identifican M10-M12-M14 y M16, mientras en el Pacífico es posible distinguir el M11, M13 y M15 (Nakanishi *et al.* 1992; Tominaga & Sager, 2010).

La asociación del piso oceánico Caribe al Atlántico Central lleva a revisar la posición relativa de la secuencia de cronos mesozoicos en ambas regiones. La orientación promedio de cronos del segmento Sur del Atlántico Central es N8E. En el Caribe, secuencias equivalentes tienen una orientación N61E (Figura 10). Si la secuencia de cronos del suelo Caribe se forma en la misma cresta de esparcimiento que el Atlántico Central, se requiere

una rotación horaria de 53° de la secuencia Caribe en fecha posterior a la formación de los cronos mesozoicos.

Fallas transformantes

Las variaciones de atributos sobre perfiles que corren paralelos a los cronos, pueden permitir identificar la presencia de fallas transformantes. Esto es posible por permitir visualizar planos que ponen en contacto lateral cronos de edades distintas, producto del desplazamiento lateral asociado a dicha falla (Figura 10).

El grupo 1 de datos fue seleccionado con orientación NE-SO según este criterio, logrando identificar dos planos de orientación NO-SE que expresan variaciones laterales de amplitud (Figura 7) que son identificados como fallas transformantes.

La distribución de cronos de la Figura 10 refleja un importante desplazamiento horizontal, al este, de los cronos magnéticos sobre el plano de falla localizado al norte (3°); mientras el plano de falla del sur tiene un impacto imperceptible en cuanto al desplazamiento horizontal. La asociación de cronos Caribe con cronos Atlántico, realizada en la sección anterior, se extiende a nivel de fallas transformantes para lo cual se proyectan los segmentos identificados, bajo este criterio, se asocia el plano de falla del Norte con la falla de Vema y el plano de falla del Sur con la falla de Doldrums.

Si observamos las características de los saltos de falla asociados con Vema y Doldrums en el Atlántico Central, estos resultan cónsonos con los saltos equivalentes en la región interior del Caribe. La falla de Vema revela un salto al este del orden de 3° de toda la secuencia de cronos cenozoicos localizados al este del Caribe, y la falla de Doldrums expresa una compleja distribución de saltos al Este y al Oeste que complica la estimación del desplazamiento efectivo, al menos en el segmento septentrional de la misma.

Rotación de Cronos

El establecimiento de la edad de rotación de la secuencia de cronos mesozoicos del Caribe se realiza a partir de la variación de orientación de los mismos, entre el segmento occidental y oriental de la Cuenca de Venezuela.

Tal como fue señalado por Ghosh *et al.* (1984), las alineaciones magnéticas en la Cuenca de Venezuela varía de orientación NE-SO en la sección occidental, próxima al Alto de Beata, a una orientación N-S en la sección oriental, próxima al Alto de Aves. Si la totalidad de la secuencia de cronos se formó en un mismo centro de esparcimiento, la Cresta Centro Atlántica, la rotación se dio en el intervalo de tiempo comprendido entre la formación de los cronos mesozoicos, el inicio de CMQZ en la sección occidental (NE-SO) y el segmento de CMQZ localizado en sección oriental (N-S), en la frontera del Elevado de Aves.

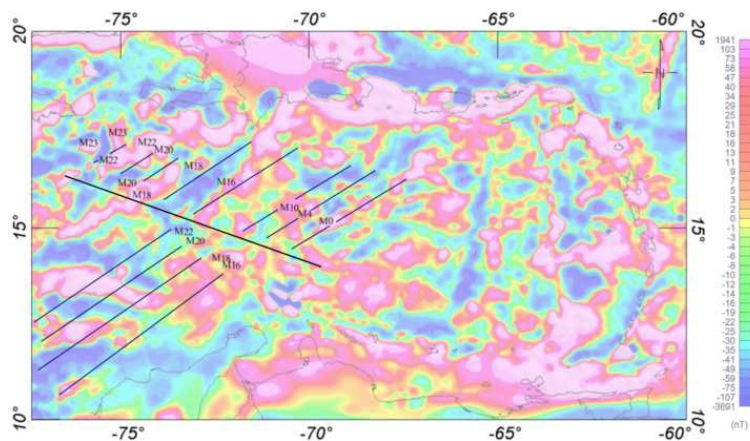


Figura 10. Secuencia de cronos mesozoicos y fallas transformantes de la placa Caribe.
Figure 10. Mesozoic chron sequence and transform faults of the Caribbean Plate

Para establecer esta fecha, se correlaciona el registro Caribe de CMQZ con su equivalente del Atlántico Central, estableciéndose que la rotación ocurre entre 120 y 107 Ma., lapso en el que se forma la sección Caribe comprendida entre M0 y el segmento de CMQZ que coincide con la pared occidental del Elevado de Aves.

La condición previamente señalada, lleva a la revisión de la evolución del Atlántico Ecuatorial, encontrándose que el episodio más significativo que afectó la región, en el intervalo de tiempo señalado, fue la separación definitiva de Sur América de África, la cual se establece en 113 Ma (Moullina *et al.* 2010) y se asocia con una importante liberación de esfuerzos acumulados en la sección comprendida entre la falla de Doldrums y la falla de Romanche (Müller *et al.* 1999). Este lapso de la evolución del Océano Atlántico es el más complejo desde el punto de vista tectónico, no existe un modelo acabado que lo describa (Nürnberg & Müller, 1991; Moullina *et al.* 2010), con lo cual la evidencia de movimientos rotacionales grabados en el suelo Caribe como consecuencia de este ciclo de la apertura puede aportar elementos útiles a nuevos estudios en la región.

CMQZ (Zona Quieta Cretácica)

Del grupo 3 de datos, destinado a la caracterización de CMQZ, se selecciona el perfil mostrado en la Figura 9. Este perfil tiene orientación E-O y se extiende entre la sección central de la Cuenca de Venezuela y las Antillas Menores. El registro revela la anomalía marcadora de inicio del CMQZ, expresión anómala de similares características a la que puede observarse en el Atlántico Central (Figura 11).

Si tomamos la anomalía completa de CMQZ en el Atlántico Central y la comparamos con el registro Caribe (Figura 11 vs. Figura 9) podemos observar que del 100% del registro magnético del Atlántico (Figura 11), en la región oriental de la Cuenca de Venezuela se preserva el 38% del registro del CMQZ, se alcanza este porcentaje en la pared occidental del Elevado de Aves.

La distorsión producto del levantamiento topográfico del Elevado de Aves dificulta el

seguimiento de la firma magnética del CMQZ, sin embargo, su presencia al este de las Antillas Menores permite presumir que ambas provincias geológicas se desarrollan sobre suelo oceánico Atlántico cuya edad se encuentra entre 107 y 84 Ma.

La presencia de la Cuenca de Grenada entre el Elevado de Aves y las Antillas Menores, rompe la continuidad lateral del CMQZ en esta sección del Caribe, lo que se expresa en el suelo oceánico Atlántico como un desplazamiento al este del crono C34, teniendo como límite, entre segmentos del CMQZ, la falla transformante de Vema y su proyección en el interior de la región Caribe.

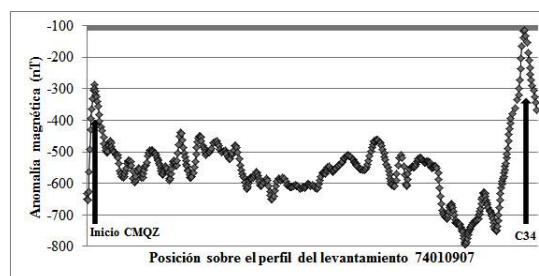


Figura 11. Perfil magnético del CMQZ del Atlántico Central, se destaca con flechas verticales el inicio y fin del CMQZ

Figure 11. Magnetic profile of Central Atlantic CMQZ. Vertical arrow stands for beginning of CMQZ

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados de la caracterización de las anomalías magnéticas bandeadas de la Placa Caribe se puede establecer:

1. Las anomalías magnéticas de la Cuenca de Venezuela tienen tres fuentes claramente diferenciables: variaciones laterales de la superficie descrita por la isoterma de Curie, bandeo magnético asociado con corteza oceánica formada en una cresta de esparcimiento lento entre el Jurásico tardío y el Cretáceo temprano y efecto magnético de la cobertura de la gran provincia ígnea (LIP).
2. La firma magnética que más se destaca es la asociada con el bandeo de la corteza oceánica que infrayace al LIP, esta fuente está presente en la totalidad de las Cuencas de Venezuela y Colombia, Elevado de Nicaragua Sur, en las

laderas del Elevado de Aves y en el Alto de Beata.

3. El bandeado magnético presente en el Caribe se asocia con un centro de esparcimiento de baja velocidad, tomando como referencia la velocidad de las crestas actualmente activas. La estimación de velocidades permite afirmar que el bandeado Caribe presenta características similares a la secuencia del Océano Atlántico Central.
4. El suelo oceánico que conforma la placa Caribe se formó por expansión en la Cresta Centro Atlántica entre el crono M23 y la CMQZ.
5. Las fallas transformantes que afectan la Cresta Centro Atlántica se proyectan dentro de la placa Caribe (Fifteen-Twenty, Vema, Doldrums), de estas la de mayor desarrollo en movimiento horizontal en el Caribe es la falla de Vema.

REFERENCIAS

- ANAND, S., RAJARAM, M., SINGH, K., PURUCKER, M. (2010). Satellite Derived Curie isotherm Map of the Indian sub-continent. Deep continental studies on India, DCS-DST News.
- BANSAL, A., GABRIEL, G., DIMRI, P. (2010). Depth to the bottom of magnetic sources in Germany. EGM 2010 International Workshop, Adding new value to Electromagnetic, Gravity and Magnetic Methods for Exploration.
- BIRD, D., HALL, S., BURKE, K., CASEY, J., SAWYER, D. (2007). Early Central Atlantic Ocean seafloor spreading history. *Geosphere*, 3, (5); pp. 282–298; doi: 10.1130/GES00047.1.
- CLARK, T., KÖRGEN, B., BEST, D. (1978). Heat Flow in the Eastern Caribbean. *J. Geophys. Res.*, 83(B12), 5883–5891, doi: 10.1029/JB083B12p05883.
- CHIOZZI, P., MATSUSHIMA, J., OKUBO, Y., PASQUALE, V., VERDOYA, M. (2005). Curie point Depth from spectral analysis of magnetic data in central-southern Europe. *Phys. Earth Plan. Int.* 152, 267–276.
- COFFIN, M., DUNCAN, R., ELDHOLM, O., FITTON, G., REY, F., LARSEN H., MAHONEY, J., SAUNDERS, A., SCHLICH, R., WALLACE, P. (2006). Large igneous provinces and scientific ocean drilling. *Oceanography*, 19 (4).
- GEOSOFT INC. (2007). Oasis montaj v.6.4.2, Standard Edition. [Program].
- GHOSH, N., HALL, S., CASEY, J. (1984). Sea floor spreading magnetic anomalies in the Venezuelan Basin. In: The Caribbean–South American Plate Boundary. *Geol. Soc. Am. Mem.* 162, 65–80.
- HASTIE, A. & KERR, A. (2010). Mantle plume or slab window? Physical and geochemical constraints on the origin of the Caribbean oceanic plateau. *Earth-Sci. Rev.* 98, 283–293.
- 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, F. (2009). EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine measurements. *J. Geophys. Res.* DOI: 10.1029.
- MAUS, S. (2010). An ellipsoidal harmonic representation of Earth's lithospheric magnetic field to degree and order 720. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11, Q06015, doi:10.1029/2010GC003026.
- MOULINA, M., ASLANIANA, D., UNTERNEHR, P. (2010). A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Sci. Rev.* 98, (1-2), 1-37.
- MÜLLER, R., ROEST, W., ROYER, J., GAHAGAN, L., SCLATER, J. (1997). Digital isochrones of the world's ocean floor. *J. Geophys. Res.* 102, B2, 3211-3214.
- MÜLLER, R., ROYER, J., CANDE, S., ROEST, W., MASCHENKOV, S. (1999). New Constraints on Caribbean Plate Tectonic Evolution. Caribbean Basins included in the series Sedimentary Basins of the World, 4 Elsevier Science Edited by P. Mann, UT Institute for Geophysics, 4412 Spicewood Springs Road, Building 600, Austin, TX 78759, USA.
- MURPHY, M. (2004). Geophysical investigation of the tectonic and volcanic history of the Nauru Basin, western pacific. Thesis Submitted to the University of North Carolina Wilmington in Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree of Master of Science, 108 pp.
- NAKANISHI, M., TAMAKI, K., KOBAYASHI, K. (1992). Magnetic anomaly lineation from Late Jurassic to Early Cretaceous in the west-central Pacific Ocean. *Geophys. J. Int.* 109, 701-719.
- NÜRNBERG, D. & MÜLLER, D. (1991). The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present. *Tectonophysics* 191, 27-53.
- PAVLIS, N., HOLMES, S., KENYOUN, S., FACTOR, J. (2012). The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2011JB008916.
- PINDELL, J., KENNAN, L., STANEK, K., MARESCH, W., DRAPER, G. (2006). Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. *Acta Geologica*, 4(1-2) 303-341.

- PINDELL, J. & KENNAN, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. Geological Society, London, Special Publications, 328, pp.1-55.
- QUESNEL, Y., CATALAN, M., ISHIHARA, T. (2009). A new global marine magnetic anomaly data set. *J. Geophys. Res.* 114(B04106), doi: [f10.1029/2008JB006144](https://doi.org/10.1029/2008JB006144).
- RAJARAM, M., ANAND, S., HEMANT, K., PURUCKER, M. (2009). Curie Isotherm map of Indian Subcontinent from satellite and aeromagnetic data. *Earth Plan. Sci. Lett.* 281, 147–158.
- RÉVILLON, S., HALLOT, E., ARNDT, N., CHAUVEL, C., DUNCAN, R. (2000). Caribbean Plateau: petrology, geochemistry, and geochronology of the Beata Ridge, South Hispaniola. *J. Geology* 108, 641–661.
- SINTON, C., DUNCAN, R., STOREY, M., LEWIS, J., ESTRADA, J. (1998). An oceanic flood basalt province within the Caribbean Plate. *Earth Plan. Sci. Lett.* 155, 221–235.
- SHARMA, S., POORNACHANDRA, G., RAO, V. (2006). Heat flow, Curie depth and composition of lower crust beneath the Indian shield. *Advances in Geosciences*, 1: Solid Earth (SE). Editor-in-Chief: Wing-Huen Ip. Volume Editor-in-Chief: Yun-Tai Chen. ISBN: 981-256-985-5. Published by World Scientific Co., Pte. Ltd., Singapore, p.189.
- SMITH, P. (1975). *Temas de Geofísica*. Editorial Reverte, España.
- TANAKA, A. & ISHIKAWA, Y. (2005). Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness: The Japanese islands case study. *Phys. Earth Plan. Int.* 152, 257–266.
- TRIFONOVA, P., ZHELEV, Z. H., PETROVA, T., BOJADGIEVA, K. (2009). Curie point depth of Bulgarian territory inferred from geomagnetic observations and its correlation with regional thermal structure and seismicity. *Tectonophysics* 473 (2009) 362-374.
- TOMINAGA, M. & SAGER, W. (2010). Origin of the smooth zone in early Cretaceous North Atlantic magnetic anomalies. *J. Geophys. Res. Lett.*, 37, L01304, doi: [10.1029/2009GL040984](https://doi.org/10.1029/2009GL040984).
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2002). Digital data grids for the magnetic anomaly map of North America (USA). U.S. Geological Survey Open-File Report 02-414, U.S. Geological Survey.
- WASILEWSKI, P., & MAYHEW, M. (1992). The moho as a magnetic boundary revisited, *Geophys. Res. Lett.*, 19(22), 2259–2262, doi: [10.1029/92GL01997](https://doi.org/10.1029/92GL01997).