
NUEVOS MAPAS DE ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS DEL CARIBE

MARIANO S. ARNAIZ-RODRÍGUEZ
y YANETH GARZÓN

RESUMEN

Se presentan los mapas de anomalía de aire libre y anomalía de Bouguer del Caribe, generados a partir de datos extraídos de la compilación gravimétrica publicada periódicamente por el Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego. A partir de ellos, se calcula la anomalía de Bouguer total, a la cual se incorporan las correcciones atmosféricas y de Bullard B, con el fin de verificar su aporte para estudios regionales. Al examinar los descriptivos básicos de las correcciones y las anomalías calculadas no se observan, en términos numéricos y cualitativos, aportes significativos de las nuevas correcciones al mapa final de anomalía de Bouguer total, por lo que se pueden considerar como despreciables a la escala estudiada. Este mapa muestra magnitudes, que varían en un am-

plio intervalo; desde -260mGal hasta un máximo de 420mGal. En general, los valores mínimos se encuentran en las regiones continentales del mapa, mientras que los valores máximos se asocian a corteza oceánica (Placa Atlántica, corteza oceánica de la Placa Caribe, Cuenca de Yucatán, Cuenca de Venezuela y Placa de Cocos). Resaltan las anomalías negativas en México y Centroamérica, norte de la Placa Suramericana y Cuenca Oriental de Venezuela. El mapa de aire libre a escala presenta valores desde -360mGal hasta 590mGal. Algunas de las estructuras que se encuentran reproducidas con bastante fidelidad por las anomalías de gradiente vertical son las cuencas de Maracaibo, Oriental de Venezuela, Granada, Colombia, Venezuela y Alto de Aves.

La Placa Caribe (Figura 1) es un rasgo geológico localizado entre 60 y 90°O y entre 10 y 20°N; cubre un área de $\sim 4 \times 10^6 \text{ km}^2$; se extiende desde Centroamérica hasta las Antillas Menores, y desde Cuba hasta el límite norte de Suramérica (Granja, 2005). Afecta al régimen de esfuerzos que controla, de forma determinante, la tectónica actual del norte de Suramérica, como afirman diversos autores (Soulas, 1986; Pindell y Barrett, 1990; Bachmann, 2001; Audemard *et al.*, 2005; Sisson *et al.*, 2005).

Durante más de 40 años, los geocientíficos se han interesado en esclarecer la geodinámica del Caribe. La gravimetría, como una de las principales herramientas geofísicas, ha sido extensamente

empleada con la finalidad de estudiar distintas zonas particulares (Folinsbee, 1972; Bellizzia *et al.*, 1976; Bowin *et al.*, 1982; Cuevas *et al.*, 2003; Garzón y Ughi, 2008; Graterol *et al.*, 2008; Ughi, 2009; entre otros). Sin embargo, son pocos los estudios gravimétricos que comprenden toda la región, y la escasez de datos batimétricos generaba la necesidad de realizar mapas de anomalías gravimétricas combinadas (anomalía de Bouguer en tierra y anomalía de aire libre en mar). Aunado a esto, no se había hecho el intento de aplicar los nuevos estándares en la gravimetría (Hinze *et al.*, 2005) para la generación de nuevos mapas gravimétricos del Caribe.

Así pues, utilizando los modelos combinados de datos gravimétricos, los modelos topográficos de alta resolución,

y considerando los nuevos estándares de la gravimetría, particularmente los conceptos de corrección de Bullard B y corrección atmosférica, este estudio se propone como objetivos: 1) presentar un mapa actualizado de anomalías de aire libre para la región del Caribe, 2) presentar un mapa actualizado de anomalía de Bouguer total para la región Caribe, 3) determinar el aporte de las correcciones atmosférica y Bullard B en estudios gravimétricos a escala regional, y 4) interpretar de forma cualitativa los mapas de anomalías gravimétricas generados.

Fuente de los Datos Gravimétricos

Los datos gravimétricos utilizados fueron extraídos de la compilación publicada periódicamente por el

PALABRAS CLAVE / Anomalías de Aire Libre / Anomalías de Bouguer / Caribe / Corrección Atmosférica / Corrección de Bullard B /

Recibido: 25/05/2011. Modificado: 22/02/2012. Aceptado: 29/02/2012.

Mariano S. Arnaiz-Rodríguez. Ingeniero Geofísico y estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Central de Venezuela (UCV). Dirección: Departamento de Geofísica, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas, Venezuela. e-mail: marianoarnaiz@gmail.com

Yaneth Garzón. Ingeniera y Magister en Geofísica, UCV, Venezuela. Profesora, UCV, Venezuela.

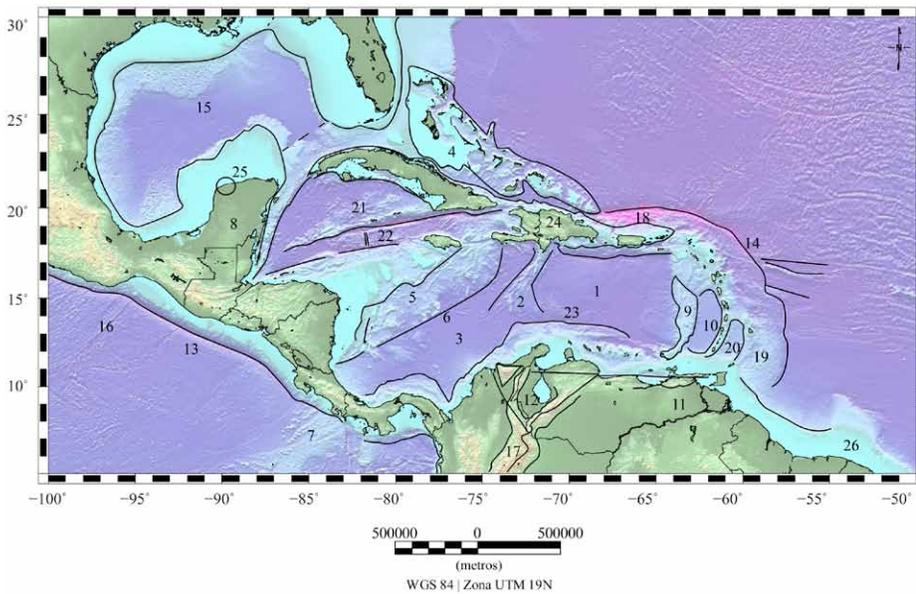


Figura 1. Principales estructuras geológicas de la región del Caribe. 1: Cuenca de Venezuela; 2: Alto de Beata; 3: Cuenca de Colombia; 4: Plataforma de Bahamas; 5: Alto de Nicaragua; 6: Escarpe de Hess; 7: Alto de Cocos; 8: Plataforma de Yucatán; 9: Alto de Aves; 10: Cuenca de Grenada; 11: Cuenca Oriental; 12: Cuenca de Maracaibo; 13: Subducción Cocos-Centroamérica; 14: Subducción de las Antillas Menores; 15: Golfo de México; 16: Alto de Tehuantepec; 17: Andes de Mérida, Cordillera Oriental de Colombia y Sierra de Perijá; 18: Fosa de Puerto Rico; 19: Prisma de Acreción de Barbados; 20: Cuenca de Tobago; 21: Cuenca de Yucatán; 22: Fosa de Caimán; 23: Cinturón deformado del Caribe Sur; 24: Antillas Mayores; 25: Cráter de Chicxulub; 26: Plateau de Demerara. Esta imagen se encuentra más detallada, a colores, en la página www.interciencia.org

Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California, San Diego (UC San Diego, EEUU; Sandwell and Smith, 2009). Se trata de un mallado de estaciones gravimétricas con espaciamiento de un minuto de arco y latitudes entre 80,738N y 80,738S. Para cada una de ellas, se proporcionan las coordenadas en grados, con una resolución de 0,0167° (referenciadas al geoido WGS84), y el dato de gravedad en forma de anomalía de aire libre, con una precisión de 0,1mGal ($1 \times 10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$). El instituto provee además un mallado de topografía con una precisión de 1min, cuyas localizaciones coinciden con las estaciones gravimétricas.

Procesamiento de los Datos Gravimétricos

La metodología general empleada durante el procesamiento se muestra esquematizada en la Figura 2. En primer lugar, la anomalía de Bouguer total fue obtenida al calcular las correcciones Bouguer y topográfica, y sumarlas algebraicamente a los datos de anomalía de aire libre originales; procedimiento que ha sido descrito por diversos autores (Nettleton, 1976; Mironov, 1977; Dobrin y Savit, 1988; Sheriff, 1989; Telford *et al.*, 1992; Blakely, 1996).

Posteriormente, se realizó el cómputo de la corrección atmosférica

ca descrita por Wenzel (1985) para calcular la anomalía de Bouguer con corrección atmosférica (ABatmos). Ésta representa la corrección por la masa atmosférica sobre la estación. Seguidamente, se calculó la anomalía de Bouguer con corrección Bullard B, la cual reduce el efecto de la lámina infinita de Bouguer para un radio en el cual no se puede considerar la Tierra como plana, bajo las consideraciones matemáticas expuestas por LaFehr (1991) y Argast *et al.* (2009). Por último, se calculó la anomalía de Bouguer considerando todos los factores.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de dichas anomalías fueron:

$$AAL = Gobs \pm CAL - Gteo \quad (1)$$

$$ABtotal = Gob \pm CAL \pm CB \pm CT - Gteo \quad (2)$$

$$ABBullard = Gobs \pm CAL \mp CB \pm CBullard \pm CT - Gteo \quad (3)$$

$$ABAtmosf = Gobs \pm CAL \pm CB \pm CT + Catmosf - Gteo \quad (4)$$

$$ABCompleta = Gobs \pm CAL \mp B - CBullard \pm CT + Catmosf - Gteo \quad (5)$$

donde, Gobs: gravedad observada, CAL: corrección de aire libre CB: corrección de Bouguer, CT: corrección topográfica,

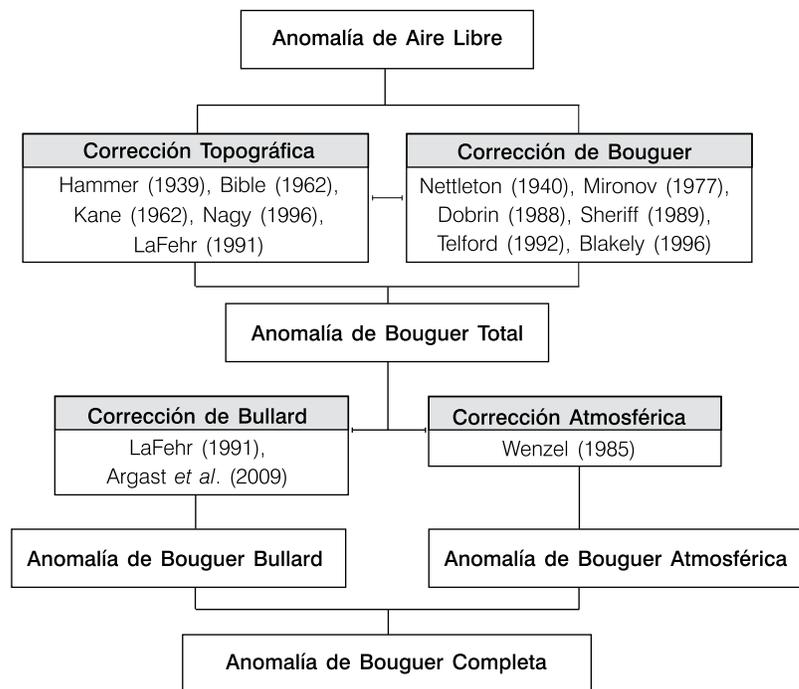


Figura 2. Esquema de procesamiento empleado para calcular la anomalía de Bouguer. A partir de los datos de anomalía de aire libre, se determina la anomalía de Bouguer Total, adicionando algebraicamente la corrección de Bouguer y la corrección topográfica. Se calculan posteriormente los valores de la corrección atmosférica y de Bullard B, los cuales deben ser incluidos en la anomalía de Bouguer total para obtener la anomalía de Bouguer Atmosférica y la anomalía de Bouguer Bullard B, respectivamente. La anomalía de Bouguer completa se obtiene al sumar el efecto de ambas correcciones a la anomalía de Bouguer Total.

CA_{atmosf.}: corrección atmosférica, CB_{bullard}: corrección de Bullard B.

Para los cálculos se consideró como nivel de referencia el nivel medio del mar (0msnm), y se emplearon como densidades de reducción: 2670kg·m⁻³ para la corteza continental y 1030kg·m⁻³ para el agua del mar. Los factores de corrección topográfica fueron calculados utilizando los algoritmos incorporados en el programa Oasis Montaj v.7.1 (Geosoft Inc., 2010), basado en las soluciones expuestas por Hammer (1939), Bible (1962), Kane (1962), Nagy (1966) y LaFehr (1991).

Con el fin de calcular la corrección topográfica, se dividió el área cercana a la estación en tres zonas. La zona 0 será la más cercana a la estación, y representa la corrección por la topografía inmediata a la misma; la zona 1 (dentro de una distancia de 5km) corresponde a la corrección de la topografía local; y finalmente la zona 2 (5-25km), a la corrección de la topografía regional. La atracción debida a la zona 0 se modela con una superficie cercana a la estación en función de los gradientes de la topografía (Kane, 1962); la zona 1 se modela con una serie de prismas (Nagy, 1966); y la zona 2 se modela con aros de sección cuadrada (Kane, 1962). Al sumar las contribuciones de todas las zonas, se obtiene el factor de corrección topográfica para una estación determinada.

Los mapas fueron generados utilizando el software GMT (*Generic Mapping Tool*; Wessel y Smith, 1991). El algoritmo seleccionado para la interpolación fue el de mínima curvatura, el cual es ampliamente usado en las ciencias de la Tierra, pues genera la superficie más suave. Un ligero filtro gaussiano fue aplicado a los mapas para reducir el ruido generado por la interpolación del malla original; el filtro fue aplicado con una longitud de onda de 3,5km, la cual representaba una distancia mínima comparada con la amplitud del área de estudio.

Estadística Elemental de las Anomalías de Bouguer

Una comparación estadística fue llevada a cabo entre las distintas anomalías y correcciones para determinar numéricamente la mejor solución para exponer los problemas de escala regional, desde el punto de vista gravimétrico. La Tabla I muestra los descriptivos básicos correspondientes a la corrección atmosférica y corrección de Bullard B, así como los distintos tipos de anomalías de Bouguer calculados empleando combinaciones de estas correcciones.

En general, la corrección atmosférica muestra valores con media

TABLA I
DESCRIPTIVOS DE LAS CORRECCIONES Y ANOMALÍAS CALCULADAS

Variable	Mínimo (mGal)	Mediana (mGal)	Media (mGal)	Máximo (mGal)	Desv. Est. (mGal)	Varianza (mGal) ²
Corrección atmosférica	0,460	0,870	0,863	0,870	0,028	0,0008
Corrección Bullard	-5,41E-06	7,48E-06	6,10E-06	9,84E-06	3,19E-06	1,02E-11
AB total	-291,460	193,850	178,093	455,290	145,922	21293,000
AB atmosférica	-290,880	194,720	178,960	456,160	145,934	21297,000
AB Bullard	-291,330	193,930	178,178	455,360	145,910	21290,000
AB combinada	-291,000	194,650	178,874	456,080	145,945	21300,000

igual a 0,86mGal y desviación estándar (DS) de 0,028mGal. Estos valores son más significativos en términos de órdenes de magnitud que los calculados para la corrección de Bullard B, cuya media y DS son cercanas a los $6,10 \times 10^{-6}$ y $3,19 \times 10^{-6}$ mGal, respectivamente. Se observa, además, que las variaciones numéricas de los valores de anomalía de Bouguer total, al añadir las correcciones por separado y en conjunto, son casi imperceptibles. Los valores máximos, mínimos y media son análogos en cada caso; muestran que la adición de las nuevas correcciones afecta en una proporción mínima la distribución y cambios en los valores descriptivos. Igualmente, el orden de magnitud que presenta la anomalía de Bouguer total (con media= 178,09 y DS ~145mGal) es superior a los presentados por las correcciones de Bullard B y atmosférica, de manera que es admisible que no tengan ningún impacto en la AB-total, por lo menos a nivel regional. Todos los mapas presentan respuestas gravimétricas similares en términos numéricos (valores de AB) y espaciales (delimitación de estructuras).

Los resultados son consistentes con los presentados por Argast *et al.* (2009), quienes mostraron que la corrección de Bullard B tiene efectos significativos sólo en estudios de microgravimetría, donde las mediciones pueden presentar considerables variaciones en la topografía cada pocos metros, y la precisión requerida es de μ Gal. Tenzer *et al.* (2009) aseguran que las correcciones atmosféricas tienen un valor extremo de -1,8mGal, el cual es siempre constante para zonas oceánicas en donde no es necesario considerarlas. Las correcciones estudiadas y su combinación no representan un aporte importante a las anomalías de Bouguer, por lo tanto, a la presente escala de trabajo pueden considerarse despreciables.

Análisis de las Anomalías de Aire Libre y Bouguer

Mapa de anomalías de aire libre

El mapa de anomalías de aire libre (Figura 3) presenta valores que varían desde los -360mGal hasta un

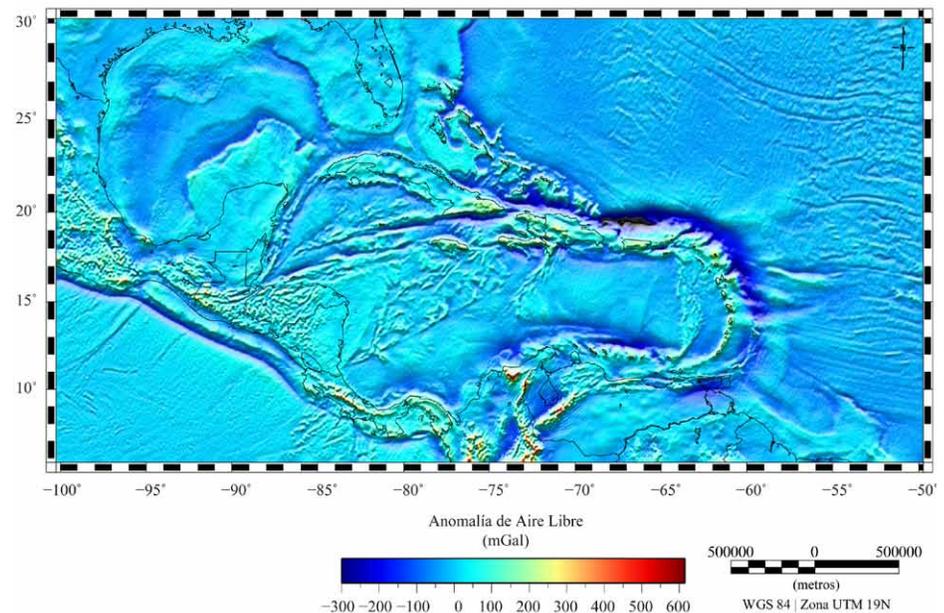


Figura 3. Mapa de anomalía de aire libre. Contornos cada 50mGal. Esta imagen se encuentra más detallada, a colores, en la página www.interciencia.org

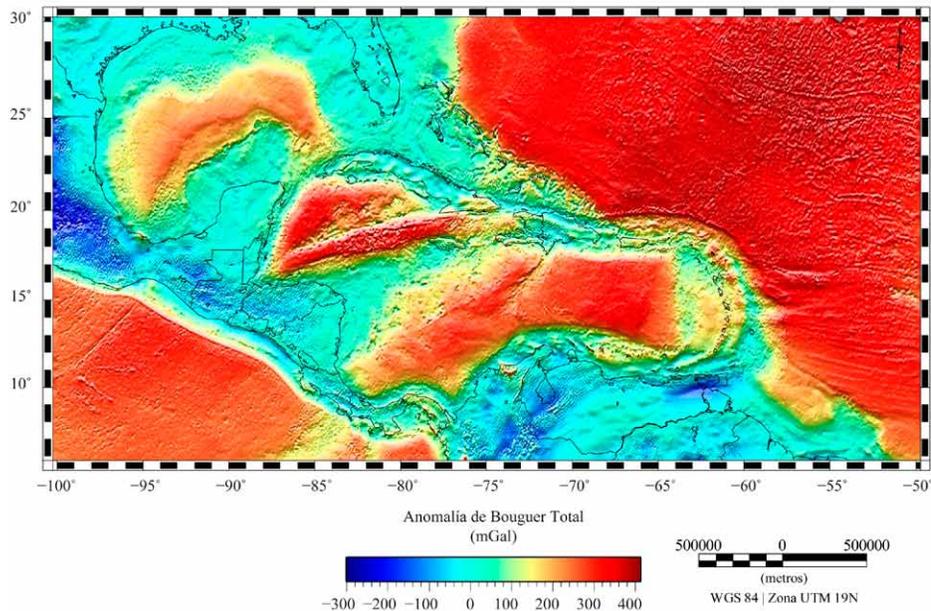


Figura 4. Mapa de anomalía de Bouguer Total. Densidad de reducción= $2670\text{kg}\times\text{m}^{-3}$. Contornos cada 50mGal. Esta imagen se encuentra más detallada, a colores, en la página www.interciencia.org

máximo de 590mGal. Algunas de las estructuras que se encuentran reproducidas en estas anomalías son la Cuenca de Maracaibo, la Cuenca Oriental de Venezuela, la Cuenca de Grenada y el Prisma de acreción de Barbados con valores de gravedad entre los -60 y -200mGal. Destaca el mínimo gravimétrico de anomalía de aire libre exhibido por la Fosa de Puerto Rico y su antearco, que presenta valores inferiores a los -350mGal. Es posible que la subsidencia de éste por encima de los 4000m y un engrosamiento de la corteza en la zona de la fosa contribuyan con este comportamiento (Vegas *et al.*, 2003; ten Brink *et al.*, 2004; Granja *et al.*, 2009). Otros mínimos asociados a sistemas de subducción se pueden observar en la trinchera de la Placa de Cocos y en el Cinturón de Deformación Caribe Sur, donde la profundización del suelo marino genera anomalías de aire libre de valores importantes. A nivel continental sobresalen las anomalías positivas de la Península de Yucatán, Alto de Nicaragua y Plateau de las Bahamas, que vienen posiblemente asociadas a la combinación de una estructura topográfica más densa que las provincias tectónicas aledañas. El resto de los máximos continentales (>100mGal) se encuentra relacionado con los sistemas montañosos que rodean la región.

En general, el mapa de anomalías de aire libre no aporta información en términos interpretativos, más allá de delinear adecuadamente las va-

riaciones topográficas, pues el factor determinante en esta anomalía es la contribución de la elevación y la batimetría, la cual enmascara otros efectos relacionados con la gravedad.

Mapa de anomalías de Bouguer

Las magnitudes de las anomalías de Bouguer total observadas en el mapa presentado (Figura 4) varían ampliamente, desde un valor mínimo de -260mGal hasta un máximo de 420mGal. En general, los valores mínimos se encuentran en las regiones continentales del mapa, mientras que los valores máximos se asocian a corteza oceánica.

Una serie de valores máximos pueden ser observados con una simple inspección visual del mapa. El máximo global (300-400mGal) está asociado con la Placa Atlántica, cuya respuesta gravimétrica es consecuencia de la alta densidad conferida por su constitución litológica (Ughi, 2009) y su poco espesor cortical. Esta estructura exhibe además distintos intervalos de anomalías positivas, que podrían revelar la existencia de cambios laterales significativos de densidades dentro de la placa. Los gradientes gravimétricos en esta zona son de $\sim 5,71\text{mGal}\cdot\text{km}^{-1}$.

Asimismo, la corteza oceánica de la Placa Caribe, una meseta oceánica de espesor anómalo (Ladd y Watkins, 1980; Diebold *et al.*, 1981; Duncan y Hargraves, 1984) que ha sufrido intrusiones de *sills* y flujos basálticos (Kerr

et al., 1997; Meschede y Frisch, 1998), muestra un máximo gravimétrico importante por encima de 22mGal, llegando en algunas zonas a más de 320mGal. Esto se evidencia particularmente en el basamento de la Cuenca de Venezuela, la cual presenta gradientes entre 7 y $10\text{mGal}\cdot\text{km}^{-1}$, y la Cuenca de Colombia, con gradientes de gravedad cercanos a $5\text{mGal}\cdot\text{km}^{-1}$. La respuesta gravimétrica encontrada tiene relación con las densidades y espesores sedimentarios asociados (de edad Cretácico-Plioceno) que han sido depositados sobre un basamento Cretácico (Donnelly, 1994).

Otro máximo que resalta dentro del área caribeña es el asociado al basamento de la Cuenca de retroarco de Yucatán, la cual se encuentra limitada entre la Península de Yucatán, Cuba y la Española. Su apertura se inició en el Cenozoico por la subducción de corteza oceánica bajo Cuba durante su colisión con la plataforma de las Bahamas. Rosenkrantz (1990), utilizando sismica de reflexión, determinó que el basamento de la Cuenca de Yucatán (de tipo oceánico principalmente) contiene porciones de la Península de Yucatán, así como fragmentos de corteza oceánica Preterciaria y fragmentos de un arco volcánico (Alto de Caimán). La complicada configuración basal le otorga a la Cuenca de Yucatán altos valores de anomalía de Bouguer ubicados cerca de los 220mGal debido a su cercanía con una densa y compleja fuente gravimétrica.

La Fosa de Caimán (cuenca *pull-apart* resultante de los esfuerzos en el sistema de fallas Motagua-Polochic) presenta variaciones de espesor cortical entre 5,5 y 9,5km, a lo largo de todo el accidente (ten Brink *et al.*, 2001). Una de las características más resaltantes de esta estructura es la presencia de un pequeño sistema de expansión en su centro, ubicado entre Jamaica y las Islas Caimán (DeMets y Wiggins-Grandison, 2007). La proximidad del basamento y la presencia de corteza relativamente joven hacen que ella sea un accidente gravitacionalmente resaltante debido a su complejidad, presentando altos valores de anomalía de Bouguer, con un promedio de 228mGal, y altos gradientes gravimétricos.

El Alto de Nicaragua posee una anomalía de Bouguer en el orden de unos 90mGal; representa un mínimo local al correlacionarse con la Cuenca de Colombia al sur, con gradientes de gravedad suaves a lo largo del área. La respuesta gravimétrica es evidencia de un espesor cortical mayor al de las cortezas oceánicas típicas, y de una composición más continental que oceánica (Nnaemeka, 1980). Igualmente, se observa, a partir

del mapa, que se trata de una zona de fallas complejas que presentan una compleja respuesta gravimétrica.

El Alto de Aves es una estructura en dirección N-S de ~500km de longitud, que se extiende desde la Isla de La Blanquilla hasta casi llegar a las Antillas Mayores; separa la Cuenca de Venezuela de la Cuenca de Grenada. Es de edad Cretácico Tardío (Mann, 1999) y posee un espesor cortical referido de 30-40km (Boynton *et al.*, 1979; Westbrook y McCann, 1986). Desde el punto de vista gravitacional, resalta en el mapa de anomalía de aire libre como un máximo entre la Cuenca de Grenada y la Cuenca de Venezuela. En el mapa de anomalía de Bouguer total se caracteriza por poseer valores bajos de anomalía en comparación con los del resto de la Placa Caribe (mínimo de 66,74, media de 129,36 y máximo de 222,30), lo que revelaría la existencia de cierto grado de compensación isostática a causa de la presencia de una topografía considerable (AA positiva), con una raíz que genere un contraste de densidades negativo con respecto al manto (anomalía de Bouguer total de valores menores a los de los alrededores). En el mapa se observa, asimismo, la anomalía gravitatoria circular provocada por el meteorito en Chicxulub o Cráter de Yucatán con valores entre los -20 y -10mGal.

El Alto de Beata es una estructura caracterizada como una dorsal asísmica en orientación NE-SO, que separa el este de la Cuenca de Colombia de la Cuenca de Venezuela (Núñez *et al.*, 2010). Posee un ancho que va desde ~100km al norte hasta ~3500km al sur. También divide la localización de espesores normales de corteza oceánica (al oeste) y espesores anómalos (al este) gruesos (20km) o delgados (3-5km; James, 2007). Desde el punto de vista gravitacional, el Alto de Beata tiene un comportamiento similar al del Alto de Aves.

Otra estructura con un máximo característico es la Placa de Cocos, que es la resultante norte de la disociación de la antigua Placa de Farallón en dos (La Placa de Cocos al norte y la Placa de Nazca al sur), hace ~23×10⁶ de años (Meschede y Barckhausen, 2000). Nace en el centro de expansiones Pacífico y Cocos-Nazca, y subduce al encontrarse con Centroamérica (Meschede y Barckhausen, 2000). Presenta una velocidad de movimiento promedio entre 4 y 6,5cm/año (Meschede y Frisch, 1998) y un piso oceánico de edad máxima de 30×10⁶ años. Su valor de anomalía de Bouguer total promedio es de 279mGal, llegando a máximos lo-

TABLA II
DESCRIPTIVOS DE LAS ESTRUCTURAS DEL CARIBE SEGÚN
SUS VALORES DE ANOMALÍA DE BOUGUER

Estructura	Mínimo (mGal)	Mediana (mGal)	Media (mGal)	Máximo (mGal)	Desv. Est. (mGal)	Varianza (mGal) ²
Alto de Beata	180,50	250,40	251,10	292,90	22,28	496,29
Alto de Aves	66,74	129,36	131,88	222,30	15,20	231,19
Antillas Mayores	-76,20	76,91	72,43	203,59	50,67	2567,18
Arcos Antillas Menores	46,65	158,35	154,83	229,69	25,29	639,76
Cordillera Norandina	-175,87	-74,21	-76,09	-8,57	21,28	452,88
Cuenca de Colombia	-9,13	245,38	222,76	305,99	69,12	4777,26
Cuenca de Venezuela	263,40	324,90	322,10	362,70	19,12	365,41
Cuenca de Grenada	90,90	150,60	152,90	198,20	21,19	449,18
Cuenca de Yucatán	-44,30	238,80	224,40	434,00	90,08	8114,60
Escarpe de Hess	-2,27	97,95	100,11	278,02	39,83	1586,29
Placa Cocos	184,90	278,80	279,00	347,00	14,50	210,35
Meseta de Bahamas	-34,35	14,32	17,78	192,55	24,21	586,35
Prisma de Barbados	13,44	97,67	115,28	313,31	64,49	4159,59
Ridge de Cocos	75,13	179,61	186,71	268,40	38,90	1513,36
Ridge de Tehuantepec	182,80	278,60	277,60	316,00	15,43	238,06
Trinchera de Caimán	-2,27	239,62	228,69	434,03	91,73	8414,20
Cuenca de Maracaibo	-167,81	-90,00	-93,41	-44,96	26,04	678,04
Cuenca Oriental de Venezuela	-201,81	-98,78	-102,12	-8,44	42,98	1847,63

cales de más de 340mGal. Los gradientes encontrados en el límite de la Placa rondan los 10mGal·km⁻¹. El comportamiento gravimétrico de la placa de Cocos es similar al de la Placa Atlántica, pero con valores inferiores de anomalía, debido a que su corteza es mucho más joven que la corteza atlántica. Un cálculo simple usando la lámina de Bouguer indica que la Placa Atlántica es ~0,2-0,3g·cm⁻³ más densa que la Placa de Cocos, cuando se encuentra en contacto con la subducción, lo cual se relaciona con el enfriamiento térmico e incremento de la densidad con la edad.

Por otro lado, el Plateau de Demerara muestra valores altos positivos de 150-200mGal, con gradientes cercanos a los 4.5mGal·km⁻¹. La alta respuesta gravimétrica, en términos de valores de anomalía de Bouguer, está asociada con los contrastes de densidad encontradas en esta estructura (sedimentos marinos y rocas basálticas), consecuencia de su generación sobre una corteza continental afectada por un proceso de apertura de edad Paleozoico-Mesozoico temprano, siendo una de las últimas áreas que estuvo en contacto con África occidental durante la apertura del Atlántico ecuatorial (Gouyet *et al.*, 1994).

Por otro lado, los mínimos del mapa de anomalía de Bouguer total se encuentran perfectamente relacionados con las zonas continentales y las de transición. En particular, resaltan las anomalías negativas en México y Centroamérica, las cuales podrían encontrarse referidas a la presencia de la lámina de subducción de la Placa de Cocos bajo el continente centroamericano.

Otra zona resaltante de valores mínimos se encuentra al norte de la Placa Suramericana, en donde la situación isostática-flexural de los Andes (Arnaiz-Rodríguez *et al.*, 2011) y la anomalía gravimétrica que caracteriza la Cuenca Oriental de Venezuela sobresalen con valores aproximados entre -40 y -160mGal y con gradientes de ~8,3mGal·km⁻¹.

Algunas otras estructuras con clara respuesta gravimétrica son: Alto de Cocos, Alto de Tehuantepec, Escarpe de Hess, Cuenca de Grenada, Prisma de acreción de Barbados, Cuenca de Maracaibo y Plateau de Bahamas, cuyos valores estadísticos son expuestos en la Tabla II, al igual que para las estructuras antes señaladas.

Conclusiones

Al examinar los descriptivos estadísticos de las correcciones y anomalías calculadas, se demuestra que las correcciones atmosférica y Bullard B no representan un aporte significativo al mapa final de anomalía de Bouguer total. En términos numéricos la corrección de Bullard B representa una corrección en el orden de 10⁻⁶Gal, lo cual es despreciable en estudios de escala regional, pero podría ser considerada en estudios de micro gravimetría donde tal precisión es requerida. Por otro lado, corrección atmosférica muestra valores en el orden de 10⁻¹Gal, lo cual podría ser útil en estudios de índole local, donde las variaciones esperadas son de pocos mGal, pero aún así despreciables a la escala de trabajo utilizada.

El mapa de aire libre presenta respuestas gravimétricas limitadas en un intervalo entre -300mGal y poco más de 500mGal. Este mapa presenta una alta concordancia con la morfología del área, pues el factor determinante en la anomalía de aire libre es la contribución de la elevación y la batimetría. Las pocas diferencias son representativas de importantes estructuras en el subsuelo; tal es el caso de las cuencas continentales o de la anomalía asociada al cráter de Chicxulub.

El mapa de anomalías de Bouguer total generado muestra magnitudes que varían ampliamente, desde valores por debajo de los -200mGal hasta valores extremos positivos superiores a 350mGal. Comúnmente, los valores mínimos se asocian a las regiones continentales del mapa, mientras que los valores máximos, en particular, guardan correspondencia con la corteza oceánica. Las anomalías negativas más resaltantes están relacionadas con las zonas montañosas y las cuencas continentales, mientras que los máximos más resaltantes se encuentran asociados a las zonas de corteza oceánica delgada. En general, el amplio intervalo de valores encontrados en las anomalías gravimétricas del Caribe evidencia contrastes de densidad importantes en la región, debido a la complejidad tectónica inherente y a las variaciones de espesores corticales.

REFERENCIAS

- Argast D, Bacchin M, Tracey R (2009) An extension of the closed-form solution for the gravity curvature (Bullard B) correction in the marine and airborne cases. *ASEG Ext. Abstr.*: 1-6.
- Arnaiz-Rodríguez MS, Rodríguez-Millán I, Audemard F (2011) Análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela. *Rev. Mex. Cs. Geol.* 28: 420-443.
- Audemard F, Romero G, Rendón H, Cano V (2005) Quaternary faults kinematic and stress tensors along the southern Caribbean from faults-slip data and focal mechanism solution. *Earth Sci. Rev.* 69: 181-223.
- Bachmann R (2001) *The Caribbean Plate and the Question of its Formation*. Institute of Geology. University of Mining and Technology. Freiburg, Alemania. 17 pp.
- Bellizzia A, Pimentel N, Bajo R (1976) *Mapa Geológico-Estructural de Venezuela*. Escala 1:500,000. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Foninves. Caracas, Venezuela.
- Bible J (1962) Terrain correction tables for gravity. *Geophysics* 27: 715-718.
- Blakely R (1996) *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 455 pp.
- Bowin C, Warsi W, Milligam J (1982) *Free-Air Gravity. Anomaly Map and Atlas of the World, Scale 1:4 000000*. Geological Society of America. Map and Chart Series, Mc-46. Boulder, CO, EEUU.
- Boynton C, Westbrook G, Bott M, Long R (1979) A seismic refraction investigation of crustal structure beneath the Lesser Antilles arc. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 58: 371-393.
- Cuevas J, Larrinaga L, González B (2003) Mapas Generalizados de las Anomalías Gravimétricas del Caribe Occidental y América Central. *Memorias Geomin 2003*. La Habana, Cuba 24-28/03/2003. 9 pp.
- DeMets C, Wiggins-Grandison M (2007) Deformation of Jamaica and motion of the Gonâve microplate from GPS and seismic data. *Geophys. J. Int.* 168: 362-378.
- Diebold J, Stoffa P, Buhl P, Truchan M (1981) Venezuelan basin crustal structure. *J. Geophys. Res.* 86: 7901-7923.
- Dobrin B, Savit C (1988) *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill. Singapore. 867 pp.
- Donnelly T (1994) The Caribbean sea floor. En Donovan SK, Jackson TA (Eds.) *Caribbean Geology: An Introduction*. University of the West Indies. Kingston, Jamaica. pp. 41-64.
- Duncan R, Hargraves R (1984) Plate tectonics of the Caribbean region in mantle reference frame. *Mem. Geol. Soc. Am.* 162: 81-93.
- Folinsbee R (1972) *The Gravity Field and Plate Boundaries in Venezuela*. Tesis. Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution. Cambridge, MA, EEUU. 160 pp.
- Garzón Y, Ughi A (2008) Modelado geodinámico por medio del análisis de flexión de placas en la región noroccidental de Venezuela. *XIV Cong. Venez. Geofísica*. Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos. Caracas, Venezuela. 4 pp.
- Geosoft (2010) *Oasis montaj v.7.2.1* (HJ), Standard ed. Geosoft Inc. Toronto, Canadá.
- Gouyet S, Unternehr P, Mascle A (1994) The French Guyana margin and the Demerara Plateau: geologic history and petroleum plays. En Mascle A (Ed.) *Hydrocarbon and Petroleum Geology of France*. Spec. Publ. Eur. Assoc. Pet. Geosci, 4: 411-422.
- Granja J (2005) *Geodinámica del borde Noreste de la Placa Caribe*. Tesis. Universidad Complutense de Madrid. España. 116 pp.
- Granja J, Carbó A, Muñoz-Martín A (2009) *Análisis de Mapas de Anomalías Gravimétricas en el Borde NE de la Placa Caribe*. Reporte técnico. Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. 4 pp.
- Graterol V, Rey C, Briceño L, Cerón J, Vargas C (2008) *Bouguer Total Anomalies Map for Colombia*. www.anh.gov.co/media/infogeologica/bouguer_250_dpi.pdf (Cons. 05/2009).
- Hammer S (1939) Terrain corrections for gravimeter surveys. *Geophysics* 9: 184-194.
- Hinze WJ, Aiken C, Brozena J, Coakley B, Dater D, Flanagan G, Forsberg R, Hildenbrand T, Keller GR, Kellogg J, Kucks R, Li X, Mainville A, Morin R, Pilkington M, Plouff D, Ravat D, Roman D, Urrutia-Fucugauchi J, Véronneau M, Webring M, Winster D (2005) New standards for reducing gravity data: the North American gravity database. *Geophysics* 70: J25-J32.
- James KH (2007) *The Caribbean Ocean Plateau -An Overview, and a Different Understanding*. www.mantleplumes.org/Web-Documents/CaribbeanPlateau.pdf (Cons. 05/2009).
- Kane MF (1962) A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics* 27: 455-462.
- Kerr A, Tarney J, Marriner G, Nivia A, Saunders A (1997) The Caribbean-Colombian Cretaceous igneous province: The internal anatomy of an oceanic plateau. En Mahoney JJ, Coffin MF (Eds.) *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism*. Am. Geophys. Union Monog. 100: 123-144.
- Ladd J, Watkins J (1980) Seismic stratigraphy of the Western Venezuela Basin. *Mar. Geol.* 35: 21-41.
- LaFehr T (1991) An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction. *Geophysics* 56: 1179-1184.
- Mann P (1999) Caribbean sedimentary basins: Classification and tectonic setting from Jurassic to Present. En Mann P (Ed.) *Caribbean Basins. Sedimentary Basins of the World Vol. 4*. Elsevier. Amsterdam, Holanda. pp: 3-31.
- Meschede M, Barckhausen U (2000a) Plate tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center. En Silver EA, Kimura G, Shipley TH (Eds.) *Proc. ODP, Sci. Results 170*: 1-10. College Station, TX, EEUU.
- Meschede M, Frisch W (1998) A Plate tectonic model for the Mesozoic and Cenozoic history of the Caribbean Plate. *Tectonophysics* 296: 269-291.
- Mironov V (1977) *Curso de Prospección Gravimétrica*. Reverté. Barcelona, España. 542 pp.
- Nagy D (1966) The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics* 31: 362-371.
- Nettleton L (1976) *Gravity and Magnetism in Oil Prospecting*. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. 464 pp.
- Nnaemeka N (1980) *Geophysical Investigations of the Nicaraguan Rise*. Tesis. Rutgers University. Newark, NJ, EEUU. 80 pp.
- Núñez D, Córdoba D, Pazos A, Martín-Dávila J, Carbó A, Granja-Bruña JL, Payero J, Cotilla MO (2010) Seismic images of the crust across the Northern Beata Ridge (NE Caribbean). *EGU General Assembly 2010*. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, Viena, Austria. EGU2010-12245.
- Pindell J, Barrett S (1990) Geological evolution of the Caribbean region: a plate tectonic perspective. En Dengo G, Case J (Eds.) *The Geology of North America, Vol. H. The Caribbean Region*. Geological Society of North America. Boulder, CO, EEUU. pp. 405-432.
- Rosencrantz E (1990) Structure and tectonics of the Yucatan Basin, Caribbean Sea, as determined from seismic reflection studies. *Tectonics* 9: 1037-1059.
- Sandwell DT, Smith WHF (2009) Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate. *J. Geophys. Res.*, 114, B01411, doi:10.1029/2008JB006008.
- Sheriff R (1989) *Geophysical Methods*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ, EEUU. 605 pp.
- Sisson V, Avé Lallemand H, Ostos M, Blythe A, Sneek L, Copeland P, Wright J, Donelick, R,

- Guth L (2005) Overview of radiometric ages in three allochthonous belts of northern Venezuela: Old ones, new ones, and their impact on regional geology. En Lallemand A, Sisson VB (Eds.) *Caribbean / South American plate interactions, Venezuela. Geol. Soc. Am. Special Papers 394*: 91-117.
- Soulas JP (1986) Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas, *Mem. VI Cong. Geol. Venez. 10*: 6639-6656.
- Telford W, Geldart L, Sheriff R (1992) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 770 pp.
- ten Brink US, Coleman DF, Dillon WP (2001) Asymmetric seafloor spreading: crustal thickness variations and transitional crust in Cayman Trough from gravity. *GSA Annual Meeting*. Boston, Massachusetts. Abstract, Paper N° 63-0.
- ten Brink US, Danforth W, Polloni C, Andrews B, Llanes P, Smith S, Parker E, Uozumi T (2004) New seafloor map of the Puerto Rico Trench helps assess earthquake and tsunami hazards. *Eos 85*: 349-360.
- Tenzer R, Vajda P, Hamayun (2009) Global atmospheric corrections to the gravity field quantities. *Contrib. Geophys. Geodesy 39*, 3: 221-236.
- Ughi A (2009) *Modelado Geofísico Integrado en la Zona de Subducción Activa del Arco de Islas de las Antillas Menores*. Tesis. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 101 pp.
- Vegas R, Muñoz-Martín A, Carbó A, Vázquez J (2003) A neotectonic model for Puerto Rico. *Seismol. Res. Lett. Abstr. 74*: 231.
- Wenzel H (1985) Hochoauflösende Kugelfunktionsmodelle für das Gravitationspotential der Erde. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover. Wiss. Arb. 137*. Universidad de Hannover, Alemania. 155 pp.
- Wessel P, Smith W (1991) Free software helps map and display data. *EOS Trans. 72*: 441.
- Westbrook GK, McCann WR (1986) Subduction of Atlantic lithosphere beneath the Caribbean. En Vogt PR, Tucholke BE (Eds.) *The Geology of North America, Vol. M: The Western North Atlantic Region*. Geological Society of America. Boulder, CO, EEUU. pp. 341-350.

NEW MAPS OF GRAVIMETRIC ANOMALIES IN THE CARIBBEAN

Mariano S. Arnaiz-Rodríguez and Yaneth Garzón

SUMMARY

Free-air anomaly maps and total Bouguer anomaly maps are presented for the Caribbean region, obtained from the gravimetric compilation published by the Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego. The total Bouguer anomaly is calculated and atmospheric and Bullard B corrections are included to verify their importance in regional scale studies. Upon reviewing the statistical descriptors of the corrections and the calculated anomalies, no significant qualitative or quantitative contribution is observed. The corrections may therefore be discarded for regional scale studies. This map shows a wide range of anomalies, from -260 to 420mGal. In

general, the minimum values are related to continental regions, while the maximum ones are associated to the oceanic crust (Atlantic Plate, oceanic crust of the Caribbean Plate, Yucatan Basin, Venezuelan Basin and the Cocos Plate). Negative anomalies stand out in Mexico, Central America, the North of South American plate and the Venezuelan Eastern Basin. The free air anomaly map displays an anomaly range from -360mGal to 590mGal. Some of the structures that are clearly represented by the anomalies of the vertical gradient are the Maracaibo, Eastern Venezuela, Grenada, Colombia and Venezuela basins, and the Aves Ridge.

NOVOS MAPAS DE ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS DO CARIBE

Mariano S. Arnaiz-Rodríguez e Yaneth Garzón

RESUMO

Apresentam-se os mapas de anomalia de ar livre e anomalia Bouguer do Caribe, gerados a partir de dados extraídos da compilação gravimétrica publicada periodicamente pelo Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego. A partir deles, se calcula a anomalia Bouguer total, à qual se incorporam as correções atmosféricas e de Bullard B, com o fim de verificar seu aporte para estudos regionais. Ao examinar os descritivos básicos das correções e as anomalias calculadas não se observam, em termos numéricos e qualitativos, aportes significativos das novas correções ao mapa final de anomalia Bouguer total, por tanto podem ser consideradas de valor desprezíveis na escala estudada. Este mapa mostra magnitudes, que variam em um amplo intervalo; desde -260mGal até um

máximo de 420mGal. Em geral, os valores mínimos se encontram nas regiões continentais do mapa, enquanto que os valores máximos são associados à crosta oceânica (Placa Atlântica, crosta oceânica da Placa Caribe, Bacia de Yucatán, Bacia de Venezuela e Placa de Cocos). Destacam as anomalias negativas no México e Centro América, norte da Placa Sul Americana e Bacia Oriental de Venezuela. O mapa de ar livre a escala apresenta valores desde -360mGal até 590mGal. Algumas das estruturas que se encontram reproduzidas com bastante fidelidade pelas anomalias de gradiente vertical são as bacias de Maracaibo, Oriental de Venezuela, Grenada, Colombia, Venezuela e Alto de Aves.