

# Análisis de Mapas de Anomalías Gravimétricas en el Borde NE de la Placa Caribe

## *Anomaly Gravity Maps Analysis in the North-Eastern Caribbean Plate Boundary Zone*

Granja, J. L., Carbó, A. & Muñoz-Martín, A.

Grupo de Tectonofísica Aplicada. Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. C/Jose Antonio Novais, s/n, 28040, Madrid, Spain. [jlganja@geo.ucm.es](mailto:jlganja@geo.ucm.es)

### SUMMARY

*Along the Eastern Greater Antilles (Hispaniola and Puerto Rico area) takes place the interaction between the Caribbean and North-American plates. This interaction produced inside a broad band of deformation with a complex and active tectonics. Here, many tectonic models have been proposed: strain partitioning, microplates tectonics, oblique subduction, opposing subducted slabs, crust arching, and tear fault in the downgoing plate. Except the seismological data that provide a general idea about the disposition of the lithospheric plates in depth, the most of models has been proposed from geodetic data (GPS), geological surface data (onland and onsea) and reflection seismic data, so the models are constrained only in the superficial crust.*

*In this survey, an analysis of anomaly gravity maps is presented. Those maps have been realized from the gravity data acquired during the PRICO (1997) and GEOPRICO-DO (2005) marine geophysical surveys, on-land data and satellite gravity data. In the maps analysis we emphasize the extreme values of Bouguer gravity anomaly (-400 mGals) located in the oceanic crust of the North American plate and the maximum free air gravity anomaly of the Earth (-350 mGals) located in the Puerto Rico Trench. This analysis, integrated with geomagnetic, seismologic and deep seismic sounding data is the way to approach the study of deep crust and to can elaborate lithosphere models constrained in depth.*

### 1. INTRODUCCIÓN.

En los meses de marzo y abril de 2005 se llevó a cabo la campaña de geología y geofísica marina GEOPRICO (REN2003-05-8520) en aguas de Puerto Rico, República Dominicana e Islas Vírgenes Británicas. En dicha campaña se adquirieron, además de datos de sismica multicanal, sismica profunda, batimetría multihaz y Topas, datos de geomagnetismo y gravimetría.

En este estudio se han utilizado los datos gravimétricos de dicha campaña más los de la campaña PRICO (1997), datos de satélite y datos de tierra de Puerto Rico, para obtener mapas de anomalías gravimétricas en el noreste de la placa Caribe y realizar sobre ellos un análisis general semi-cuantitativo.

### 2. CONTEXTO TECTÓNICO

La zona de estudio se sitúa en la esquina noreste de la placa Caribe, donde según el movimiento relativo entre placas se produce la subducción de la placa Norteamericana debajo de la placa Caribe. En esta zona el modelo neotectónico más aceptado es el que propone una tectónica en microplacas o bloques tectónicos dentro de un ancho y difuso límite de placas junto con una doble subducción con polaridad opuesta (Mann *et al*, 2002)(Figura 1).

La placa Caribe actualmente presenta un movimiento de 18-20 mm/año en dirección N70°E con respecto a la placa Norteamericana (Mann *et al*, 2002). Dicho movimiento origina la subducción de la placa Norteamericana debajo de la placa Caribe y la formación del arco volcánico de las Antillas Menores (Figura 1). Este proceso de subducción, en la Fosa de Puerto Rico se produce de forma muy oblicua (10°) y está acompañado por el desarrollo de sistemas de desgarres sinestrales de cientos de Km a lo largo del antearco (e. g. Falla de *Bunce, ten Brink et al*, 2004) y además de zonas transpresivas (e.g *Main Ridge*) y transtensivas.

En el noreste de La Española, el límite de placas principal se desvía hacia el noroeste como consecuencia de la entrada en la zona de subducción de los bancos carbonatados de las Bahamas (Dolan & Mann, 1998) (Figura 1). Estos bancos se han formado sobre la corteza oceánica de la placa Norteamericana, y se comportan como asperezas tectónicas que dificultan o impiden el proceso de subducción normal en su zona de influencia.

Al sur de las islas, donde en condiciones normales estaría desarrollada una zona de trasarco, aparece la Fosa de los Muertos (>5600 m, Carbó *et al*, 2005) (Figura 1) en la cual se esta produciendo la subducción de la corteza oceánica de la Cuenca de Venezuela hacia el noreste debajo del arco de islas dando lugar al

prisma de acreción o cinturón deformado de Los Muertos (Ladd *et al*, 1977; Byrne *et al*, 1985, Manson & Scanlon, 1991; Carbó *et al*, 2005). La subducción o infracabalgamiento es más activo en el sureste de La Española (3 mm/año, Calais *et al* (2002)) y se atenúa o desaparece hacia el este (Manson & Scanlon, 1991; Carbó *et al*, 2005).

La Fosa de los Muertos al sureste de La Española, se desvía hacia el NO, se someriza bruscamente y desaparece, aunque Biju-Duval *et al* (1982) sugieren su continuidad con la Zona de Falla de Enriquillo-Plantain Graden (Figura 1). Tal relevo estructural es debido a la Cresta de Beata, la cual es un cuerpo transversal al arco-isla y se comporta de forma más rígida produciendo la indentación hacia el NE en la isla de La Española (Mauffret & Leroy, 1999). Hacia el E, la depresión de la Fosa de los Muertos también se estrecha y someriza pero de forma más gradual y termina bruscamente contra la Cresta de Aves (Figura 1). El proceso de concurrencia es reemplazado por desgarres sinestrales con tendencia NE que dan lugar a la formación de la Cuenca de las Islas Vírgenes, la zona transtensiva de Anegada y la Cuenca de Sombrero, y posiblemente lleguen hasta la Fosa de Puerto Rico (Manson & Scanlon, 1991). Estas estructuras nos marcarían un límite tectónico entre las Antillas Mayores y las Antillas Menores.

Entre ambas zonas de subducción con polaridad opuesta, se enfrentan e interaccionan en profundidad las placas y se desarrolla una tectónica en microplacas o bloques tectónicos: Microplaca de Gonave (Mann *et al*, 1990), Microplaca de La Española (Byrne *et al*, 1985) y Bloque de Puerto Rico-Islas Vírgenes (Jansma *et al*, 2000) (Figura 1). Los límites entre las distintas unidades tectónicas siguen dando lugar a controversia, bien por falta de datos o por su carácter difuso o transicional (Carbó *et al*, 2005).

La isla de La Española esta atravesada longitudinalmente por sistemas de desgarres que controlan la estructura de la isla. En el norte tenemos la Falla Septentrional y en el sur la falla de Enriquillo (Figura 1).

Entre la isla de La Española y Puerto Rico se desarrolla el sistema de *rift* de Mona que acomoda el movimiento diferencial entre ambas islas y definiría el límite entre la microplaca de La Española y el bloque de Puerto Rico (Manson & Scanlon, 1991) (Figura 1). En nuestra zona de estudio el Bloque de Puerto Rico-Islas Vírgenes estaría limitado en el norte por la Fosa de Puerto Rico, en el oeste por el *Rift* de Mona, en el sur por la Fosa de los Muertos y en el este por el sistema de transtensivo de Anegada

(Manson & Scanlon, 1991) (Figura 1). Consecuencia del activo y complejo contexto tectónico tiene lugar una alta sismicidad, fuertes gradientes batimétricos y extremas anomalías gravimétricas.

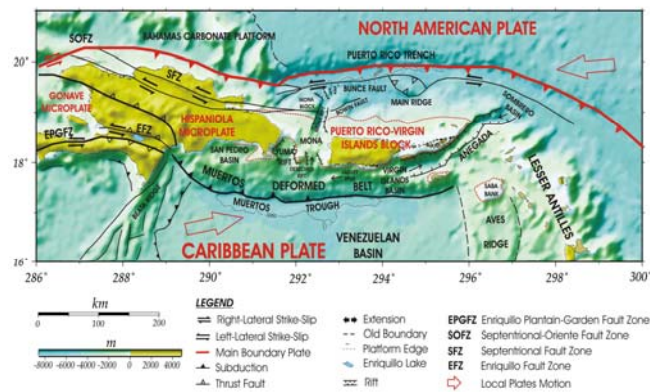


Figura 1 - Marco tectónico del borde noreste de la placa Caribe. (Tectonic setting of North-Eastern Caribbean Plate Boundary Zone.)

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA.

Para este estudio se han utilizado datos gravimétricos de anomalía de aire libre y anomalía de Bouguer a partir de:

-Datos de satélite; ERS-1, Geosat y Topex con cobertura de todo el área de estudio (Sandwell & Smith, 1998). Espaciado de adquisición aproximado 3.5 Km.

-Datos de barco; adquiridos por el B.I.O. Hespérides en las campañas PRICO (noreste de Puerto Rico e Islas Vírgenes, 1997) y GEOPRICO (sur de Puerto Rico y República Dominicana y en el noreste de Puerto Rico e Islas Vírgenes, 2005) (Figura 2). Espaciado de adquisición entre 25 y 50 m según líneas de navegación.

-Datos de tierra; 400 estaciones gravimétricas de tierra en Puerto Rico proporcionadas por el U.S.G.S. (Figura 2).

Para la realización de los mapas se ha procedido a la integración de los datos procedentes de las distintas fuentes con el fin de obtener mallas regulares de anomalías gravimétricas.

Los datos de satélite y de tierra han sido tomados según los proporcionan las distintas fuentes, sin embargo los datos de barco los hemos procesado desde el formato bruto de adquisición hasta obtener los datos de anomalías corregidos y filtrados. Posteriormente se realiza una corrección del fondo oceánico para las anomalías de Bouguer mediante el programa LANZADAF (procedimiento de Carbó et al, 2004) de tal modo que obtenemos el valor de anomalía de Bouguer Completa.

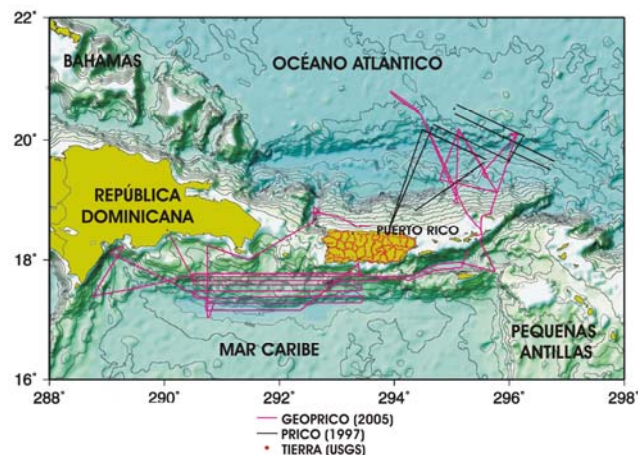


Figura 2 - Localización de los distintos fuentes de datos: Barco (líneas moradas y negras), tierra (puntos rojos en Puerto Rico) y satélite (todo el área). (Location of different data sources: Shipboard (pink and black lines), on-land (red dots on Puerto Rico) and satellite (overall area).)

Una vez que tenemos una malla regular de anomalía de Bouguer, sobre ella se realizan operaciones matemáticas de

primera derivada y de segunda derivada (Blakely, 1995) con el fin de resaltar las anomalías de corta longitud de onda que quedan enmascaradas por las anomalías regionales de mayor longitud de onda y debidas generalmente a cuerpos más profundos.

## 3. RESULTADOS.

A partir de los datos de anomalías de aire libre y Bouguer se han realizado e interpretado cuatro mapas de anomalías gravimétricas: mapa de anomalías de aire libre, mapa de anomalía de Bouguer, mapa de primera derivada de anomalías de Bouguer y mapa de segunda derivada de anomalías de Bouguer.

### -Mapa de anomalías de aire libre (Figura 3).

Por definición las anomalías de aire libre registran el gradiente vertical de gravedad por lo que imitan con bastante fidelidad la batimetría y los gradientes batimétricos. Se pueden observar fuertes anomalías negativas en la Fosa de Puerto Rico (-380 mGales), en la Fosa de los Muertos (-100 mGales), en la Fosa de La Española (-240 mGales) y en la Cuenca de Sombrero (-240 mGales) y anomalías positivas los Bancos de las Bahamas (150 mGales), y el arco de islas (200 mGales).

Es destacable el máximo de anomalía negativa de aire libre que produce en el antearco de la Fosa de Puerto Rico con un valor de -380 mGales, se trata de la mayor anomalía gravimétrica de la Tierra. Curiosamente este máximo no coincide con la mayor profundidad de la fosa (8340 m, máxima profundidad del Océano Atlántico), sino que se sitúa en la zona del antearco, 50 Km al sur de la traza de la fosa (Figura 1). Esto puede ser debido a la gran subsidencia del antearco (> 4000 m) y a que en este punto la corteza esté más engrosada que en la zona de la fosa (ten Brink et al, 2004, Vegas et al, 2003).

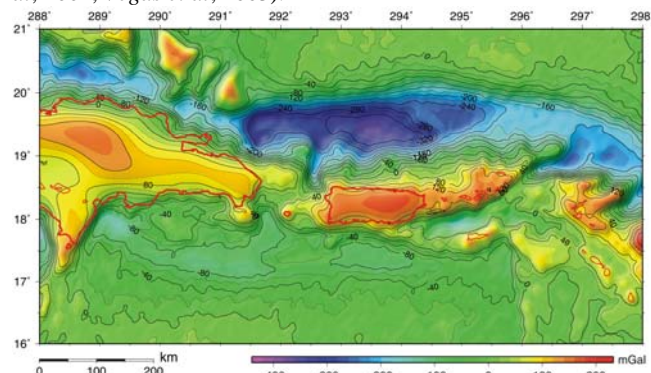


Figura 3 - Mapa de anomalías de aire libre. Contornos cada 20 mGales. (Free air anomaly map. Contour interval 20 mGals.)

### -Mapa de anomalía de Bouguer (Figura 4).

Como primera aproximación se diferencian tres grandes zonas de anomalías separadas por dos fuertes gradientes. Un gradiente al norte del arco-isla de 120 mGales y otro al sur con 140 mGales. Estas tres zonas se corresponden con la corteza oceánica s.s de la placa Norteamericana, la zona del arco-isla/Banco de las Bahamas y la corteza oceánica intraplaca de la placa Caribe (Figura 1).

Las diferentes anomalías generadas entre la placa Norteamericana (valores superiores a los 400 mGales) y la placa Caribe (350 mGales) pueden ser debidas a su distinto origen y evolución tectónica. La placa Norteamericana se ha generado en la dorsal Centro-Atlántica y a la altura de Puerto Rico presenta una edad cretácica, se trata de una corteza adelgazada y evolucionada, con escasa cobertera de sedimentos y el Moho se ha estimado a una profundidad de 10 Km (Talwani et al, 1959). La placa Caribe se considera como una meseta oceánica (oceanic plateau) generada en el hot spot de las Galápagos en el Jurásico (Pindell & Dewey, 1982) y en su evolución hasta su posición actual ha sufrido masivas y extensas intrusiones a modo de sills y flujos basálticos que la han engrosado y modificado su composición de manera que es menos densa que una corteza oceánica s.s., además en algunas zonas se han medido una

cobertera sedimentaria de 2 Km de espesor (Ladd et al, 1977) lo cual disminuye su densidad.

Dentro de la zona del arco-isla y los bancos de las Bahamas las anomalías son de menor longitud de onda. Se pueden identificar las generadas por los bancos carbonatados de las Bahamas cuyos gradientes marcan groseramente el contorno de los bancos carbonatados que en ocasiones llegan a emerger. Aquí la corteza está engrosada por estos bancos alcanzando espesores corticales de 22-27 Km (Mann et al, 1999) con lo cual las anomalías son menores (280 mGals).

Donde la placa norteamericana entra en la zona de subducción se aprecian unas anomalías de corta longitud de onda orientadas este-oeste generadas por pequeñas cuencas este-oeste rellenas de sedimentos y formadas a favor de grabens y semigrabens como consecuencia de la flexión de la placa al subducir debajo del arco (ten Brink et al, 2004).

Dentro del antearco de la Fosa de Puerto Rico se aprecian máximos relativos que se corresponden con montes submarinos de origen transpresivo (Main Ridge) y mínimos relativos que se corresponden con cuencas pull-apart con relleno sedimentario.

Entre las islas de La Española y Puerto Rico se identifican las anomalías de corta longitud de onda causadas por el Rift de Mona (límite entre la microplaca de La Española y el bloque de Puerto Rico- Islas Vírgenes), el bloque de Mona (prolongación sureste del banco de las Bahamas) y los rift de Yuma y Desecheo (Figura 1). Al sur de La Española se identifican los gradientes noreste-suroeste correspondientes a la cresta asímica de Beata. La zona de subducción de las Antillas Menores y su arco extinto (Cresta de Aves) (Figura 1). Al este de Puerto Rico se observan las anomalías noreste-suroeste del Paso de Anegada y las este-oeste de las cuencas de Islas Vírgenes y Sombrero (Figuras 1 y 4).

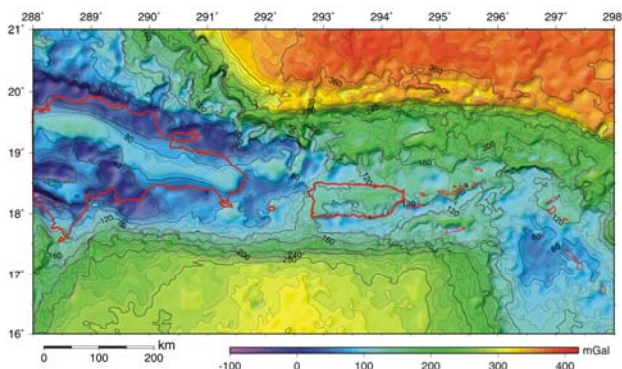


Figura 4 – Mapa de anomalías de Bouguer. Contornos cada 10 mGals. (Bouguer anomaly map. Contour interval 10 mGals).

**-Mapa de 1ª derivada vertical de anomalía de Bouguer (Figura 5).**

Esta operación matemática se aplica sobre la malla original de anomalías de Bouguer y obtenemos un equivalente a un mapa de anomalías residuales. Esta operación nos permite acentuar y mejorar las anomalías de alta frecuencia o de baja longitud de onda debidas generalmente a fuentes someras que quedan enmascaradas por las anomalías de larga longitud de onda (regionales) que son debidas generalmente a fuentes más profundas. En la figura se han marcado con trazo discontinuo algunos máximos y los mínimos sobre la malla de primera derivada vertical, que nos marcan el punto de inflexión en la malla original con lo cual nos están indicando donde se produce el contacto entre cuerpos superficiales con alto contraste de densidad. Se identifican las alineaciones este-oeste correspondientes a la Fosa de Puerto Rico, Fosa de La Española y a la Fosa de los Muertos donde se produce el contacto entre la corteza oceánica con el relleno sedimentario de la fosa y la zona deformada del antearco. También caben destacar alineaciones de menor entidad: noroeste-sureste correspondientes con la fábrica estructural de la isla de La Española, noreste-suroeste en la cresta

asísmica de Beata, noreste-suroeste zona transtensiva de Anegada y norte-sur en el rift de Mona.

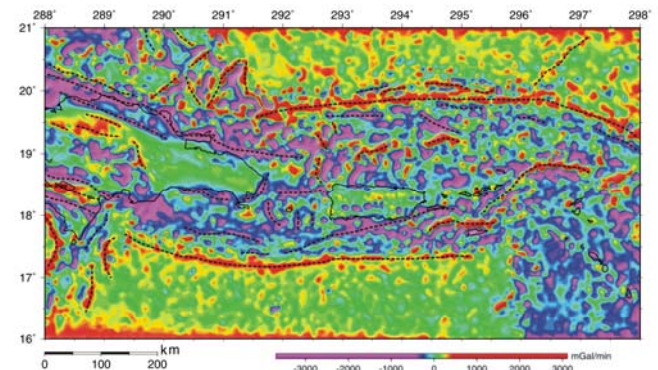


Figura 5 – Mapa de 1ª derivada de anomalías de Bouguer. (First Derivative of Bouguer anomaly map).

**-Mapa de 2ª derivada vertical de anomalía de Bouguer (Figura 6).**

Esta operación matemática también se aplica sobre la malla original de anomalías de Bouguer y mejora las anomalías residuales causadas generalmente por cuerpos someros. La principal propiedad de los mapas de segunda derivada vertical de anomalías de Bouguer es que donde su valor es cero nos están indicando el punto de inflexión en la maya original, luego nos marca exactamente el contacto entre cuerpos superficiales con alto contraste de densidad. Se trata pues de una buena herramienta a la hora de realizar una cartografía estructural ya que se pueden identificar discontinuidades que nos pongan en contacto cuerpos con alto contraste de densidad. En la figura se han marcado con trazo discontinuo las zonas con el valor cero o próximo a cero y se puede observar una correlación directa entre determinados gradientes y las distintas unidades tectónicas (ver figura 1). Destacan, se identifica la zona de cuencas este-oeste formadas en la zona de la flexión de la placa al entrar en la Fosa de Puerto Rico (Figura 1), la Fosa de los Muertos marca el contacto entre la Cuenca de Venezuela y el cinturón deformado de Los Muertos. Se identifican las fábricas y dominios estructurales de la cresta de Beata, los bancos carbonatados de las Bahamas, el sistema de rift de Mona, la zona transpresiva del Main Ridge, la zona transtensiva de Anegada, los desgarres sinestrales dentro de La Española, los dominios estructurales dentro de Puerto Rico y la fallas del antearco de la Fosa de Puerto Rico (Fallas de Bowin y de Bunce (Figura 1).

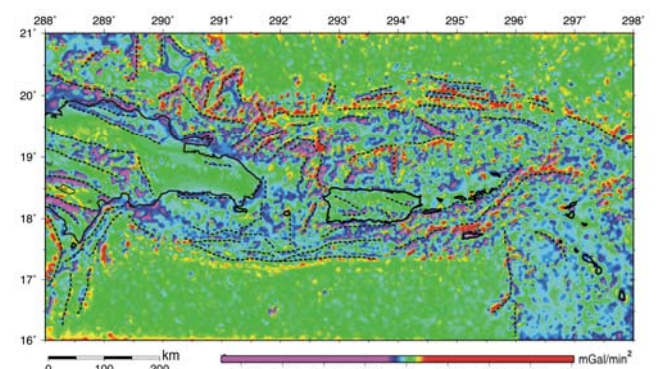


Figura 6 – Mapa de 2ª derivada de anomalías de Bouguer. (Second Derivative of Bouguer anomaly map).

**4. CONCLUSIONES.**

Las anomalías gravimétricas presentan elevados valores positivos y negativos lo que refleja elevados contrastes de densidad a escala cortical y litosférica, así como posibles desequilibrios isostáticos.

Las mayores anomalías de Bouguer en la corteza oceánica de la placa Norteamericana respecto a la placa Caribe, son

consecuencia de su mayor densidad y antigüedad, fruto de su distinto origen y evolución tectónica.

Dentro del arco-isla las anomalías son de menor longitud de onda y presentan una clara correlación con la estructura cortical más superficial.

Los mapas de 1ª derivada vertical acentúan las anomalías de alta frecuencia generadas por cuerpos someros, que quedan generalmente enmascaradas por las anomalías regionales. Lo cual nos ha permitido identificar fuentes superficiales que en la malla original pasan desapercibidas.

Los mapas de 2ª derivada vertical nos marcan los contactos entre cuerpos superficiales con alto contraste de densidad. Luego son una herramienta complementaria para la cartografía de los dominios estructurales de la corteza superior.

## AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos la ayuda durante la campaña GEOPRICO a la tripulación del B.I.O. Hespérides y a los técnicos de la Unidad de Tecnología Marítima. El proyecto Geoprigo está financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (REN2003-08520). Agradecemos a la Universidad Complutense de Madrid por la beca a D. Jose Luis Granja Bruña. Las figuras han sido generadas mediante GMT (Generic Mapping Tools) (Wessel and Smith, 1998).

## 5. REFERENCIAS.

- Biju-Duval, B; Bizon, G; Mascle, A; Muller, C. (1982). *Active margin processes: field observations in southern Hispaniola. AAPG Memoir*, vol.34, pp.325-344pp.
- Byrne, D.B., Suarez, G., McCann, W.R., (1985). *Muertos Trough subduction, microplate tectonics in the northern Caribbean?. Letters to Nature*. Vol: 317, 420-421 pp.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge Univ. Press. 448p.
- Calais, E., Mazabraud, Y., Mercier de Lepinay, B., Mann, P., Mattioli, G., Jansma, P., (2002) *Strain partitioning and fault slip rates in the northeastern Caribbean from GPS measurements. Geophysical Research Letters*, Vol: 29, N° 18.
- Carbó, A., Muñoz Martín, A., Llanes, P., Alvarez, J & ZEE Working Group.(2003). Gravity analysis offshore the Canary Islands from a systematic survey. *Marine Geophysical Research*.24:113-127.
- Carbó, A., Córdoba, D., Martín Dávila, J., ten Brink, U., Herranz, P., Von Hillebrandt, C., Payero, J., Muñoz Martín, A., Pazos, A., Catalán, M., Granja, J. L., Gómez, M. & GEOPRICO-DO Working Group. (2005). *Morphotectonic analysis of the Muertos Deformed Belt (NE Caribbean)*. Abstract to Joint Earth Science Meeting: Thrust Belts and Foreland Basins. 62-63.
- Carbó, A., Córdoba, D., Martín Dávila, J., ten Brink, U., Herranz, P., Von Hillebrandt, C., Payero, J., Muñoz Martín, A., Pazos, A., Catalán, M., Granja, J. L. & Gómez, M. (2005). *Survey Explores Active Tectonics in Northeastern Caribbean*. EOS, Am. Geophys. U. 86 (51): 537,540.
- Dolan, J. F., Mullins, H. T., Wald, D. J., (1998). *Active tectonics of north-central Caribbean: Oblique collision, strain partitioning, and opposing subducted slabs. Special Paper, Geological Society of America*, Vol: 326, 1-62pp.
- Ladd, W. J., Worzel, J. L., Watkins, J. S., (1977). *Multifold seismic reflections records from the northern Venezuela basin and the north slope of muertos trench. Marine Science Institute. University of Texas*, 41-56.
- Mann, P. (Ed), (1999). *Caribbean Basins*. Elsevier Science B.V. CARIBBEAN BASINS OF THE WORLD. Series Editor: K. J. Hsü. 4, 699.
- Mann, P., Calais, E., Ruegg, J-C., DeMets, C., Jansma, P. E., (2002). *Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. Tectonics*, 2(6), 26pp.
- Mann, P. (Ed), (1999). *Caribbean Sedimentary Basins: Classification and Tectonic Setting from Jurassic to Present*. Elsevier Science B.V. Caribbean basins of the world, 4, Hsü. K. J. (Series Ed.) 699 pp.
- Masson, D.G. & Scanlon, K. M., (1991). *The neotectonic setting of Puerto Rico. Geological Society of America Bulletin*, Vol: 103, 144-154.
- Maufret, A., Leroy, S. (1999). *Neogene intraplate deformation of the Caribbean plate and the Beata Ridge. Caribbean Sedimentary Basins: Classification and Tectonic Setting from Jurassic to Present*. Mann, P. (Ed.).627-669.
- Nettelton, L. L. (1976). *Gravity and Magnetics in oil exploration*. New York, Mac Graw-Hill.
- Pindell, J. L. & Dewey, J. F., (1982). *Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region. Tectonics*, Vol: 2, 179-211pp.

-Sandwell, D. T. & Smith W. H. F., (1997). *Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. Journal of Geophysical Research*, Vol:102, B5, 10039-10054pp.

-Talwani, M., Sutton, G., Worzel, J. (1959). *A crustal section across the Puerto Rico Trench. Jour. of Geophys. Res.* 64:10 1545-1555.

-ten Brink, U., Danforth, W., Polloni, C., Andrews, B., Llanes, P., Smith, S., Parker, E., Uozumi, T., (2004). *New sea floor reveals the structure of the Puerto Rico Trench and helps assess earthquake and tsunami hazards in the Northeast Caribbean. Eos, Trans. Amer. Geophys. U.* Vol: 85(37). 349.

-Vegas, R., Muñoz-Martín, A., Carbó, A., Vazquez J.T.(2003). *A neotectonic model for Puerto Rico. Seismological Research Letters, Abstracts* 74:2, 231.

-Wessel, P. & Smith, W. H. F., (1998). *New, improved version of Generic Mapping Tools released. Eos, Trans. Amer. Geophys. U.* Vol: 79(47). 579.