

Uso del GPR como herramienta para la búsqueda de fallas activas: calibración con un afloramiento cuaternario

*Reinaldo Ollarves**, *Franck Audemard*, *FUNVISIS*; *Carla Sánchez*, *Universidad Simón Bolívar*; *Pedro Camacho*, *Universidad Central de Venezuela*; *Aldo Cataldi* y *Frank Zambrano*, *TRX Consulting*.

Resumen

Se adquirieron diversos perfiles GPR en el tope de un afloramiento cuaternario con deformaciones activas, para así determinar la precisión que se puede obtener a través de los radargramas adquiridos, en la ubicación de fallas activas.

Se reconocieron diversas fallas en los radargramas, al igual que la actitud de la estratificación, las cuales fueron confirmadas a través del estudio detallado del afloramiento.

Las litologías finas (arcilitas) al igual que la diferencia de empaquetamiento y compactación de las litologías presentes en el afloramiento en estudio, atenuaron las señales del radar, permitiendo poca penetración en los perfiles (10 m de profundidad con la antena de 50 Mhz). Sin embargo, ésta profundidad fue suficiente para visualizar los primeros metros del subsuelo, y así, ubicar las deformaciones activas de una zona en estudio.

Summary

A faulted Quaternary outcrop was imaged by GPR, aiming at establishing the radargram resolution when locating active faults.

Many faults and bedding attitude were recognized, which were confirmed by correlation with the detailed study of the outcrop.

The occurrence of fine-grained lithologies (clay), as well as the difference in packing and compaction in the outcrop, attenuated the radar signal, allowing low penetration (about 10 m deep using the 50 Mhz antenna), but, it was enough to image the shallow sub-soil, and locate the active structures.

Introducción

El radar de penetración de suelos, o GPR (por sus siglas en inglés *Ground Penetrating Radar*), es un instrumento que emite desde una antena en la superficie un pulso electromagnético de alta frecuencia. Esta energía se reflejará hacia la superficie cuando consiga interfaces de materiales que tengan diferentes propiedades dieléctricas. El contenido de agua, la porosidad y la compactación son

algunos de los factores más comunes que producen estos cambios. La energía reflejada la recibe otra antena (receptora) y se graba como una función del tiempo (Jol & Bristow, 2003).

Este principio en conjunto con la instrumentación del GPR desarrollada recientemente, permite crear perfiles donde se muestran aquellas interfaces en las cuales existe un contraste en la constante dieléctrica de dos cuerpos rocosos, y observarlos en tiempo real, además de las deformaciones presentes en el tramo en estudio.

Esta metodología, ha sido aplicada principalmente en las siguientes áreas de investigación: búsqueda de tuberías (por ejemplo, Jol & Smith, 1995); Geomorfología ambiental (por ejemplo, Jol et al., 2002b; Jol et al., 2000a); Arqueología (Jol et al., 2002a; Jol et al., 2000b; entre otros).

El presente trabajo tiene como propósito determinar el grado de precisión que se puede obtener con esta herramienta en la identificación de fallas activas, a través de la comparación de diversos perfiles GPR adquiridos en el tope de un afloramiento con deformación activa conocida, ubicado en la Cuenca de Barlovento.

Además, este trabajo presenta los resultados preliminares de ésta línea de investigación, la cual está apenas iniciándose a escala nacional (ver Camacho, 2004; y Audemard et al., 2004, en estas memorias).

Ubicación del área de estudio

Con el objetivo antes mencionado, se escogió un afloramiento con deformaciones activas, ubicado en la parte centro-oriental de la Cuenca de Barlovento (ver Fig. 1), 800 m al oeste del poblado de San Juan, el cual fue previamente descrito y estudiado con buen detalle por Espínola & Ollarves (2002), Hernández & Rojas (2002) y Ollarves et al. (2004).

Este afloramiento mide aproximadamente 18 m de alto y 97 m de largo. Por su cercanía al poblado de Los Colorados, y sus tonalidades rojizas, se le denominó en forma informal como “Los Colorados”.

Geología local

Los litotipos presentes en la zona de estudio corresponden a la Formación Mamporal, la cual representa la unidad estratigráfica formal más joven que existe dentro de la Cuenca de Barlovento.

Esta unidad litoestratigráfica fue introducida por Patrick (1959), en la cual describió una secuencia de sedimentos continentales poco consolidados, mal estratificados, en posición horizontal, que afloran en la región del bajo Tuy.

Autores como Seiders (1965), Bermúdez (1966) y Díaz (1982) realizaron descripciones detalladas enfocadas a la estratigrafía de esta formación. Posteriormente, Espínola & Ollarves (2002) y Hernández & Rojas (2002) en su estudio de la Cuenca de Barlovento, realizaron una descripción desde la perspectiva tectono-estratigráfica de los afloramientos expuestos, incluyendo aquellos de la Formación Mamporal.

El afloramiento “Los Colorados” presenta 3 secuencias de aproximadamente 7 m de espesor cada una, grano decrecientes, conformadas de base a tope por conglomerados, areniscas y arcilitas.

Cada secuencia de base a tope consiste en un conglomerado de guijarros y en menor proporción de peñas, de color marrón oscuro con tonalidades rojizas. Los clastos presentan forma discoidal, con buena redondez, su distribución es caótica, aunque en el tope de la capa se observa cierta imbricación. En cuanto a la litología de éstos, principalmente se pueden identificar rocas volcánicas, metamórficas y cuarzos, los cuales están embebidos en una matriz de arena gruesa. Esta capa tiene un espesor estimado de 3 m.

Por encima se presenta una arenisca con lentes conglomeráticos de guijarros de unos 2 m de espesor, de color marrón ocre y meteoriza a tonalidades rojizas. Esta arenisca presenta una alta densidad de empaquetamiento, la cual aumenta hacia el tope de la capa. Está compuesta principalmente por granos de cuarzo y se observan algunos fragmentos de rocas metamórficas.

Suprayace, una capa de arcilita masiva de 2 m de espesor, de color fresco gris claro a ocre. Estas arcilitas corresponden a los topes de cada secuencia granodecreciente, las cuales son truncadas en el tope por otra secuencia. Estos contactos erosivos, pertenecen a momentos de no depositación y posterior erosión, formando hiatos locales y discordancias intraformacionales.

La edad asignada es Pleistoceno medio, en base a los estudios realizados por Méndez & Scherer (1997).

Por otra parte, este afloramiento presenta una gran variedad de fallas, las cuales fueron descritas y analizadas

por Hernández & Rojas (2002) y Ollarves et al. (2004). Estas deformaciones corresponden a un sistema de fallas principalmente normales, con orientación NW-SE, que están asociadas al sistema de fallas de Piritu (ver Fig. 2, 3 y 4.A y 4.B).

Los análisis de la población de fallas establecidos por Ollarves et al. (2004) muestran un tensor de esfuerzos para este afloramiento orientado: σ_1 vertical, σ_2 N49°W y σ_3 S41°W; este tensor corresponde a la segunda fase de deformación frágil establecida para la Cuenca de Barlovento, la cual se inicia a finales del Plioceno Tardío y aún está activa.

Por su parte, Ollarves & Audemard (2004, en estas memorias), muestran claras evidencias morfotectónicas de actividad cuaternaria en la Cuenca de Barlovento. Una de las evidencias expuestas consiste en el trazado del río Tuy en la zona de Sabana de Toro, el cual presenta un desvío al igual que el río Capaya bajo una lineación estructural que cruza cercano al afloramiento “Los Colorados” (ver Fig. 2).

Georadar

Las fases para la aplicación de este método en el afloramiento “Los Colorados” fueron las siguientes:

1. Adquisición

La adquisición se realizó con un georadar RAMAC/GPR desarrollado por MALÁ Geosciences, no blindado, con antenas de 50, 100 y 200 Mhz.

Además, se utilizó la cobertura sencilla (*single fold*) y separación (*offset*) fija (2 m para las antenas de 50 y 100 Mhz, y 1 m para la antena de 200 Mhz). Así, los perfiles obtenidos corresponden a una imagen de los cambios en las propiedades dieléctricas del subsuelo (reflexiones) en función del tiempo de tránsito doble.

Se realizaron 3 tendidos de aproximadamente 48 metros de largo cada uno, los cuales fueron adquiridos en el tope del afloramiento en forma continua (ver Fig. 4.A a 4.D), es decir, se avanzaba con las antenas a medida que se iban grabando los datos.

El espaciamiento entre cada medición fue de 10 cm (los cuales fueron medidos con un odómetro atado a un punto georeferenciado). Los radargramas adquiridos fueron mostrados, en tiempo real, en un computador portátil conectado al equipo GPR.

2. Procesamiento

Los datos de radar, fueron procesados utilizando el programa “RAMAC Ground vision”, versión 1.3.6, diseñado por MALÁ Geosciences.

Calibración GPR con un afloramiento deformado

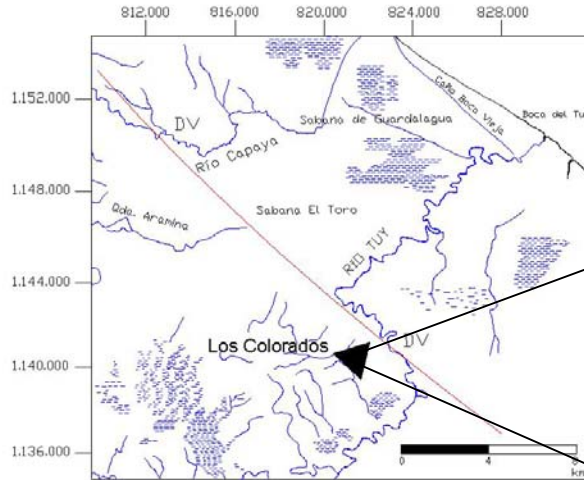


Fig. 2. Mapa de drenajes de la región centro oriental de la Cuenca de Barlovento, mostrando los desvios de los ríos Tuy y Capaya. Triángulo= Afloramiento; línea roja= falla activa. Modificado de Ollarves & Audemard (2004).

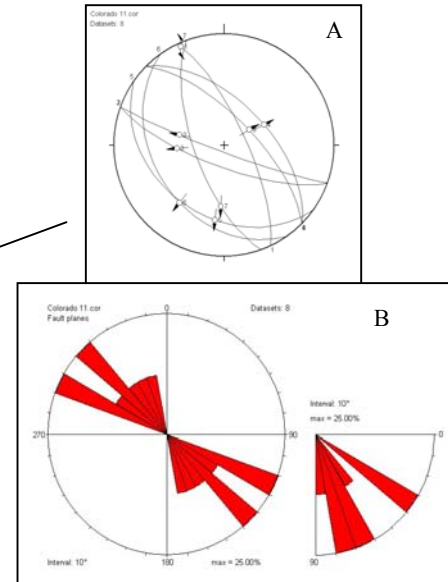


Fig. 3. (A) Estereografía y (B) Diagramas de rosa de las poblaciones medidas en "Los Colorados".

Los datos adquiridos con la técnica del GPR generalmente requieren un mínimo procesamiento para ser interpretados; inclusive, es posible hacer interpretaciones preliminares mientras los datos son adquiridos (Jol & Bristow, 2003).

El procesamiento de los radargramas adquiridos para este ejercicio incluyó la aplicación de ganancias (automática por ventanas de tiempo y variante en el tiempo) para contrarrestar el efecto de la atenuación de la señal a medida que se propaga en el subsuelo y por la pérdida de conductividad en los sedimentos. También se recurrió a la aplicación de algunos filtros para mejorar la imagen de los perfiles y facilitar la interpretación. Entre estos están el filtro paso banda (*Band Pass*) y el de sustracción de la traza promedio (*Subtract Mean Trace*).

3. Interpretación

La figura 4 muestra los perfiles GPR de 50, 100 y 200 Mhz, levantados en el tope del afloramiento "Los Colorados", así como el afloramiento y su interpretación estructural.

En la figura 4.B se muestra el perfil adquirido con la antena de 50 Mhz, a través de la cual fue posible obtener una penetración de 10 m. Se puede observar la presencia de fallas de alto buzamiento, las cuales afectan desde los reflectores más profundos hasta los más someros. Además, se aprecia cierta curvatura cóncava hacia arriba en los reflectores, la cual podría representar un efecto espejo o una imagen especular de la topografía sobre la cual se realizó el levantamiento.

Por su parte, la figura 4.C muestra el perfil tomado con la antena de 100 Mhz. Este perfil alcanzó una profundidad de 3 m, en los cuales, se pueden observar deformaciones frágiles de alto buzamiento que afectan a los reflectores, y en menor grado, se aprecia la curvatura expuesta en el perfil anterior.

Por último, la figura 4.D presenta el perfil adquirido con la antena de mayor frecuencia (200 Mhz). En este perfil se logró menor penetración que en los anteriores (solo 2 m), pero es aún posible identificar algunas fallas de alto buzamiento al igual que la curvatura de los reflectores.

Discusión

En la figura 4 se muestra que las discontinuidades en los reflectores identificadas en los radargramas corresponden muy claramente con las estructuras descritas en el afloramiento "Los Colorados". La geometría de las fallas es bien definida en los perfiles, aunque no es fácil establecer la cinemática de estas estructuras, por lo cual, es necesario conocer bien los estilos estructurales de la zona en estudio *a priori*.

Es importante destacar que las estructuras antes descritas, son observadas en los radargramas directamente en campo, sin necesidad de mayor procesamiento de los datos. Además, no es necesario realizar la corrección topográfica de los perfiles para poder identificar las estructuras mayores. Sin embargo, la ausencia de esta corrección puede exagerar o atenuar algunas de las deformaciones o la estratificación mostrada en los perfiles.

Calibración GPR con un afloramiento deformado

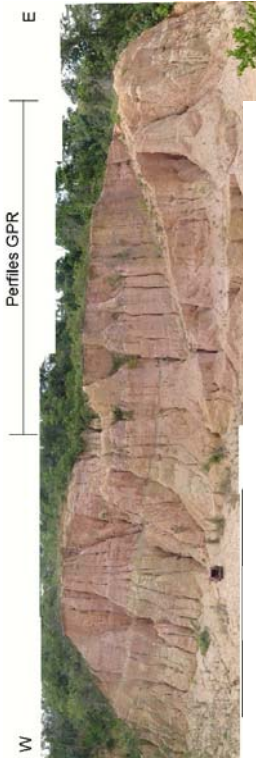


Fig. 4.a. Afloramiento "Los Colorados".

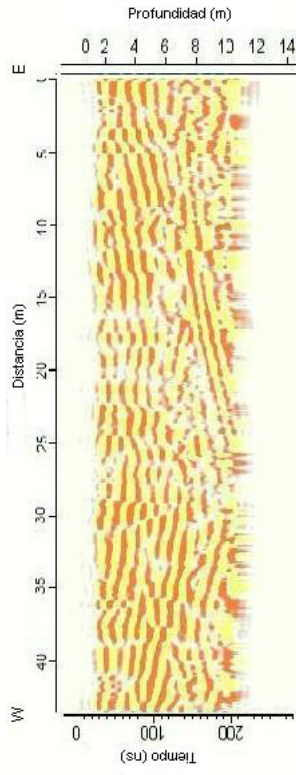


Fig. 4.b. Radargrama de 50 Mhz.



Fig. 4.c. Radargrama de 100 Mhz.

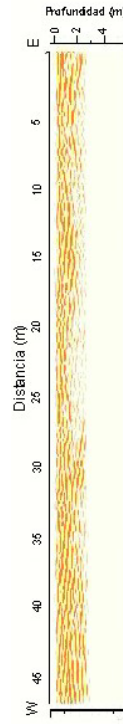


Fig. 4.d. Radargrama de 200 Mhz.

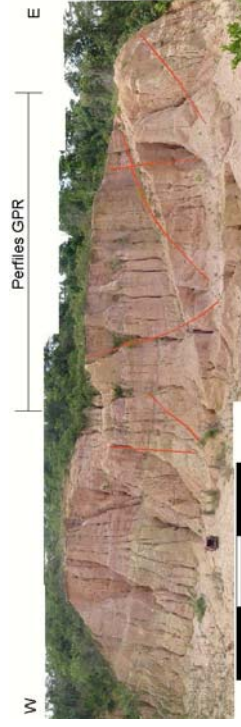


Fig. 4.a'. Interpretación estructural del Afloramiento "Los

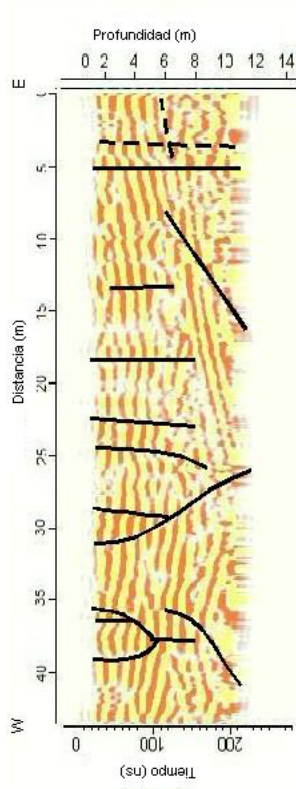


Fig. 4.b'. Interpretación del Radargrama de 50 Mhz.

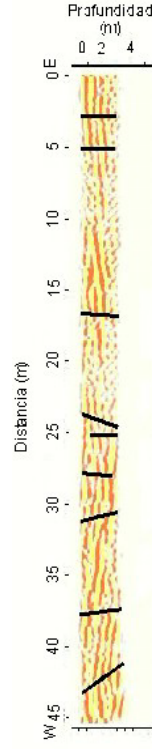


Fig. 4.c'. Interpretación del Radargrama de 100 Mhz.

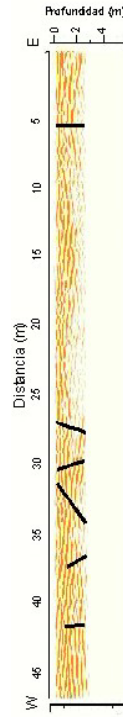


Fig. 4.d'. Interpretación del Radargrama de 200 Mhz.

Calibración GPR con un afloramiento deformado

En cuanto a las estructuras identificadas en los perfiles GPR, éstas corresponden principalmente a fallas de alto buzamiento, con alta inclinación con respecto a la estratificación. En las zonas donde el fallamiento tiene poca angularidad con respecto a la estratificación (parte superior derecha de las figuras 4.a y 4.b), no se distinguen las deformaciones frágiles existentes, aunque, es de fácil identificación cualquier otra estructura oblicua a la estratificación.

Por su parte, la curvatura observada en los perfiles adquiridos, puede corresponder a un reflejo de la topografía. Sin embargo, en la parte centro-oriental del afloramiento, existe una mayor inclinación de los estratos, el cual puede ser originado por el arrastre de la falla normal asociada a esa zona. Por lo tanto, parte de la curvatura en los reflectores de esta zona puede estar controlada por la inclinación de la estratificación y exagerada por el efecto topográfico.

La profundidad al igual que la resolución obtenida en los perfiles, no sólo fue función de la frecuencia utilizada, sino también del tipo litológico en el cual fue adquirido el perfil. El afloramiento “Los Colorados” presenta cambios litológicos graduales, además de cambios de empaquetamiento dentro de cada capa. En consecuencia, los pulsos electromagnéticos emanados por el transmisor son atenuados por los cambios de porosidad y de compactación existentes en la roca. No obstante, la penetración obtenida con la antena de 50 Mhz es suficientemente buena para realizar una interpretación de los primeros 10 metros del substrato, y así corroborar la existencia o no de deformaciones activas. De este modo, sería soportada la eventual apertura de una trinchera con fines de realizar el estudio paleosismológico de una traza activa de una falla.

Conclusiones

El georadar demostró ser un método geofísico de fácil utilización, el cual muestra en campo y en tiempo real, las estructuras presentes en una zona en estudio.

La aplicación de este método en el afloramiento “Los Colorados” mostró buena resolución en cuanto a la ubicación y geometría de las fallas activas que afectan la zona en estudio, por lo que fue posible realizar sobre los perfiles adquiridos, una interpretación muy similar a la realizada directamente sobre el afloramiento.

Es importante destacar que las fallas observadas en los perfiles, corresponden a fallas de alto ángulo con respecto a la estratificación y con alto buzamiento en este caso. Consecuentemente, las fallas de bajo buzamiento o sub-paralelas a la estratificación pueden ser de difícil o limitada observación.

Por último, el presente ejercicio demostró que los perfiles GPR, además de ser útiles para estudios de geomorfología

ambiental, estratigrafía o arqueología, también lo son para estudios de fallas activas, siendo éste, un método moderno exitoso en aplicaciones a investigaciones del subsuelo “no invasivas”.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) por haber permitido la elaboración de este proyecto a través de su apoyo financiero, logístico y humano. También a TRX Consulting por su apoyo logístico.

Además, el presente trabajo representa un aporte al proyecto GEODINOS (FONACIT G-2002000478).

Referencias

- Audemard, F., Diaz, G., Ollarves, R., Bechtold, M., Cataldi, A., 2004, El georadar como herramienta paleosísmica para la definición en el subsuelo de fallas activas: aplicación a la falla de Boconó en el sector Mucubají, estado Mérida. Mem. XII Cong. Venez. de Geof. Caracas, (en estas memorias) 7 pp.
- Bermúdez, P., 1966, Consideraciones sobre los sedimentos del Mioceno Medio al reciente de las costas central y oriental de Venezuela. Bol. Geol., Caracas, 7(14): 333-441.
- Camacho, P., 2004, Ubicación y caracterización de fallas selladas por sedimentos a partir de geofísica integrada en las zonas de Villa de Cura (falla de Río Guárico) y Barlovento (falla de Los Colorados). UCV. Dpto. de Geología. Trabajo Especial de Grado. Inédito. 123 p.
- Díaz, I., 1982, Geología del Mioceno-Plioceno en el flanco sur de la Cordillera de la Costa, entre Mesa de Urape (SW) y Cabo Codera (NE), NE del estado Miranda. UCV. Dpto. de Geología. Trabajo Especial de Grado. Inédito. 392 p.
- Espínola E. & Ollarves, R., 2002, Estudio tectono-estratigráfico del borde septentrional de la Cuenca de Barlovento, Estado Miranda: Implicaciones neotectónicas. UCV. Dpto. de Geología. Trabajo Especial de Grado. Inédito. 244 p.
- Hernández, J. & Rojas E., 2002, Estudio tectono-estratigráfico del borde meridional de la Cuenca de Barlovento, Estado Miranda: Implicaciones neotectónicas. UCV. Depto. de Geología. Trabajo Especial de Grado. Inédito. 200 p.
- Jol, H. & Bristow, C., 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. En Bristow, C. & Jol, H. (eds), 2003, Ground penetrating radar in sediments. Geological Society, Londres, Publicación especial, 211: 9-27.
- Jol, H. & Smith, D., 1995, Ground penetrating radar surveys of peatlands for oilfield pipelines in Canada. Jour. of Applied Geoph., 34: 109-123.

Calibración GPR con un afloramiento deformado

- Jol, H., Junck, M. & Kaminsky, G., 2000a, High resolution ground penetrating radar imaging (225 – 900 Mhz) of geomorphic and geologic settings: examples from Utah, Washington and Wisconsin. En Noon, D., Stickley, G. & Longstaff, D. (eds), (2000), Eighth Intl. Conference on ground penetrating radar. SPIE, 4084: 69-74.
- Jol, H., DeChaine, R. & Eisenman, R., 2002a, Archaeological GPR investigation at Rennes-Le-Château, France. En Koopenjan, S. & Lee, H. (eds), (2002), Ninth Intl. Conference on ground penetrating radar. SPIE, 4758: 91-95.
- Jol, H., Lawton, D. & Smith, D., 2002b, Ground penetrating radar: 2-D and 3-D subsurface imaging of a coastal barrier spit, Long Beach, WA, USA. *Geomorphology*. 53: 165-181.
- Jol, H., Shroder, J., Reeder, Jr. & Freund, R., 2000b, Return to the cave of letters (Israel): a GPR archaeological expedition. En Noon, D., Stickley, G. & Longstaff, D. (eds), (2000), Eighth Intl. Conference on ground penetrating radar. SPIE, 4084: 882-886.
- Méndez, J. & Scherer W., 1997, Tabla de correlación del Cuaternario en Venezuela. *Mem. VIII Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, 2:107-113.
- Ollarves, R. & Audemard, F., 2004, Evidencias morfotectónicas de actividad cuaternaria en la Cuenca de Barlovento, Venezuela Nor-central. *Mem. XII Cong. Geof. Venez. Caracas*, (en estas memorias), 8 pp.
- Ollarves, R., Audemard, F., Espínola, E., Hernández, J., Rojas, E., Alezones, R. & Falcón, R., 2004, Neotectónica de la Cuenca de Barlovento, Venezuela. *Mem. I Cong. Latinoam. de Sismol. Armenia*, en CD.
- Patrick, H., 1958, Geology of the Cariaco Basin. *Archivos LAGOVEN*, informe 2000. 11-2.
- Seiders, V., 1965, Geología de Miranda central. *Bol. Geol.*, Caracas, 6(12): 289-416.