



RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE PARÁMETROS MAGNÉTICOS Y PALEOCLIMÁTICOS EN SEDIMENTOS CUATERNARIOS

Alfredo Peralta^{1*}, Vincenzo Costanzo¹, Eduardo Carrillo², Milagrosa Aldana¹

¹Universidad Simón Bolívar. Dpto. Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela

²Universidad Central de Venezuela. Instituto de Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela

Resumen

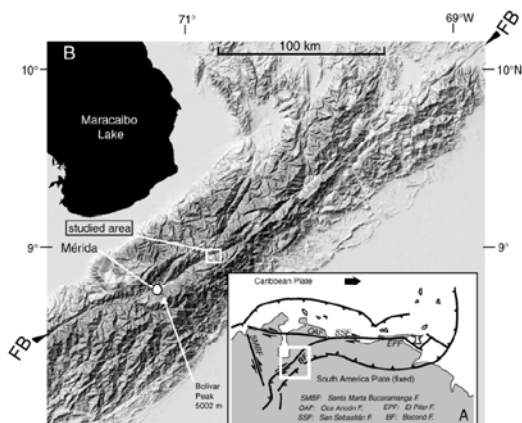
En este trabajo se estudian propiedades magnéticas de sedimentos cuaternarios de la Laguna de Mucubají (oeste de Venezuela), tales como susceptibilidad magnética (κ), remanencia anhisterética (ARM), magnetización remanente isotérmica (IRM) y cociente S (CS) entre otros. Nuestro objetivo es establecer relaciones empíricas, entre los datos obtenidos de núcleos que abarcan un período de 2200 años aprox. (10.880-12.950 años) e indicadores paleoclimáticos de isótopos de oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$). Estas relaciones se llevan a cabo mediante el uso del algoritmo de Redes Neuronales Difusas (RND). Hasta ahora se ha establecido que existe una correspondencia entre los parámetros magnéticos medidos y la curva de $\delta^{18}\text{O}$, habiéndose hallado correlaciones entre los datos de origen y los datos inferidos con un R^2 de aproximadamente 0,8.

Abstract

In this research we have studied magnetic properties of Quaternary lacustrine sediments from Mucubají lake in western Venezuela (i.e. magnetic susceptibility κ , anhysteretic remanent magnetization ARM, isothermal remanent magnetization IRM and S ratio). In order to find an empirical relationship between the bulk magnetic properties measured in two cores that encompass around 2200 years (10.880-12.950 Yrs) and paleoclimatics indicators of oxygen 18 isotopes ($\delta^{18}\text{O}$), we have used the hybrid algorithm of Neuro-Fuzzy Logic. So far we have found a correspondence between some magnetic parameters and the $\delta^{18}\text{O}$ curve with a correlation R^2 of around 0,8 between the measured and the calculated data.

Introducción

El presente trabajo busca establecer relaciones empíricas entre parámetros magnéticos e indicadores paleoclimáticos ($\delta^{18}\text{O}$) en sedimentos lacustres del cuaternario, a través del algoritmo computacional de Redes Neuronales Difusas (RND). Para esto se obtuvieron datos de núcleos de la Laguna de Mucubají (Venezuela) de NRM, κ , IRM y cociente S, ARM y temperaturas de Curie. Los datos de $\delta^{18}\text{O}$ fueron tomados de la base de datos de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). La Laguna de Mucubají, junto con la Laguna Negra y Los Patos, forma parte del complejo lagunas glaciares localizado



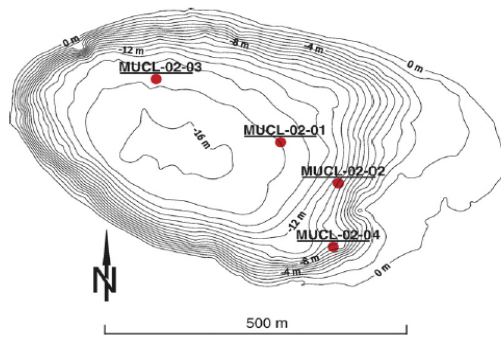
en de la Región Occidental de Venezuela, específicamente en Los Andes de Mérida (Fig.1). Esta laguna es afectada por el tectonismo Andino (Falla de Boconó) y por periodos de glaciaciones-desglaciaciones (Carrillo et. al, 2007). La Laguna se encuentra delimitada por morrenas, y es atravesada por la falla de Boconó (FB), Se encuentra a una altura de 3550 m.s.n.m. posee un perímetro de 2.3 km, un largo máx. de 785 m, un ancho máx. de 450 m, profundidad 16 m en su parte más profunda, un volumen de agua de 1.5 millones de m^3 . (Carrillo et. al, 2007).

Figura 1. Localización Geográfica del área de estudio. Los recuadros blancos indican la ubicación de la laguna. (Carrillo et al, 2007)



El límite Norte del continente Sur-Americano está enmarcado por un sistema transformante de tipo dextral que acomoda el desplazamiento relativo entre las placas Caribe y Suramericana. El promedio de desplazamiento en la zona de fallas es de 2 cm/año (Pérez et al., 2001). La FB se encarga de liberar más de la mitad de esta interacción y el resto entre el sistema de fallas Oca-San Sebastián-El Pilar (Audemard et al., 1999). Depósitos de la última glaciación del Pleistoceno, son particularmente abundantes en la sección central de la falla de Boconó. Estudios previos han establecido las relaciones entre la actividad tectónica en los depósitos glaciares (morrenas) y postglaciares (sedimentos lacustres) (Giegengack, et al. 1976, Schubert et al., 1982; Giegengack, 1984). Mientras otros investigadores estudian sedimentos glaciares y postglaciares para documentar los cambios en el clima y la vegetación en la región, para compararlo con cambios climáticos globales (Salgado-Labouriau and Schubert, 1976; Rull, 1996; Mahaney et al., 2000); éstos consideran la glaciación de Mérida equivalente a la última glaciación global máxima.

La laguna tiene una profundidad que varía entre 0 y 16 metros en su parte mas profunda, hacia el centro, y disminuye paulatinamente hacia los bordes.



En la siguiente figura se observa un mapa batimétrico en donde se indica la ubicación de 4 núcleos extraídos en trabajos previos (Carrillo et al. 2002), en los que se realizaron diversos estudios. Para este trabajo se cuenta con una sección del núcleo MUCL-02-02, a una profundidad de 11 metros aprox. Los núcleos fueron suministrados por el Dr. Eduardo Carrillo del Instituto de Ciencias de la Tierra de la Universidad Central de Venezuela.

Figura 2. Características batimétricas de la Laguna Mucubají. Tomado de Carrillo et al 2007

Estos núcleos fueron descritos y subdivididos en tres unidades principales (de base a tope) (Carrillo et al, 2007):

-Unidad 1: Consiste de limolitas arenosas y limolitas arcillosas de laminadas a interestratificación delgada. Algunas capas tienen horizontes basales con arenas finas a medias (cuarzo, mica blanca, feldespatos). La parte más baja de la unidad es una capa de arcilla gruesa y masiva que suprayace arenas de grano grueso.

-Unidad 2: Consiste de arcillas arenosas a limosas con abundantes partículas de materia orgánica. Estratificación delgada, con estratos más gruesos que en la unidad 1. Edades de Radiocarbono obtenidas del núcleo MUCL-0201 muestran que la transición entre la unidad 1 y la unidad 2 corresponde al comienzo del último periodo glaciar.

-Unidad 3: Carece de estratificación visible y consiste de limo, arcilla y abundante materia orgánica. El metro superior del núcleo MUCL-0203 es rico en finos detritos de plantas acuáticas. Presenta conchas de diatomeas, a diferencia de las unidades infrayacentes. (Carrillo et al., 2007).

Debido a que la historia de esta laguna presenta eventos relacionados a cambios climáticos y tectónicos, que pueden verse reflejados en los sedimentos lacustres de depositación continua, podría considerarse como un excelente laboratorio natural para el estudio propuesto, es decir, establecer relaciones empíricas, mediante el uso de las RND, entre parámetros magnéticos medidos en muestras de los núcleos de Mucubají y los indicadores paleoclimáticos globales ($\delta^{18}\text{O}$).

Las RDN, combinan la lógica difusa y redes neuronales en un algoritmo híbrido (Helle et al., 2001; Cuddy y Glover, 2001; Hurtado et al., 2008) usado en la predicción de parámetros petrofísicos complejos. Más recientemente, Da Silva et al. (2010) han establecido, mediante el uso de RND, relaciones empíricas entre datos magnéticos de susceptibilidad y cociente S con $\delta^{18}\text{O}$, en muestras del Mioceno medio y superior para un pozo estratigráfico (Saltarín 1A) de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia. En este trabajo se obtiene una correlación del 63%, que pareciera indicar un obvio vínculo entre los indicadores



magnéticos y los cambios climáticos globales que se reflejan en la variabilidad de los $\delta^{18}\text{O}$. Estos resultados se podrían interpretar como consecuencia de una influencia significativa de los cambios climáticos globales sobre los parámetros magnéticos.

Metodología

En este estudio se analizaron dos núcleos: el MUCL 03-B y MUCL 02-B, ambos provenientes del núcleo compuesto MUCL 02-02. Las muestras se prepararon en cajas de 2 x 2 cm. aproximadamente (100 muestras) abarcando 2 metros de secuencia estratigráfica que corresponden a edades entre 10.880 y 12.950 años (con un vacío de información entre los 12.000 y 12.400 años entre un núcleo y otro).

En todas estas muestras se midieron la susceptibilidad magnética (κ), magnetización remanente isotérmica (IRM e SIRM), la remanencia anhisterética (ARM) y las temperaturas de Curie.

Para asignar las edades a cada muestra fue necesario transformar los valores de profundidades a edades. Para esto se eliminaron las partes de cada núcleo correspondientes a eventos turbidíticos, ya que éstos no aportan información paleoclimática y poseen un diferente sentido cronológico dentro de la sección. La primera edad se tomó en la base del propio núcleo (turbidita) y la otra fué correlacionada estratigráficamente del núcleo MUCL 02-01 (turbidita al tope).

Se recopilaron datos de $\delta^{18}\text{O}$ en la base de datos de la NOAA (von Grafenstein, 1999). Estos datos debían corresponder a las edades de las muestras y a su intervalo de muestreo. Luego se correlacionaron los parámetros magnéticos en edad con sus correspondientes valores de $\delta^{18}\text{O}$.

Una vez correlacionados los parámetros magnéticos con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ se escogieron de forma aleatoria 70 % de los datos para entrenar el sistema híbrido de RND, con el fin de inferir valores de $\delta^{18}\text{O}$ y obtener relaciones empíricas entre propiedades magnéticas e indicadores paleoclimáticos globales sobre el 100 % del universo de datos.

Resultados y análisis

Una vez obtenidos los datos magnéticos se generaron los perfiles. En la figura 3 se muestran los perfiles de κ , ARM e IRM. A los 480 cm aprox se observa una caída anómala en los valores, lo cual se define como la posible entrada del holoceno (línea roja) y el fin de la última glaciación con una edad de 11.500 años (calBP “*calibrated years before present*”). Nótese que en los perfiles existe cierta correlación entre los picos y valles (líneas verdes), sobre todo para el núcleo 03-B, que resulta el de mayor interés por involucrar un cambio de clima importante, la entrada del Holoceno y el fin de la última glaciación. También se generaron perfiles de cociente S, ARM/IRM e IRM/k.

En la figura 4 se presentan los perfiles de susceptibilidad magnética y $\delta^{18}\text{O}$ con las profundidades transformadas en edades. De todo el universo de muestras se tomaron solamente 64 “paleoclimáticas”, el resto de las muestras corresponden a secuencias turbidíticas, es decir a eventos abruptos que no poseen información del clima al momento de su deposición. De las muestras resultantes se tomaron los datos para entrenar el sistema de RDN y así luego inferir sus respectivos valores de $\delta^{18}\text{O}$. En dicha figura se observa la posible correspondencia entre indicadores paleoclimáticos globales y κ , que a su vez se correlaciona con otros parámetros magnéticos como ARM e IRM (picos y valles figura 3). La línea roja señala un cambio abrupto en ambos perfiles, debido a que se encuentra a los 11.500 años aproximadamente, este cambio se le atribuye al principio del Holoceno lo que se podría traducir como un cambio de periodo glacial a interglacial, es decir un fuerte cambio climático

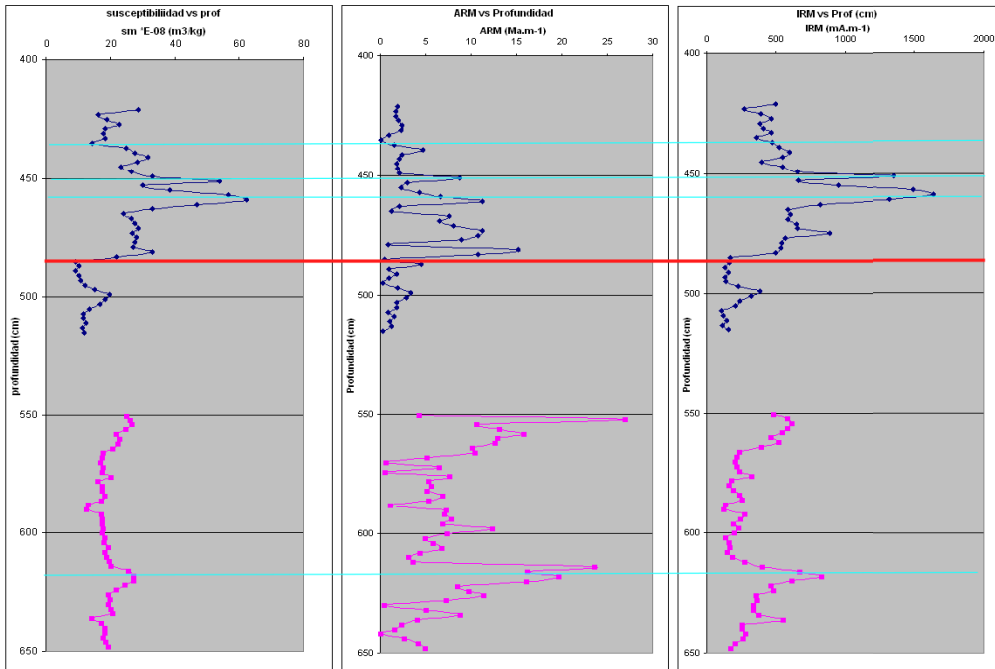


Figura 3. Perfiles en profundidad (cm) de Susceptibilidad Magnética, ARM e IRM sucesivamente. En color azul el núcleo 03-B y en rosa el núcleo 02-B. La línea roja indica la posible entrada del Holoceno. Las líneas verdes indican posibles correlaciones entre los parámetros (picos y valles).

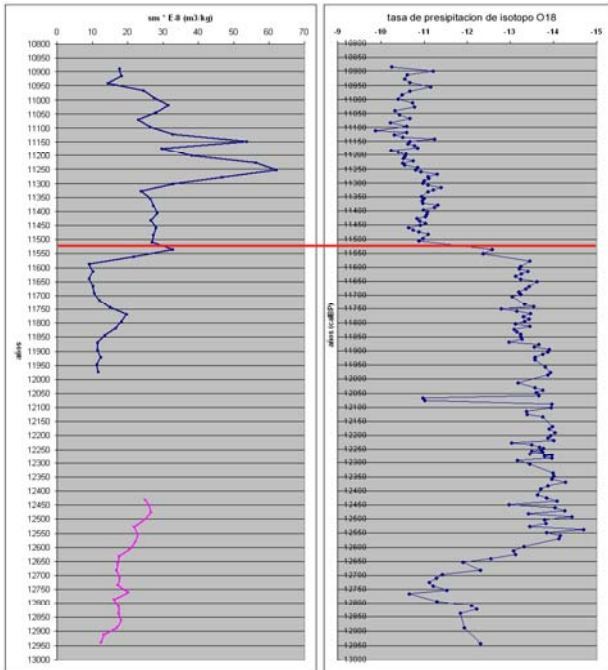


Figura 4. A la izquierda se muestra el perfil de susceptibilidad magnética “paleoclimática” de los núcleos 03-B y 02-B (azul y rosa) vs años calBP. A la derecha se muestra el perfil de $\delta^{18}\text{O}$ (von Grafenstein, 1999) para el intervalo de edades de interés. La línea roja corresponde a la entrada del Holoceno fin de la última glaciación.

Seguidamente se realizaron las pruebas computacionales RND. Para esto se generaron matrices aleatorias con el 70 % del universo de datos, resultando una matriz 43 x 3, donde las dos primeras columnas corresponden a los valores de entrada (en este caso parámetros magnéticos) y la tercera y última columna corresponden a la salida asignada ($\delta^{18}\text{O}$) para dichas entradas, de manera tal que el sistema se entrena y genera una estructura de predicción que se comprueba con el 100 % del universo de datos. De generarse una buena correlación entre los datos de entrenamiento y los predichos, podríamos asumir que existe entonces una relación empírica no lineal a través de la cual se pueden predecir valores de $\delta^{18}\text{O}$. Posteriormente se

realizaron pruebas y combinaciones entre los parámetros de entrada con el fin de discriminar cual de los parámetros magnéticos es más eficaz en la predicción de $\delta^{18}\text{O}$. En primera instancia se realizaron las pruebas con solo un parámetro de entrada. κ , ARM, IRM, CS, ARM/IRM e IRM/ κ . De estos parámetros el que mejor funcionó fue κ , dando una correlación final del 63 % aprox. Luego se combinaron cada uno de los parámetros con κ de manera tal que ahora las pruebas se realizaron con 2 parámetros de entrada. De todas estas combinaciones κ y ARM de entrada generaron una correlación del 81% entre los datos de $\delta^{18}\text{O}$ originales y los inferidos por las RND. Posteriormente se combinaron ARM e IRM como parámetros de entrada generando también resultados satisfactorios 80% ($R^2 = 0.8$). Estos son los más relevantes no obstante el par κ e IRM obtuvo una correlación del 77 %, mientras que κ y CS un 63%.

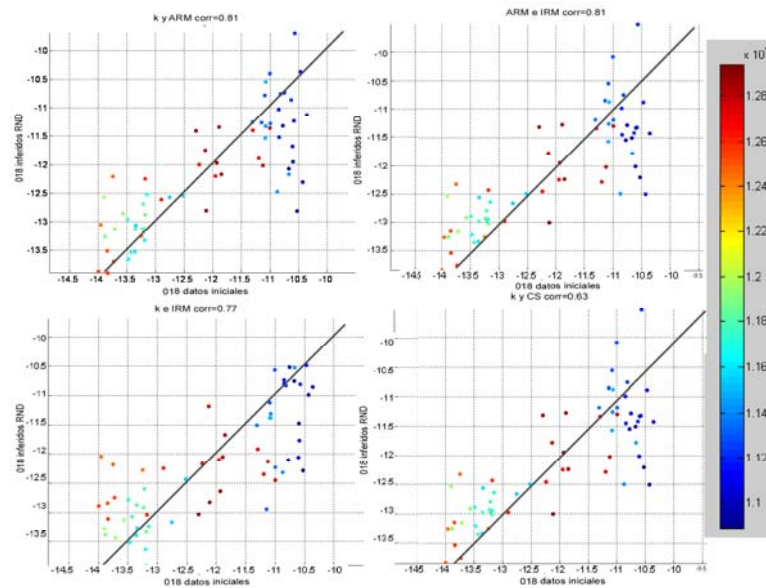


Figura 5. Correlaciones entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ predichos (RND) vs $\delta^{18}\text{O}$ de entrada (NOAA). Arriba a la izquierda se muestra la correlación generada por κ y ARM como parámetros de entrada. Arriba a la derecha ARM e IRM. Abajo a la izquierda κ e IRM. Abajo a la derecha κ y CS. Los colores representan las diversas edades, la barra de color esta en años $\times 10^4$.

En la Fig. 5 se puede observar como existe una correlación entre los datos de entrada, para entrenar las RND y los datos inferidos. Los colores discriminan las edades, con el fin de saber en que parte del registro existe más dispersión y tratar de explicar el sentido geológico. Nótese por ejemplo que para todas las correlaciones existe una dispersión en los colores azules oscuro correspondientes a edades entre 10.900 y 11.400 aprox. Es decir según la estimación de este trabajo serían los datos de muestras del Holoceno. Adicionalmente de los experimentos de propiedades magnéticas totales, también fueron medidas las temperaturas de Curie para 8 muestras pertenecientes al Holoceno. con el fin de discriminar que mineral ferromagnético es predominante. En este caso se observa una notable variación en la susceptibilidad alrededor de los 580 °C, lo que da indicios de posible magnetita como principal mineral ferromagnético.

Conclusión

De acuerdo a los resultados preliminares, presentados en este estudio, se puede inferir que existe una posible correlación entre los cambios de climáticos globales y el comportamiento de los parámetros magnéticos en las muestras de los sedimentos cuaternarios analizados. Además es posible establecer relaciones empíricas entre parámetros magnéticos experimentales e índices paleoclimáticos de $\delta\text{O}18$, mediante el uso de las Redes Neuronales Difusas

De las pruebas y combinaciones realizadas, se puede concluir que los mejores parámetros magnéticos para la predicción de índices paleoclimáticos serían κ , ARM e IRM en cualquiera de sus combinaciones. Esto puede deberse a que existe una correspondencia entre los cambios de temperatura o clima y la concentración y granulometría de minerales ferromagnéticos, principalmente magnetita, en estos sedimentos lacustres siempre que estos hayan sido depositados de manera continua en el tiempo y en un ambiente de baja energía.

Agradecimientos

Al Profesor Daniel Rey del grupo de investigación de Geología Marina y Ambiental (GEOMA) del departamento de Ciencias Marinas del la Universidad de Vigo, España, por permitirme realizar medidas en su laboratorio de Paleomagnetismo culminando así la fase experimental.



Al Dr. Kais Mohamed (grupo GEOMA), de la Universidad de Vigo quien de manera gentil y desinteresada me brindo el apoyo y conocimiento necesario, durante mi estancia en su institución.

Referencias

- Audemard, F.A., Pantosti, D., Machette, M., Costa, C., Okumura, K., Cowan, H., Diederix, H., Sawop Participants, 1999. Trench investigation along the Merida section of the Boconó fault (central Venezuelan Andes). *Tectonophysics* 308, 1–21.
- Carrillo, E., Audemard, F.A., Beck, C., Cousin, M., 2002. Sedimentary disturbances in Late Quaternary fluvio-lacustrine deposits of the Los Zerpa moraine, induced by the Boconó Fault, Mérida Andes, Venezuela. 5th International Symposium on Neogene Geodynamics. Toulouse, 16-18 September 2002, pp. 125–128.
- Carrillo, E., Beck, A., Franck, A., Audemard, E., Moreno, D., Ollarves. 2007. Disentangling Late Quaternary climatic and seismo-tectonic controls on Lake Mucubají sedimentation (Mérida Andes, Venezuela). *El SEVIER*.
- Cuddy S.J. and Glover P.W.J., 2001. The application of fuzzy logic and genetic algorithms to oil exploration. In: John R. and Birkenhead R. (Eds.), *Developments in Soft Computing*. Physica Verlag, Heidelberg, New York, 167–174.
- Da Silva, A., Vincenzo Costanzo-Álvarez, Nuri Hurtado, Milagrosa Aldana, Germán Bayona, Oswaldo Guzmán, Diego López-Rodríguez, Study of a possible correlation between Miocene global climatic changes and magnetic proxies $\delta^{18}\text{O}$, using neuro fuzzy logic analysis: stratigraphic well Saltarín 1A (Llanos foreland basin, Colombia). Aceptado para publicación en *Studia Geophysica et Geodaetica Springer Netherlands* (Science Citation Index) Volumen 54, Issue 4 2010
- Helle, H.B., Bhatt A. and Ursin B., 2001. Porosity and permeability prediction from wireline logs using artificial neural networks: a North Sea case study. *Geophys. Prospect.*, **49**, 431–444
- Hurtado, N., Aldana M. and Torres J., 2008. Comparison between neuro-fuzzy and fractal models for permeability prediction. *Comput. Geosci.*, **13**, 181–186.
- Giegengack, R., Grauch, R.I., Sahagam, R., 1976. Geometry of Late Cenozoic displacement along the Boconó Fault, Venezuelan Andes. *Boletín de Geología Publicación Especial* 7/2, 1201–1223
- Giegengack, R., 1984. Late Cenozoic tectonic environments of the central Venezuelan Andes. *Geological Society of America Memoir* 162, 343–364.
- Pérez, O., Bilham, R., Bendick, R., Hernández, N., Hoyer, M., Velandia, J., Moncayo, C., Kozuch, M., 2001. Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del sistema de posicionamiento global (GPS) en el norte de Venezuela. *Interciencia* 26, 69–74.
- Mahaney, W., Milner, M.W., Voros, J., Kalm, V., Hütt, G., Bezada, J., Hancock, M.G.V., Aufreiter, S., 2000. Stratotype for the Mérida Glaciation at Pueblo Llano in the northern Venezuelan Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 13, 761–774.
- Rull, V., 1996. Late Pleistocene and Holocene climates of Venezuela. *Quaternary International* 31, 85–94.
- Salgado-Labouriau, M.L., Schubert, C., 1976. Palynology of Holocene peat bogs from the central Venezuelan Andes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 19, 147–156.
- Schubert, C., 1982. Neotectonics of Boconó Fault, western Venezuela. *Tectonophysics* 85, 205–220.
- Von Grafenstein, U., H. Erlenkeuser, A. Brauer, J. Jouzel, and S.J. Johnsen, 1999, A Mid-European Decadal Isotope-Climate Record from 15,500 to 5000 Years B.P., *Science*, Volume 284, Number 5420, pp. 1654-1657, Jun 4 1999.