

# **A**NÁLISIS DE LOS PROCESOS CONTROLADORES EN LA EVOLUCIÓN TOPOGRÁFICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO GUÁRICO, VENEZUELA: MEDIANTE MÉTODOS MULTIHERRAMIENTAS

CONTROLLING PROCESSES ANALYSIS OF THE TOPOGRAPHIC EVOLUTION OF THE SUBBASIN GUARICO RIVER, VENEZUELA: THROUGH MULTITOOL METHODS

**MARLENE FLORES, MAURICIO BERMÚDEZ, XAVIER BUSTOS, MATTHIAS BERNET, CHARLES VIANA, SURISADAY ARCIA Y MICHAEL SCHMITZ**

## **RESUMEN**

La investigación combina técnicas multiherramientas (geomorfología cuantitativa, estudio de minerales pesados, y termocronología detrítica en circón) con el objetivo de analizar los procesos controladores de evolución topográfica en la subcuenca del río Guárico. Las muestras fueron recolectadas en bancos de arena del río y sus tributarios (Camatagua y Orituco). Las medidas de redondez y esfericidad obtenidos sobre los minerales pesados extraídos son comparados con los índices de erosión actual y las tasas de erosión a largo plazo obtenidas mediante termocronología, proporcionando así una idea de la procedencia sedimentaria de las partículas y la posible relación entre clima y tectónica. Los resultados sugieren que minerales de los ríos Camatagua y Guárico, poseen mayor esfericidad y menor redondez, sin embargo, altos índices de erosión, esto refleja la cercanía de la fuente, la presencia de fallas activas y posible esfericidad heredada durante el proceso de depositación. En contraste, para las muestras del río Orituco, se obtienen mayor redondez y menores índices de erosión. Con respecto a las edades, Camatagua y Guárico poseen terrenos fuentes muy similares, discriminándose tres edades: Pérmico-Triásico ( $250,6 \pm 29,2$  Ma), Cretácico ( $96,3 \pm 7,9$  Ma) y Paleoceno-Eoceno ( $57,7 \pm 3,3$  Ma). En contraste, Orituco exhibe las mismas poblaciones de edades con un terreno fuente adicional, Jurásico ( $145,2 \pm 12,4$  Ma). Adicionalmente, las edades por trazas de fisión en apatito

previamente publicadas indican dos fases de exhumación, Oligoceno y Mioceno. Se concluye así que la topografía de la zona estaría controlada principalmente por el clima y localmente por la tectónica.

**Palabras clave:** Geomorfología, mineral, río Guárico, sedimentario, traza, método.

## **ABSTRACT**

The present research combines multitool methods (quantitative geomorphology, heavy mineral analysis and detrital zircon thermochronology) in order to analyze controlling processes of the topographic evolution of the sub-basin Guárico river. The samples were collected in the main course of the Guárico River and its tributaries (Camatagua and Orituco). We obtained measures of sphericity and roundness on heavy minerals extracted which were compared with current erosion rates and with long-term erosion rates derived from detrital thermochronology. Thus providing an idea of particles sedimentary source and possible relationship between climate and tectonic. Results suggest that minerals compositions in the Camatagua and Guarico rivers have similars values of sphericity and low of roundness, but exhibits high erosion rates. This reflects the proximity of the source, the presence of active faults and inherited characteristics of sphericity during deposition. In contrast, the Orituco River sample has high values of roundness and lower erosion values. In terms of ages, Camatagua and Guárico recorded similar sources with three (3) different exhumation events: A Permian-Triassic ( $250.6 \pm 29.2$  Ma), Cretaceous ( $96.3 \pm 7.9$  Ma) and the latest Paleocene-Eocene ( $57.7 \pm 3.3$  Ma). In contrast, the Orituco River exhibits the same age population except a Jurassic ( $145.2 \pm 12.4$  Ma). Additionally, ages from Apatite fission-track previously published, indicated two stages of exhumation, Oligocene and Miocene. In conclusion the topography of area is being controlled mainly by climate and locally for tectonics.

**Key words:** Geomorphology, mineral; Guárico River, sedimentary, track, method

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la relación entre clima, erosión y tectónica se basó en la suma de distintos estudios para la construcción de una metodología, en busca de resultados que apoyaran posibles hipótesis. Entre los mismos se encuentran Krumbein (1941) estudio la medida y el significado geológico de la forma y redondez de las partículas sedimentarias; Li *et al.* (2005) explican la metodología y principios del modelo digital de elevación; Turcotte (2007) analiza el fractal y el caos en la geología y geofísica; Whipp, *et al.* (2009) se internan en el efecto de la cinemática de exhumación y la evolución topográfica en los datos de termocronómetros detríticos y Tucker *et al.* (2002) estudiaron los resultados topográficos pronosticados por modelos de erosión de la corriente.

Siguiendo ésta base, el análisis de la sub-cuenca del río Guárico se centró en estudios geomorfológicos, geológicos, sedimentológicos combinados con edades termocronológicas por trazas de fisión en circones detríticos, obtenidas en esta investigación y por edades de trazas de fisión en apatitos previamente publicadas para las zonas cercanas al tramo central de la Cordillera de la Costa (Kohn *et al.*, 1984; Pérez de Armas, 2005; Sisson *et al.*, 2005). Constituyendo una metodología que permite entender cómo todos estos procesos han interactuado en el transcurso del tiempo geológico y han llegado a controlar la exhumación del flanco sur de la Serranía del Interior y parte de la Cordillera de la Costa.

La forma de la topografía actual de los orógenos circundantes (parte central del ramal interno de la Cordillera de la Costa, figura 1) a la cuenca del río Guárico refleja la interacción de los procesos antes mencionados, observándose, si pueden actuar de forma acoplada o no, incidiendo directamente sobre los mecanismos de erosión, haciendo que la tasa de exhumación aumente paulatinamente al igual que la tasa de incisión del río Guárico.

Profundizando en la metodología, el estudio de índices topográficos primarios y secundarios está basado en el uso de ecuaciones matemáticas (Wilson y Gallant, 2000), las cuales, al ser empleados en un área específica, arrojan datos de interés, que pudieran ser comparados entre si y con otras observaciones geológicas-geofísicas. Los mismos indican la existencia de una alta erosión, bien sea por procesos internos terrestres (tectónica) o procesos externos (clima y acción del hombre, entre otros).

Estudiar la tasa de erosión, la relación entre el terreno fuente, procedencia y acumulación de flujo de partículas mediante análisis geomorfológicos y sedimentológicos cuantitativos, constituye una metodología que no se ha realizado en esta zona de Venezuela, lo cual al ser integrado con dataciones termocronológicas obtenidas o existentes se puede entender la relación antes mencionada y otros

procesos aún más complicados en el área de estudio, por ejemplo, la influencia del alto flujo de calor justo en la zona donde yace la Formación Guárico (Hernández, 2006; Arnaiz-Rodríguez & y Orihuela, 2013). Finalmente, el objetivo de la presente investigación consiste en discriminar los posibles procesos controladores (tectónicos, climáticos o combinación de ambos) del relieve a lo largo del área de estudio.

## **UBICACIÓN DE LA ZONA ESTUDIO Y CONTEXTO GEODINÁMICO**

La zona de estudio está comprendida entre las latitudes  $9^{\circ}52'17''\text{N}$  y  $8^{\circ}42'28''\text{N}$ , a lo largo del río Guárico y de sus principales tributarios (río Orituco y Camatagua), comenzando desde el Embalse de Camatagua en el estado Aragua, pasando por el embalse de Guárico en el estado del mismo nombre; Este río se caracteriza por ser un río de altura o de serranías y hacia el sur se transforma en un río de llanuras. En la figura 1, se muestra la ubicación de la zona de estudio en función del contexto geodinámico, en ella se observa un movimiento relativo entre la placa del Caribe y Suramérica de 1-2 cm/a (Taboada *et al.*, 2000). Sin embargo (DeMets *et al.*, 2010) indican para el Caribe un movimiento de 20 mm/a respecto a Suramérica, y con ello también al Atlántico, teniendo en cuenta que la misma velocidad la tiene Caribe con respecto a la placa Norteamericana.

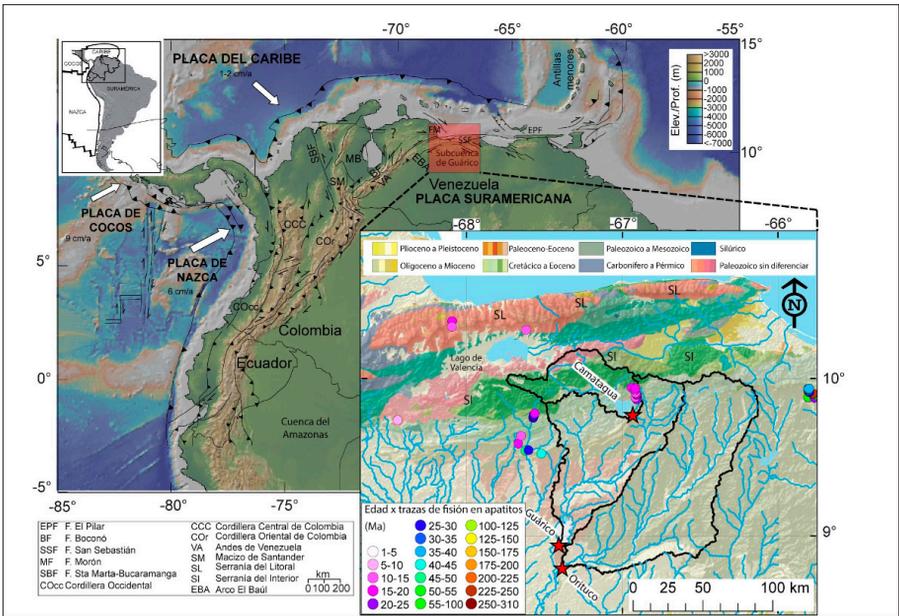
Considerando lo antes expuesto y agregando que los valores más recientes dan 2 cm para la interacción, se tomaría en cuenta 2 cm/a tanto para la subducción del Atlántico bajo Caribe como para Caribe debajo de Sur America específicamente bloque Maracaibo.

Después de plantear el componente dinámico general, entendiendo que ese movimiento relativo afecta de manera directa la geodinámica de la zona de estudio, se muestra el contexto geodinámico presente, que corresponde a la Serranía del Interior, ramal central, en el norte de Venezuela, compuesta por una serie de estructuras complejas, entre las más importantes se tienen: El frente de corrimiento Guárico, el cual compete a una extensa zona de corrimientos que se presentan de forma discontinua, ocasionalmente en relevos estructurales y a través de fallas ciegas, y generalmente disectadas y desplazadas por estructuras rumbo deslizantes que funcionan como zonas de desahogo para las masas emplazantes, la dirección o rumbo se mantiene a lo largo de toda su extensión en  $\text{N}70^{\circ}\text{-}80^{\circ}\text{E}$  (Guillen y Toribio, 2006).

Continuando con las estructuras presentes en la zona, La falla del río Guárico, se encuentra seccionando la Cordillera de la Costa al norte de Venezuela, cortando principalmente a las rocas metamórficas (napas) que fueron emplazadas durante la colisión oblicua que afectó a la región (Pindell, 1991). Esta falla se extiende desde el

sureste del Lago de Valencia (Figura 1) al noreste del Embalse de Camatagua (Guillen y Toribio, 2006). A su vez se encuentra dividida en dos secciones conectadas por un corrimiento, que por su geometría generaría la restricción del desplazamiento de la misma. La sección sur de esta falla posee una dirección promedio de  $N77^{\circ} W \pm 18^{\circ}$ , con sentido de movimiento dextral al igual que la falla principal, con una tasa de movimiento  $\leq 0.3 \text{ mm/a}$  (Audemard *et al.*, 2006).

**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio en el contexto geodinámico, edades por trazas de fisión en apatitos in-situ (Kohn *et al.*, 1984; Pérez de Armas, 2005; Sisson *et al.*, 2005) y muestras de sedimentos modernos (estrellas rojas) seleccionadas para esta investigación



Fuente: Modificado de Hackley *et al.*, 2006; Bermúdez *et al.*, 2015b

**METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

Con la finalidad de establecer las relaciones entre clima y tectónica como posibles agentes controladores del relieve actual de los orógenos circundantes a la cuenca del

Análisis de los procesos controladores en la evolución topográfica de la subcuenca del río Guárico, Venezuela: mediante métodos multiterramientas

río Guárico, se recolectaron tres muestras de sedimentos modernos: Camatagua (GUA-1), Guárico (GUA-3), y Orituco (ORI-1) cuya ubicación puede ser observada en la figura 1 (ver estrellas de color rojo).

## 2.1 Termocronología por trazas de fisión en circones detríticos

Las tres muestras (GUA-1, GUA-3 y ORI-1) de sedimentos modernos de ríos fueron recolectadas en los bancos de arenas presentes en el cauce principal de los ríos. Al menos 5 kilogramos de arenas fueron procesadas para cada muestra, una parte se procesó directamente en campo a través del empleo de bateas, otra fracción fue llevada al laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela, donde fueron tamizadas, concentradas a través de la mesa de separación hidrogravimétrica Wilfley, separadas magnéticamente bajo el equipo isodinámico Frantz y refinadas utilizando líquidos pesados (bromoformo y diyodometano).

El mineral pesado obtenido, según las técnicas de laboratorio (Bermúdez, 2006; Bermúdez et al., 2009), fueron montados en láminas de Teflon<sup>®</sup> pulidas y atacadas químicamente usando una solución eutéctica NaOH-KOH fundida a 228°C en el horno del laboratorio. Se prepararon dos montajes para cada una de las muestras y fueron atacadas o reveladas (sometidas a ácido) químicamente a diferentes intervalos de tiempo entre 10 a 35 horas. Después de la exposición de las trazas de fisión inducidas, las láminas de teflon fueron cubiertas con una mica de bajo contenido de uranio e irradiadas junto con el estándar internacional usado para estos casos (Bermúdez *et al.*, 2009). Se colocaron vidrios dosímetros CN1 y las muestras fueron enviadas al reactor FRMII en Munich, Alemania. Después de la irradiación las micas detectoras fueron sumergidas en ácido fluorhídrico al 48% a una temperatura de 20°C por un tiempo de 18 minutos con la finalidad de exponer las huellas de fisión inducidas (creadas artificialmente).

Todas las muestras de circones fueron analizadas en el Laboratorio de Grenoble usando un objetivo seco a una magnificación de 1250× sobre un microscopio Olympus BH2 usando el sistema para conteo de trazas FTStage 4.04 de Trevor Dumitru (Jasper Canyon Research Inc., Palo Alto, CA, USA). Se fecharon al menos 100 granos por muestra con la finalidad de obtener poblaciones de edades de trazas de fisión en circón estadísticamente representativas, sin embargo se lograron analizar entre 54 a 73 granos (cuadro 1). Debido a que los circones en muestras detríticas pudieran provenir de múltiples fuentes dentro del área que esta siendo drenada (figura 1) es necesario realizar una descomposición de la distribución compuesta de edades usando dos métodos: ajuste binomial de picos (Galbraith y Green, 1990;

Brandon 1992, Brandon y Vance, 1996) y el método p-partición (Bermúdez *et al.* 2015a). Los resultados son reportados en el cuadro 1 y en la figura 2.

## 2.2 Conversión de edades termocronológicas a tasas de erosión a largo plazo

Las tasas de erosión a largo plazo son obtenidas a partir de la conversión de las edades termocronológicas a tasas de exhumación. Con esta finalidad se usa un modelo termal unidimensional basado en condiciones de equilibrio llamado Age2edot desarrollado por Brandon *et al.* (1998); Ehlers (2005) y Reiners y Brandon (2006). Este código estima las edades de enfriamiento para diferentes termocronómetros los cuales han sido exhumados por una erosión a tasa constante.

Estos termocronómetros se obtienen, estudiando el campo de gradiente termal esta representado por la solución en equilibrio (*steady-state*) para una capa infinita de densidad  $L$  (km), una difusividad termal  $\kappa$  ( $\text{km}^2 \text{Ma}^{-1}$ ), una tasa de producción de calor uniforme  $H_T$  ( $^\circ\text{C Ma}^{-1}$ ), una temperatura en superficie  $T_s$  ( $^\circ\text{C}$ ) y un estimado del gradiente termal cercano a la superficie sin tomar en cuenta los efectos de la erosión ( $^\circ\text{C km}^{-1}$ ). Esos parámetros termales son usualmente estimados a partir del análisis de datos de pozos y núcleos. Este modelo no toma en cuenta los efectos de cambios en las condiciones de temperatura (Rahl *et al.*, 2007) o los efectos tridimensionales de la topografía (Whipp *et al.*, 2009); así las tasas de exhumación son consideradas como estimados de primer orden.

El modelo iterativamente calcula una tasa de exhumación, tasa de enfriamiento, temperatura de cierre ( $T_c$ ) y profundidad ( $z_c$ ) de las edades por trazas de fisión en apatitos o circones usando la ecuación de Dodson (1973) para resolver la temperatura de cierre asociada al termocronómetro y una estructura termal en equilibrio relacionada a esta profundidad de cierre. El modelo termal provee una descripción completa de la temperatura y el gradiente termal como una función de la profundidad. La tasa de enfriamiento es:

$$T(T_c) = \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{T_c} \epsilon$$

Dada esta tasa y la temperatura con respecto a la profundidad se usa la ecuación de Dobson para resolver  $T_c$  y para la profundidad de la isoterma de cierre  $z_c$ . La

edad de enfriamiento predicha está dada por  $\frac{z_c}{\epsilon}$ . En términos prácticos, la edad de enfriamiento predicha está dada por la edad por trazas de fisión para un mineral

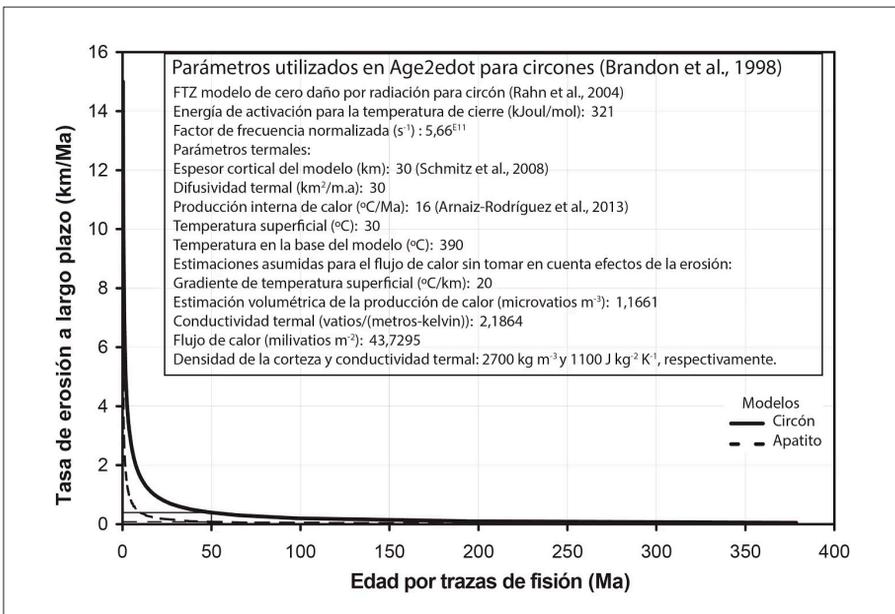
(para esta investigación el circón); así es posible calcular la tasa de exhumación a largo plazo como:

$$\varepsilon = \frac{Z_c}{Edad por TF}$$

La figura 2 muestra el caso particular de la estimación de tasas de erosión para la zona de estudio a partir de las edades por trazas de fisión en apatitos (línea punteada) y circones (línea sólida) usando el programa Age2edot. La línea negra delgada muestra por ejemplo, que para una edad por trazas de fisión en circones de 50 Ma le corresponde una tasa de erosión de 0,4 km ma<sup>-1</sup>.

**Figura 2.**

**Modelos de relación entre edad por trazas de fisión (en circones y apatitos) y tasas de erosión a largo plazo derivado del código Age2edot para el caso de la cuenca de Guárico. El espesor cortical considerado fue de 30 km (Schmitz *et al.*, 2008) y un flujo de calor alto (>16 °C/Ma; Arnaiz-Rodríguez *et al.*, 2013)**



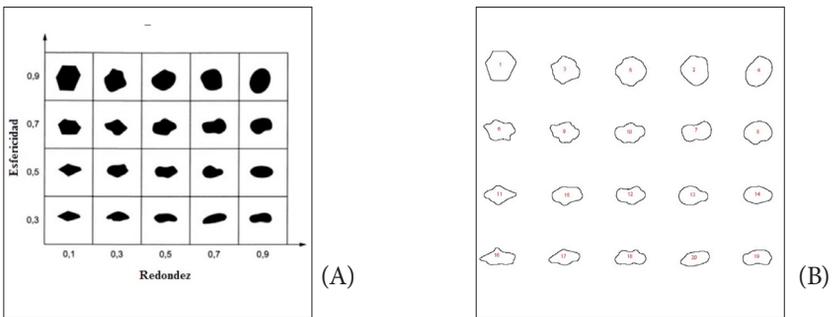
### 2.3 Reconocimiento visual de minerales y análisis de partículas

Durante el procedimiento inicial de separación y concentración de minerales se seleccionaron las fracciones magnéticas resultantes del separador Frantz a intervalos de 0,4A; 0,6A y 0,8.A Éstos minerales fueron montadas en epoxy y analizados bajo microscopio óptico con el fin de discriminar minerales pesados, se fotografiaron los minerales y se realizó tanto la discriminación e identificación, como un análisis de partículas sobre estos minerales, a través del empleo del software *ImageJ* (Ferreira y Rasband, 2012), el cual permite calcular el área de los granos, ajustar elipses, valores de redondez, esfericidad, escala de grises y los valores estadísticos asociados a la morfología de cada grano.

En teoría, los análisis se realizan ajustando a cada grano una cierta cantidad de píxeles, así el ordenador es capaz de calcular la forma del grano mediante la integración de varios píxeles. Adicionalmente, se pueden medir distancias y ángulos, histogramas de densidad de colores y perfiles a lo largo de una línea de interés sobre la partícula. El software ofrece algunas funciones de procesamiento de imágenes estándar tales como manipulación del contraste, la nitidez, suavizado, detección de bordes y el filtrado de la fotografía.

En la figura 3A se muestra la carta de relaciones entre redondez y esfericidad establecida por Krumbein (1941), esta figura fue procesada mediante el software *ImageJ* con la finalidad de obtener la figura 3B, la cual a su vez, fue utilizada como patrón para comparar los resultados obtenidos de los análisis de redondez y esfericidad para cada muestra.

**Figura 3.**  
**(A) Carta de relación entre esfericidad y redondez (Tomada de Krumbein, 1941).**  
**(B) Resultado del análisis de partículas mediante ImageJ a la figura de la izquierda**



Fuente: Generado automáticamente a partir de la imagen de la izquierda. Krumbein (1941)

## 2.4 Geomorfometría o Análisis Digital del Terreno

Se utilizó el software ArcGIS<sup>®</sup> 10.0 por ser un programa robusto en el área de sistemas de información geográfica, con el propósito de realizar el estudio geomorfológico cuantitativo, se utilizó un *modelo de elevación digital* (MED), con una resolución de 90 metros obtenido de las bases de datos de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) derivada durante la misión Shuttle Radar Topography Mission (Li *et al.*, 2005). El uso de MED facilita su interpretación bajo el ordenador y permite otros cálculos (Felicísimo 1994; 1999; Wilson y Gallant, 2000; Li *et al.*, 2005); la imagen fue procesada y proyectada usando el sistema de coordenadas mundiales WGS-1984.

Para este trabajo, adicionalmente se tomaron los datos de precipitación producidos por Bookhagen (2010), para el período 1998-2009, los cuales fueron descargados de su sitio web en formato Geotiff. Utilizando el modelo digital de elevación a 30m se calcularon en ArcGIS los siguientes índices:

**Índice de transporte de sedimento (STI):** De acuerdo con Moore y Burch (1986), este índice es derivado de la teoría del potencial de unidad de la corriente y es usado a veces en lugares con factores de longitud de pendiente en la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) para longitudes de pendiente menores que 100 m y pendientes menores de 14°. El índice combina el área de acumulación de flujo (o área de contribución), y la pendiente ascendente bajo el supuesto de que esta contribuye con la descarga, así este índice se obtiene mediante la expresión:

$$STI = (m + 1) \times (A_s / 22.13)^m \times \sin(S / 0.0896)^n$$

En esta última,  $m$  y  $n$  son constantes.

**Índice de humedad (WI):** comúnmente usado en el modelado del marco de precipitación-escorrentía, este índice describe la tendencia de un lugar a ser saturado por el agua debido al área de contribución y características de las pendientes locales.

$$WI = \ln \left[ \frac{A_s}{\tan(S)} \right]$$

**Índices de erosión:** De acuerdo con (Bermúdez *et al.*, 2013) los índices de erosión pueden ser calculados de diversas formas como una función del poder erosivo del

afluente o tributario, el cual se define como la tasa de consumo de la energía potencial producida por corrientes de agua. Se ha utilizado ampliamente en los estudios de erosión, transporte de sedimentos, y en geomorfología como una medida de la fuerza erosiva de los ríos y arroyos (Wilson y Gallant, 2000). El análisis se basa en una predicción de la tasa de incisión en el lecho de roca como una función de la potencia de la corriente (Finlayson *et al*, 2002; Tucker y Whipple, 2002):

$$e = k A_s^m S^n$$

Donde  $e$  es la tasa de incisión local,  $A_s$ ,  $S$ ,  $m$ ,  $n$  y  $k$  fueron mencionadas anteriormente. El parámetro  $k$  está relacionado a la litología. Con el propósito de incorporar las variaciones espaciales en la tasa de precipitación  $P$ , el cálculo de los parámetros hidrológicos mediante ArcGIS ofrece directamente una opción para incluir esta variable, al pesar los datos del MDE con los datos de pluviosidad.

Diferentes valores de  $m$  y  $n$  pueden ser usados en las ecuaciones anteriores dependiendo de la forma como son controladas las tasas de incisión de los ríos. Así, se derivan las siguientes expresiones que miden la potencia erosiva de la corriente de agua, basado en el supuesto que la descarga (caudal) es proporcional al área de la cuenca específica:

- Poder de flujo total o “Total Stream Power” (TSP),  $m = n = 1$ , la incisión es controlada por la potencia del flujo. Así,

$$TSP = A_s S$$

- Poder de flujo unitario o “Unit Stream Power” (USP),  $m = 1/2$ ,  $n = 1$ , la incisión es controlada por la potencia flujo de agua por unidad del ancho del canal. Así,

$$USP = \sqrt{A_s S}$$

- Poder de flujo de cizalla o “Shear Stream Power” (SSP),  $m = 1/3$ ,  $n = 2/3$ , la incisión es controlada por la potencia por el esfuerzo de cizalla sobre el caudal. Se calcula mediante la expresión:

$$SSP = \sqrt[3]{A_s S^2}$$

**Relieve geofísico:** Se define el relieve geofísico según Champagnac *et al.* (2007) como el volumen de material faltante que se encuentra bajo las cumbres y/o crestas de un paisaje, dividido por la superficie que ocupa el área de estudio (Small y Anderson, 1998; Brocklehurst *et al.*, 2008). Este se calcula como la diferencia entre dos imágenes rásters, la primera proporcionada por las máximas elevaciones dentro de un círculo con un radio particular (1, 3, 5 y 7 km fueron usados en este trabajo) denominada  $H_r$  y la segunda imagen ráster ( $h$ ) que representa al MED del área de estudio.

$$R = H_r - h$$

Para producir la imagen  $H_i$  se utiliza la herramienta Estadísticas focalizadas “*Focal Statistics*” la cual emplea vecindades superpuestas para calcular una estadística especificada para las celdas dentro de una vecindad determinada alrededor de cada celda de entrada. Las herramientas de vecindad crean valores de salida para cada ubicación de celda según el valor de la ubicación y los valores identificados en una vecindad especificada. La vecindad puede ser de dos tipos: radio de movimiento o de búsqueda.

**Integral hipsométrica:** Según Strahler (1952) la hipsometría describe la proporción de un área que se encuentra a diferentes elevaciones de la superficie terrestre y puede ser estimada mediante el cálculo del área bajo la curva hipsométrica, lo que se conoce como la integral hipsométrica ( $H_i$ , Pike y Wilson, 1971). Es una herramienta útil para la caracterización topográfica ya que está ligada al desarrollo geomorfológico del paisaje. La integral hipsométrica se aproxima mediante la siguiente ecuación:

$$E \approx H_i = \frac{(\bar{E} - E_{\min})}{(E_{\max} - E_{\min})}$$

Donde  $E$  es la relación elevación - relieve equivalente a la integral hipsométrica ( $H_i$ );  $\bar{E}$  es la elevación media de la cuenca;  $E_{\max}$  y  $E_{\min}$  son las elevaciones mínimas y máximas de las subcuencas.

La integral hipsométrica ( $H_i$ ), por tanto, se emplea como un indicador del “ciclo de erosión” (Strahler, 1952). Relacionandose de acuerdo a los siguientes rangos de valores para  $H_i$ : Cuenca en etapa de Vejez o senectud, en donde la misma está completamente estabilizada ( $H_i < 0,3$ ), se caracterizan por ser cuencas con poca pendiente. Cuenca en etapa de Madurez o equilibrio ( $H_i$  entre 0,3 a 0,6) y cuenca en etapa Juventud o desequilibrio ( $H_i > 0,6$ ), donde la cuenca es altamente susceptible a la erosión (Strahler, 1952; Bustos et al., 2013).

**Densidad de drenaje:** Este parámetro morfométrico que generalmente se identifica como  $Dd$  es la longitud total de los cauces dividida por el área de la cuenca y se expresa en Km/Km<sup>2</sup>.

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{A}$$

Donde:

$l_i$  = Longitud total de los cursos de agua (perennes o intermitentes) en kilómetros.

$A$  = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

**Dimensión Fractal:** Se define como la relación existente entre la longitud y la escala a la que se mide un objeto (Mandelbrot, 1985). Viene dada por la siguiente expresión:

$$Df = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\log(N_{\lambda}(A))}{\log\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

Donde  $N_{\lambda}(A)$  representa el número de pasos necesarios para recorrer un objeto A considerando un tamaño de paso fijo (1). En el presente trabajo se determina la dimensión mediante el algoritmo de conteo de cajas o “Box-counting” mediante la función BOXCOUNT de Matlab desarrollada por Moisy (2008). El algoritmo consiste en cubrir el objeto A con una malla regular de tamaño unitario y contar el número de cajas o pasos  $N_{\lambda}(A)$  que quedan ocupados, este proceso es repetido iterativamente disminuyendo el tamaño de la malla y contando nuevamente, finalmente se realiza un diagrama de dispersión log-log y se realiza un ajuste por regresión lineal, la pendiente se interpreta como la dimensión fractal del objeto.

La dimensión fractal puede ser considerada como un método adecuado en el estudio de la geomorfología de los ríos (Turcotte, 2007; Khanbabaie *et al.*, 2013). La dimensión fractal de las redes fluviales en las cuencas sugiere un grado de similitud geomorfológica e hidrológica en ellos, los cuales vienen reflejados en parámetros tales como: la relación longitudinal de los cauces, la relación filial, su curvatura y la abundancia, la forma y el ancho de las direcciones, y las particularidades topográficas de la región. Matemáticamente hablando, las cuencas cuyas dimensiones fractales son las mismas serían métricas equivalentes, por lo tanto, habría mucha similitud entre las propiedades geomorfológicas y las características hidrológicas de las cuencas. La interrupción de esos patrones de similitud o autosimilaridad, es una de las características más importantes a estudiar ya que esto significa que a lo largo del tiempo geológico diferentes fenómenos han ejercido controles temporales sobre el patrón de drenajes.

## RESULTADOS

### 3.1 Termocronología por trazas de fisión en circones detríticos

El cuadro 1 resume los resultados obtenidos del análisis de termocronología por trazas de fisión en circones detríticos para las tres muestras anteriormente mencionadas.

**Cuadro 1.****Edades por trazas de fisión en circones detríticos en las tres subcuencas analizadas circundantes al río Guárico**

Subcuencas	n	Rango de edades (Ma)	Dispersión (%)	Edad central (Ma) $\pm$ 1SE	Paleoceno-Eoceno	Cretácico	Jurásico	Pérmico-Triásico
Camatagua	69	29,3-302,5	35,1	88,0 $\pm$ 4,7	57,7 $\pm$ 3,3 (19)	96,3 $\pm$ 7,9 (44)		250,6 $\pm$ 29,2 (6)
Guárico	54	39,9-344,2	37,4	101,4 $\pm$ 6,8	64,3 $\pm$ 5,9 (14)	107,9 $\pm$ 7,3 (34)		259,6 $\pm$ 40,2 (6)
Orituco	73	43,2-466,2	44,8	123,7 $\pm$ 8,1	56,0 $\pm$ 12,1 (5)	84,7 $\pm$ 10,7 (20)	145,2 $\pm$ 12,4 (35)	304,2 $\pm$ 46,8 (13)

Nota:  $n$  = es el número total de granos analizados por Elizabeth Hardwick en la Universidad Joseph Fourier, Grenoble-Francia; edades para cada población fueron discriminadas por BINOMFIT  $\pm$  2 SE. Las muestras fueron analizadas usando un microscopio óptico de 1250x con objetivo secos (100x objetivo, 1,25 factor de amplificación del tubo, 10x oculares) usando un factor  $Z=174,2 \pm 3,11$

El Cuadro 2 resume los valores de tasas de erosión a largo plazo obtenidas a partir de las edades discriminadas anteriormente.

**Cuadro 2.****Tasas de erosión a largo plazo obtenidas a partir de las edades por trazas de fisión empleando Age2edot (1 en circones detríticos, 2 en apatitos in-situ a partir de los datos de Pérez de Armas, 2005 y Sisson et al., 2005)**

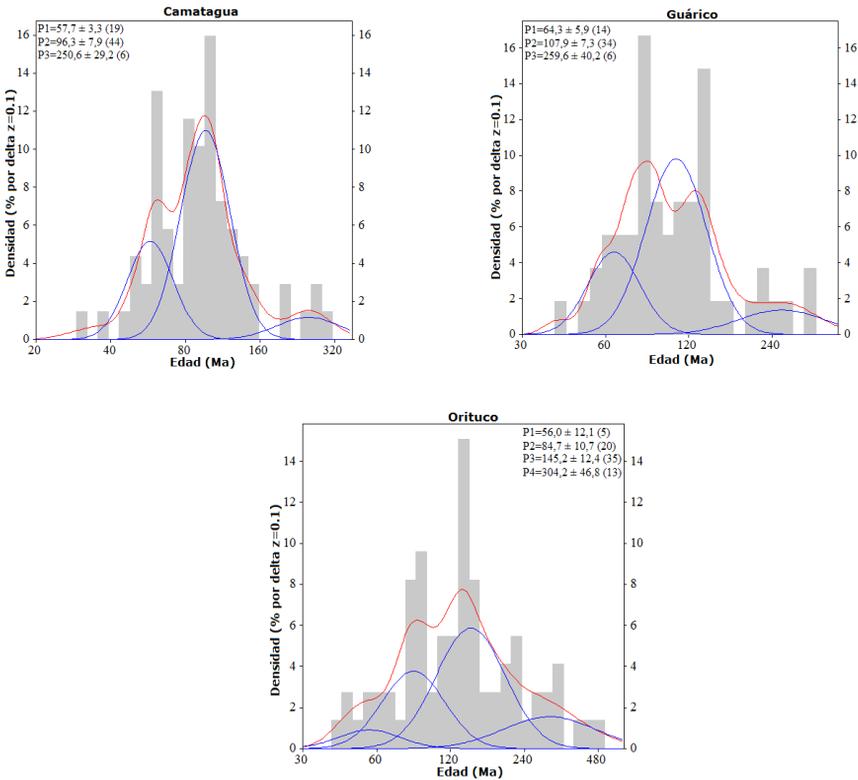
Muestra de las subcuencas	Tasa de erosión a largo plazo	Desviación estándar
Camatagua <sup>1</sup>	0,2797	0,1157
Guárico <sup>1</sup>	0,2481	0,0905
Orituco <sup>1</sup>	0,2184	0,1042
in-situ_AFT (toda la zona) <sup>2</sup>	0,2030	0,0947
Margen izquierdo (figura 1) <sup>2</sup>	0,2333	0,0516
Margen central (figura 1) <sup>2</sup>	0,2733	0,0593
Margen derecho (figura 1) <sup>2</sup>	0,1523	0,0847

En este cuadro, el margen izquierdo, central y derecho se refieren a las edades por trazas de fisión en apatitos in-situ que se encuentran en tales posiciones con respecto a la cuenca de Guárico en la figura 1.

En la figura 4 se presentan las distribuciones de edades obtenidas en cada cuenca, los picos de edades fueron discriminados usando el programa Binomfit.

**Figura 4.**

**Función de densidad de probabilidad compuesta de edades, ajustes binomiales realizados por el programa BINOMFIT e histogramas para las distribuciones de edades encontradas en los granos de cada una de las subcuencas analizadas en la presente investigación.**



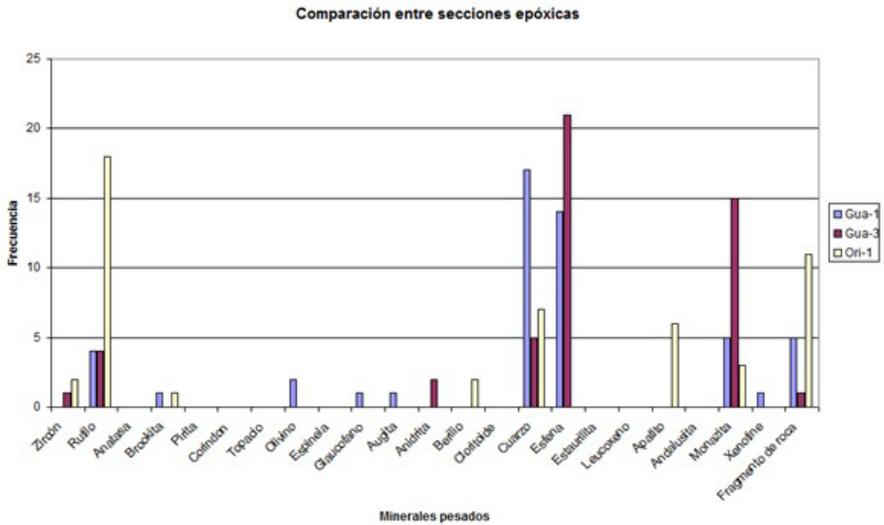
Análisis de los procesos controladores en la evolución topográfica de la subcuenca del río Guárico, Venezuela: mediante métodos multiterminales

### 3.2 Análisis de redondez y esfericidad

La figura 5 ilustra los resultados del análisis visual de minerales pesados. Se estudiaron 150 granos para cada una de las tres muestras recolectadas en las diferentes cuencas. Los minerales predominantes fueron, Camatagua (GUA-1): esfena 15%,

rutilo 14%. Guárico (GUA-3): rutilo 16%, esfena 15%, y río Orituco (ORI-1): rutilo 36%, brokita 6%.

**Figura 5.**  
**Comparación de concentración de minerales pesados por muestra para las secciones epóxicas. Los minerales aquí mostrados corresponden a aquellos cuya densidad se encuentra en el intervalo [2.96, 3.32] grs/cm<sup>3</sup>.**



El cuadro 3 resume los resultados obtenidos al procesar la imagen de Krumbein (figura 2A) en *ImageJ*. Esos resultados son utilizados para decidir los índices de esfericidad y redondez para cada una de las muestras analizadas en este trabajo. El cuadro 4 muestra los resultados de la aplicación del programa *ImageJ* sobre tales muestras.

**Cuadro 3.**

**Resultado del análisis de grano realizado sobre la tabla de índices de esfericidad y redondez (Modificado automáticamente de Krumbein, 1941).**

Grano	Redondez	Esfericidad
1	0,846	0,889
2	0,901	0,910
3	0,815	0,950
4	0,866	0,727
5	0,863	0,930
6	0,708	0,675
7	0,750	0,573
8	0,864	0,788
9	0,732	0,702
10	0,788	0,630
11	0,666	0,579
12	0,733	0,568
13	0,801	0,641
14	0,806	0,601
15	0,774	0,572
16	0,593	0,449
17	0,678	0,471
18	0,664	0,454
19	0,747	0,507
20	0,741	0,476

Los resultados mostrados en el cuadro 4 indican diferencias significativas en la redondez y esfericidad en forma general, exponiendo que las muestras tomadas en el río Orituco (ORI-1), el cual es un drenaje secundario del río Guárico, presenta alta redondez, secundada por GUA-3, tomada a la salida del embalse situado en Camatagua. La que posee más formas angulosas y menos redondeadas son las de GUA-1. Con respecto a la esfericidad el que posee mayor valor es GUA-3, le sigue ORI-1 y finalizando con GUA-1.

El estudio de los minerales mediante el software *ImageJ*, mostró cuantitativamente la redondez y esfericidad de los minerales analizados, dando así con mayor exactitud los datos, a diferencia de los obtenidos por visualización. La redondez en ORI-1 es de 0,554, seguido de GUA-3 con 0,494 y finalizando GUA-1 a 0,456. En cuanto a la esfericidad por su parte GUA-1 posee 0,697, GUA-3 con 0,659 y finalizando con ORI-1 a 0,64.

**Cuadro 4.**

**Valores promedios de índices de redondez y esfericidad calculados y observados para cada muestra**

Subcuenca	VISUAL		CALCULADA	
	REDONDEZ	ESFERICIDAD	REDONDEZ	ESFERICIDAD
Camatagua (GUA-1)	0,319	0,515	0,456	0,697
Guárico (GUA-3)	0,344	0,605	0,494	0,659
Orituco (ORI-1)	0,496	0,421	0,554	0,641

**3.3 Geomorfometría o Análisis Digital del Terreno**

El cuadro 5 resume los valores de atributos primarios, elevación, pendiente y relieve para cada cuenca, éstas últimas fueron delimitadas utilizando ArcGIS según el sitio de captura de la muestra, el relieve, en este caso fue calculado de acuerdo a la definición de relieve geofísico dada anteriormente para diferentes radios (1, 3, 5 y 7 kilómetros, respectivamente).

Los resultados mostrados en el cuadro 5 indican que la subcuenca de Camatagua es la que posee menor área (2243 km<sup>2</sup>) pero mayor pendiente ( $12 \pm 7,93^\circ$ ), elevación ( $671,49 \pm 259,66$  metros) y relieve ( $189,61 \pm 104,68$  m,  $370,33 \pm 174,47$  m,  $498 \pm 214,88$  m y  $617,22 \pm 237,56$  m, para radios de 1, 3, 5 y 7 km). Seguidos por la subcuenca de Guárico con área de 5744 km<sup>2</sup>, pendiente de  $4,21 \pm 5,47^\circ$ , elevación de 260,6  $\pm$  165,07 metros y relieves entre 58,7 a 285,7 metros. La subcuenca del río Orituco es la que posee mayor extensión (8895 km<sup>2</sup>), menor pendiente ( $2,31 \pm 4,17^\circ$ ), menor elevación ( $219,16 \pm 156$  m) y menor relieve oscilando entre 30,58 a 108,42 metros para los diferentes radios considerados.

**Cuadro 5.**

**Valores de atributos primarios del terreno para cada cuenca**

Subcuenca	Area km <sup>2</sup>	Pendiente (°)		h		R <sub>1km</sub>		R <sub>3km</sub>		R <sub>5km</sub>		R <sub>7km</sub>	
		media	de	media	de	media	de	media	De	media	de	media	De
Camatagua	2243	12,86	7,93	671,49	259,66	189,61	104,68	370,33	174,47	498	214,88	617,22	237,56
Guárico	5744	4,21	5,47	260,6	165,07	58,87	72,79	116,12	128,66	257,38	236,4	329,23	285,7
Orituco	8895	2,31	4,17	219,16	156	30,58	55,17	60,25	101,18	83,48	131,14	108,42	161,24

El cuadro 6 resume los valores de precipitación registrados para cada una de las subcuencas en el período 2000-2012, de acuerdo a los datos TRMM procesados y validados por Bookhagen (2010). Así, la subcuenca de Camatagua posee un promedio de  $1432 \pm 284,86$  mm/año, seguido por la subcuenca del embalse de Guárico ( $1431,20 \pm 249,18$  mm/año) y la subcuenca del río Orituco ( $1051,45 \pm 289,40$  mm/año). En ese mismo cuadro se incorporaron los atributos secundarios del terreno relacionados con los índices de humedad y la capacidad de transporte de sedimentos. En términos de índices de humedad uniforme (WI) y con precipitaciones (WIP) los resultados son muy similares (10,8-11,34 asumiendo la misma tasa de precipitaciones) y este tiende a aumentar de forma homogénea (18,05 a 18,36) para las tres subcuencas cuando la precipitación es incorporada. La subcuenca que posee menor transporte de sedimentos (STI) es la subcuenca de Camatagua. La del río Orituco posee mayor índice de transporte de sedimentos y la subcuenca de Guárico posee un índice de transporte de sedimentos intermedios.

**Cuadro 6.**  
**Valores de precipitación y atributos secundarios del terreno para cada cuenca**

Subcuenca	PRECIPITACION		WI		WIP		STI		STIP	
	media	De	media	de	media	de	media	ds	Media	de
Camatagua	1432,43	284,86	10,80	2,60	18,05	2,62	8,50E-05	0,01	8,50E-05	0,01
Guárico	1341,20	249,18	11,18	2,82	18,36	2,83	1,40E-03	0,04	1,40E-03	0,04
Orituco	1051,45	289,40	11,34	2,83	18,26	2,85	2,02E-03	0,05	2,02E-03	0,05

El cuadro 7 muestra los índices de erosión o poder de flujo de los ríos (TSP, USP y SSP) tomando en cuenta los valores de precipitación y sin ellos (precipitación uniforme). Para estos cálculos no se tomó en cuenta la litología, ya que no hay diferencias significativas para las litologías existentes en cada subcuenca. De forma general, las tasas de erosión registradas en la cuenca de Camatagua registran mayores valores de los índices de poder de flujo TSP, USP y SSP; asumiendo precipitación uniforme y variable (TSPP, USPP, SSPP) en el tiempo. Al incorporar la tasa de precipitaciones en los modelos de erosión se observa un incremento en estos índices, manteniendo la misma relación, es decir, la subcuenca de Camatagua presenta los mayores índices, seguido por las subcuencas de Guárico y del río Orituco.

### Cuadro 7.

#### Valores de índices de erosión para cada cuenca

Cuenca	TSP		USP		SSP		TSPP		USPP		SSPP	
	media	De	Media	de	media	de	media	De	media	de	media	De
Camatagua	2,47E <sup>10</sup>	4,75E <sup>11</sup>	4,89E <sup>6</sup>	1,73E <sup>7</sup>	2,08E <sup>4</sup>	3,23E <sup>4</sup>	3,74E <sup>13</sup>	7,13E <sup>14</sup>	1,87E <sup>8</sup>	6,75E <sup>8</sup>	2,35E <sup>5</sup>	3,70E <sup>5</sup>
Guárico	1,20E <sup>10</sup>	2,79E <sup>11</sup>	1,54E <sup>6</sup>	6,93E <sup>6</sup>	8,34E <sup>3</sup>	1,75E <sup>4</sup>	1,71E <sup>13</sup>	3,92E <sup>14</sup>	5,92E <sup>7</sup>	2,68E <sup>8</sup>	9,42E <sup>4</sup>	2,01E <sup>5</sup>
Orituco	8,44E <sup>9</sup>	1,97E <sup>11</sup>	9,04E <sup>5</sup>	4,50E <sup>6</sup>	5,49E <sup>3</sup>	1,32E <sup>4</sup>	9,66E <sup>12</sup>	2,14E <sup>14</sup>	3,23E <sup>7</sup>	1,70E <sup>8</sup>	5,80E <sup>4</sup>	1,47E <sup>5</sup>

En cuanto a la densidad del drenaje y la integral hipsométrica de estas cuencas se obtienen los resultados mostrados en el cuadro 8.

### Cuadro 8.

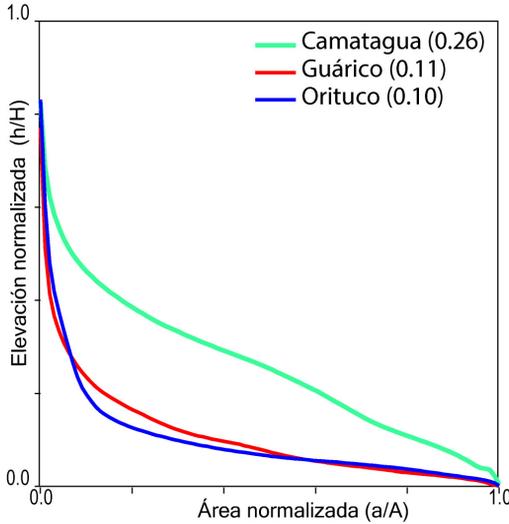
#### Area (km<sup>2</sup>), longitud, Densidad del Drenaje (Dd) e integral hipsométrica para las subcuencas analizadas

Subcuenca	Area km <sup>2</sup>	Longitud cauces (km)	Dd (km/Km <sup>2</sup> )	H <sub>i</sub>
Camatagua	2242,86	2285,19	1,02	0,26
Guárico	5743,06	6180,76	1,08	0,11
Orituco	8894,73	9064,47	1,02	0,10

La figura 6 muestra las curvas hipsométricas para cada una de las subcuencas analizadas.

**Figura 6.**

**Curva y valores de la integral hipsométrica para cada una de las subcuencas analizadas, generada mediante el software CalHypso (Pérez-Peña et al., 2009)**



El cuadro 9 muestra los valores de dimensión fractal obtenidos para cada subcuenca así como los distintos parámetros derivados en su cálculo.

**Cuadro 9.**

**Dimensión fractal D del drenaje para las cuencas del flanco Cordillera de la Costa. N1 = número de cursos de orden 1; N2= número de cursos de orden 2; N1/N2 =cociente; ln(N1/N2) =Logaritmo natural del cociente; r1 = longitud promedio cursos de orden 1 (m); r2 = longitud promedio cursos de orden 2 (m); r2/r1= Cociente; ln(r2/r1)= Logaritmo natural del cociente r2/r1; D = Coeficiente de dimensión fractal del drenaje; cociente entre ln(N1/N2) y ln(r2/r1)**

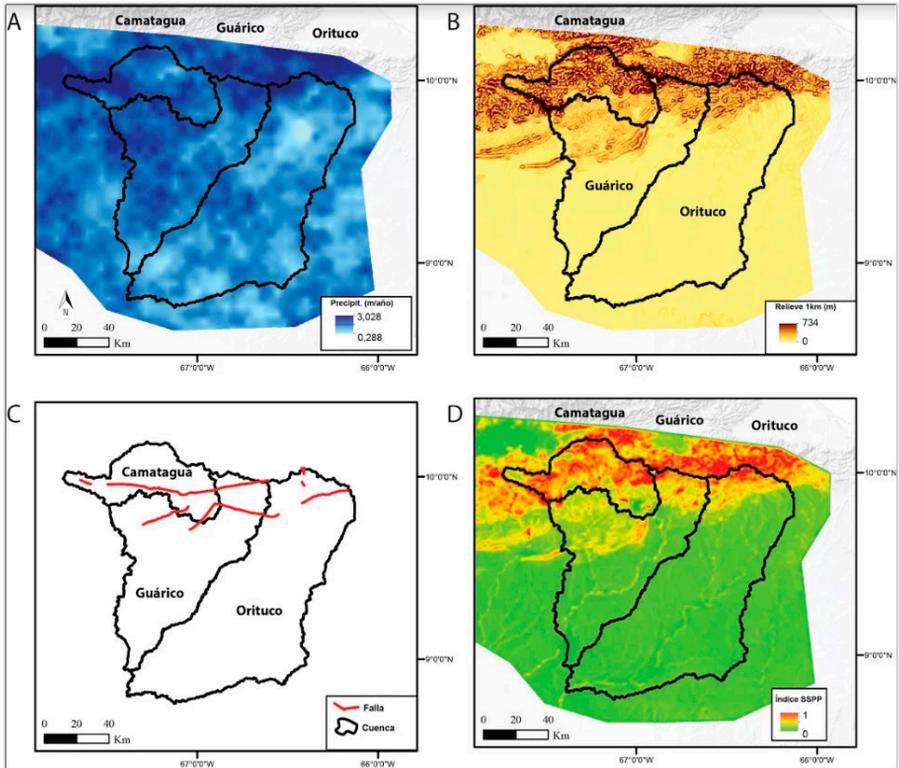
Cuenca	$N_1$	$N_2$	$N_1/N_2$	$\ln(N_1/N_2)$	$r_1$	$r_2$	$r_2/r_1$	$\ln(r_2/r_1)$	Df
Camatagua	2	1	2,00	0,69	30969,30	46883,30	1,51	0,41	1,67
Guárico	8	3	2,67	0,98	12597,39	25450,77	2,02	0,70	1,39
Orituco	8	1	8,00	2,08	37987,15	200240,80	5,27	1,66	1,25

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La figura 7 muestra en forma el patrón de precipitaciones, las principales fallas, el relieve y el índice de erosión SSSP normalizado.

**Figura 7.**

**Algunas características de las cuencas analizadas:** a) patrón de precipitaciones basado en la misión TRMM (2000-2008). b) Relieve a 1 km. c) Principales fallas encontradas en la zona de estudio fueron tomadas del mapa geológico-estructural de Hackley *et al.* (2006), y d) Índice de erosión SSSP normalizado



Marlene Flores, Mauricio Bermúdez, Xavier Bustos, Matthias Bernet, Charles Viana, Surisaday Arcia y Michael Schmitz

Los altos valores de relieve, precipitación, índices de erosión y pendiente de la subcuenca de Camatagua mostrados en la sección anterior y en la Figura 7, sugieren una alta erosión en la parte alta del orógeno que es influenciada por condiciones

climáticas locales, la presencia de fallas y diferentes estructuras geológicas, además de la relación entre la orientación de las laderas y atributos del suelo. Estas observaciones, son consistentes con otros trabajos realizados a lo largo de otros sectores situados en la parte alta de la cordillera antes mencionada, por ejemplo, la del río Caramacate (Machado et al., 2007; Machado, 2011; Pineda et al., 2011a, b). La figura 7d, muestra el mapa de índices de erosión basados en el poder de cizalla pesada por precipitaciones (SSPP) para las tres subcuencas analizadas en este trabajo, también se ilustra en la figura 7c cada una de las estructuras presentes en la zona de estudio, y en forma de contorno los cauces principales de los ríos Guárico y Orituco.

Las subcuencas del río Guárico y el río Orituco presentan bajos índices de erosión, en comparación con la subcuenca de Camatagua, principalmente porque son cuencas situadas en zonas planas, sin embargo, destaca el alto índice de erosión SSPP registrado en la parte media de la subcuenca de Guárico (figura 7d).

Con respecto a las subcuencas de Guárico y Camatagua, los valores similares de redondez corroboran la cercanía de la fuente. La alta tasa de erosión registrada en estas subcuencas se correlaciona con valores intermedios de esfericidad, para materiales pulverizados y sometidos a la abrasión, los valores de esfericidad (0,6-0,7) son parecidos a los valores observados y calculados para las muestras representativas de ambas subcuencas. Al no haber variación entre los valores de esfericidad, calculados por el programa *ImageJ*, pareciera indicar que la abrasión entre esas subcuencas es casi la misma, y la posible pulverización sea debido a la combinación de trituramiento por fallas presentes en la zona de estudio (figura 7c), con el tipo de formación geológica que se está erosionando. Otra posibilidad, es que la alta esfericidad observada pudiera ser heredada de procesos de abrasión en corrientes turbidíticas y de la posición de la partícula dentro de las diferentes capas de flujo (Flores, 2013). En el caso particular de estas subcuencas, los materiales erosionados pertenecen a la Formación Guárico, la cual se depositó en un ambiente turbidítico.

Los índices de humedad y capacidad de transporte de sedimentos indican que las tres subcuencas conformarían un sistema concatenado, en el cual el material es removido por la combinación de efectos climáticos y tectónicos de los sitios de mayor pendiente y relieve (orógenos al norte de las subcuencas de Guárico y de Camatagua), y transportados a sistemas con mayor capacidad para transportar y acomodar sedimentos. Los mayores valores de erosión se encuentran en la subcuenca de Camatagua, la cual está muy cerca de la cadena montañosa y de las principales estructuras presentes en la región. Para esta subcuenca la erosión pudiera reflejar el efecto de movimientos a lo largo de fallas, remoción de material y acomodación del mismo, aguas abajo.

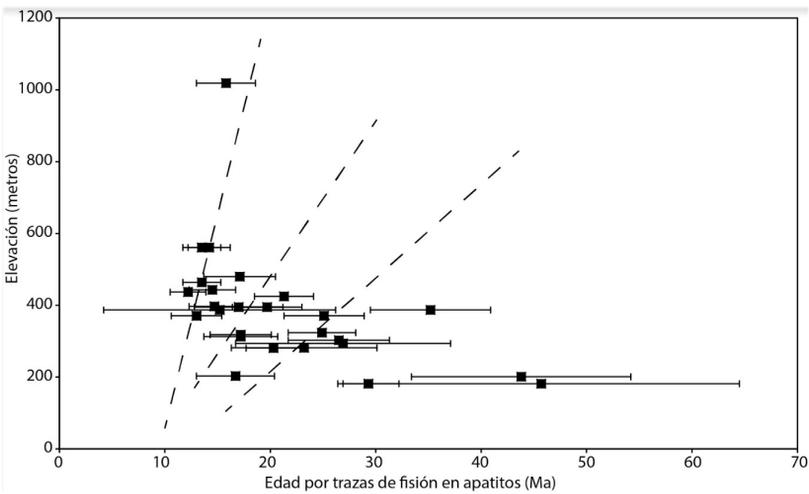
Con la finalidad de integrar todos los resultados se realizó un análisis de correlación de Pearson (cuadro 10) muy similar al realizado por Bermúdez *et al.* (2013), con la diferencia de que al ser sólo 3 cuencas las que se están comparando se requiere de un valor de coeficiente de correlación mayor al 0,7 ( $R^2 > 0,7$ ) para que los resultados sean estadísticamente significativos. Los valores resaltados en cursiva corresponden a correlaciones triviales, es decir, correlaciones que se esperan, ya que las variables son dependientes linealmente. Los valores resaltados en negro son correlaciones fuertes que indicarían posibles dependencias entre las variables, se dice que la correlación es fuerte siempre que  $R^2 > 0,7$ , así se obtienen significativas correlaciones entre la tasa de erosión a largo plazo normalizada extraída a partir de las edades por trazas de fisión en circones (cuadro 2), y variables como precipitación, relieve elevación, índices de erosión a corto plazo uniformes y pesados por precipitaciones, sugiriendo así que la topografía para esas tres subcuencas tiene un fuerte control climático, una vez que los sedimentos son depositados durante el Paleoceno-Eoceno, erosionados y depositados aguas abajo. La similitud entre los distintos valores de dimensión fractal (cuadro 9) y su correlación con la elevación y el relieve encontrado en las cuencas sugieren que no hay variaciones en los mecanismos controladores de la topografía a lo largo del tiempo geológico.

En términos de procedencia sedimentaria y variación de las tasas de erosión a corto plazo, en las muestras pertenecientes a Camatagua y Guárico se discriminaron tres terrenos fuentes, mientras que para la subcuenca de Orituco existe una cuarta población asociada a un terreno de edad Jurásico. La comparación de las edades obtenidas de las tres subcuencas, con respecto a la tasa de erosión derivadas de las edades por trazas de fisión en apatitos *in-situ* previamente publicadas (Pérez de Armas, 2005; y Sisson *et al.*, 2005) alrededor de las tres subcuencas estudiadas, se puede observar similitud entre las edades. Sólo existe una diferencia significativa en las adyacencias de la cuenca de Orituco, donde posiblemente la existencia del graben de Espino, una estructura generada durante el Jurásico pudo haber controlado la exhumación de terrenos por adelgazamiento cortical del área.

Por otra parte, las tasas de erosión mostradas en el cuadro 2 fueron realizadas para tres sectores circundantes al río Guárico (figura 1) y también de forma global para toda el área. Así se obtienen las siguientes tasas de erosión a largo plazo:  $0,2333 \pm 0,0516$ ,  $0,2733 \pm 0,0593$  y  $0,1523 \pm 0,0847$  km/Ma para los márgenes izquierdo, central y derecho, respectivamente, de la subcuenca del río Guárico. Globalmente, la tasa de erosión derivadas de los datos de trazas de fisión en apatitos *in-situ*  $0,2030 \pm 0,0947$  km/Ma son muy similares a los encontrados en las subcuencas analizadas a partir de las edades de trazas de fisión en circones detríticos.

Nuevamente de las tres subcuencas estudiadas, la del Orituco es la que posee menor tasa de erosión, acorde con la baja tasa de erosión encontrada para el margen derecho de la subcuenca del río Guárico. La figura 8 muestra de forma gráfica, edad vs elevación, considerando sólo las edades por trazas de fisión en apatitos in-situ de Pérez de Armas (2005) y Sisson *et al.* (2007). Mostrando así que hoy en día, el incremento en las tasas de erosión a largo plazo posiblemente está siendo controlado por la actividad climática (Herman *et al.*, 2013) corroborando así, los resultados mostrados anteriormente.

**Figura 8.**  
**Relaciones edad-elevación para la zona de estudio, para cada punto el eje x corresponde a la edad por trazas de fisión en apatitos, el eje y corresponde a la altura de la muestra**



Fuente: A partir de datos de Kohn *et al.* (1984), Pérez de Armas (2005) y Sisson *et al.* (2005)

**Cuadro 10.**

**Análisis de coeficiente de correlación (R2) de Pearson entre algunas de las variables analizadas.**

	<i>H</i>	<i>LTER</i>	<i>TSP</i>	<i>USP</i>	<i>SSP</i>	<i>TSPP</i>	<i>USPP</i>	<i>SSPP</i>	<i>R1</i>	<i>R3</i>
h	1									
LTER	<b>0.91</b>	1								
TSP	<b>0.99</b>	<b>0.96</b>	1							
USP	<b>1.00</b>	<b>0.94</b>	1.00	1						
SSP	<b>1.00</b>	<b>0.95</b>	1.00	1.00	1					
TSPP	<b>0.98</b>	<b>0.97</b>	1.00	0.99	1.00	1				
USPP	<b>1.00</b>	<b>0.94</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1			
SSPP	<b>0.99</b>	<b>0.95</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1		
R1	<b>1.00</b>	<b>0.94</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	
R3	<b>1.00</b>	<b>0.94</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
R5	<b>0.94</b>	<b>1.00</b>	0.98	0.96	0.97	0.99	0.96	0.97	0.97	0.97
R7	<b>0.93</b>	<b>1.00</b>	0.97	0.96	0.96	0.98	0.96	0.97	0.96	0.96
P	<b>0.74</b>	<b>0.95</b>	0.82	0.79	0.80	0.85	0.79	0.81	0.80	0.80
WI	-0.98	-0.98	-1.00	-0.99	-0.99	-1.00	-0.99	-1.00	-0.99	-0.99
WIP	-0.92	-0.68	-0.86	-0.89	-0.88	-0.83	-0.88	-0.87	-0.88	-0.88
STI	-0.97	-0.98	-0.99	-0.99	-0.99	-1.00	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99
STIP	-0.97	-0.98	-0.99	-0.99	-0.99	-1.00	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99
DD	-0.43	-0.02	-0.31	-0.37	-0.34	-0.26	-0.35	-0.32	-0.35	-0.35
Hi	<b>1.00</b>	<b>0.90</b>	0.99	<b>1.00</b>	<b>0.99</b>	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>
FD	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>	<b>1.00</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>
RED	-0.84	-0.99	-0.90	-0.88	-0.89	-0.92	-0.88	-0.90	-0.88	-0.89
ESF	<b>0.97</b>	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>1.00</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>



## CONCLUSIONES

Los procesos tectónicos y climáticos para las tres subcuencas estudiadas: Camatagua, Guárico y Orituco están trabajando de forma acoplada, es decir, ellas parecieran conformar un sistema concatenado, en el cual el material es removido por la combinación de efectos climáticos y tectónicos de los sitios de mayor pendiente y relieve, en este caso los orógenos ubicados al norte de cada una de las subcuencas, y transportados a sistemas con mayor capacidad para transportar y acomodar sedimentos. Los mayores valores de erosión se encuentran en la subcuenca de Camatagua, la cual está muy cerca de la cadena montañosa y de las principales estructuras presentes en la región. Para esta subcuenca la erosión pudiera reflejar el efecto de movimientos a lo largo de fallas, remoción de material y acomodación del mismo, aguas abajo. En términos de exhumación de terrenos fuentes circundantes, alrededor de las tres cuencas estudiadas, en las subcuencas de Camatagua y Guárico se discriminan 3 terrenos fuentes diferentes de edades, mientras que la subcuenca del río Orituco existe una mayor variedad de terrenos fuentes. Otro hecho importante es que esta última cuenca estaría recibiendo importantes aportes de un terreno fuente de edad Jurásico que las otras dos cuencas no registran; posiblemente ese terreno se haya exhumado como consecuencia del adelgazamiento litosférico de ese sector durante los procesos de rifting que generaron el graben de Espino (García-Abdeslem *et al.*, 2013).

En términos de contenidos mineralógicos y procedencia sedimentaria puede decirse, que la subcuenca Orituco también exhibe una mineralogía más diversa, con mayores valores de redondez, lo que parece indicar que esta cuenca de mayor área está recibiendo sedimentos de zonas muy alejadas, lo cual es consistente con la conclusión anterior del terreno de edad Jurásica que podría servir como posible terreno fuente. Nuestros resultados son parecidos a los reportados por Pindell y Kennan (2009) y Coello (2012) quienes encuentran para las formaciones Guárico y Roblecito una mayor concentración de circones, granates, cloritoides y anatasa. La erosión de zonas cercanas al graben de espino no pudo ser cuantificada ya que se necesitarían estudios más detallados de termocronología por trazas de fisión en apatitos y circones *in-situ*. Las subcuencas de Camatagua y Guárico poseen valores similares de redondez, pero su esfericidad tiende a ser mayor que las muestras del río Orituco. Quizás esto se deba al hecho de que la mayor parte del material proviene de la Formación Guárico la cual está integrada principalmente por depósitos turbidíticos tipo flysch y wildflysch. La esfericidad observada y calculada para estas dos subcuencas es mucho mayor que la encontrada en el río Orituco, quizás esto refleje un proceso anterior (heredado) de abrasión o retrabajo en esa cuenca, producido en corrientes tipo turbiditas, esto

influye en la esfericidad observada actualmente debido a que los granos ya heredan una forma. Adicionalmente, debe considerarse el hecho de que al norte de las subcuencas de Camatagua y Guárico existan diversos sistemas de fallas que ayudan localmente a pulverizar las rocas hacia ese sector de las cuencas,

Continuando en la subcuenca de Camatagua, se evidencia una mayor erosión, la cual presenta mayor complejidad estructural y se encuentra en la franja de mayor cambio de flujo de calor (Hernández, 2006; Arnaiz-Rodríguez *et al.*, 2013); lo que podría indicar que existe una relación entre la alta tasa de erosión y la complejidad estructural. Las fallas presentes parecen reactivarse a diferentes períodos de tiempo, como se refleja en las edades por trazas de fisión. Finalmente, este sector de Suramérica exhibe una predominancia de los procesos climáticos sobre los tectónicos como agentes controladores de la topografía y de las tasas de exhumación a largo plazo, por otra parte las tasas de erosión a largo plazo parecen indicar que estas se están incrementando para el área de estudio.

El uso de este sistema de estudio, basado en las multiherramientas, presenta importantes ventajas en diversos ámbitos de la geología (geomorfología, tectónica, sedimentología, entre otros), debido a que no sólo se usa información cualitativa sino que se le agregan datos cuantitativos, que al ser comparados permiten corroborar distintas hipótesis.

## AGRADECIMIENTOS

A los proyectos CDCH-UCV PG 08-8273-2011 y PI-21-8659-2013/1; y al Proyecto FONACIT 2012002202 titulado “Geociencia Integrada de los Andes de Mérida GIAME”.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUDEMARD, F.A., SINGER, A., SOULÁS, J. (2006). Quaternary faults and stress regime of Venezuela. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61 (4), 480–491.
- ARNAIZ, M. & ORIHUELA, N. (2013). Curie point depth in Venezuela and the Eastern Caribbean. *Tectonophysics*, 590 (1), 38–51.

- BERMÚDEZ, M.A. (2006). *Procedimientos del Laboratorio de Termocronología de la UCV para la datación de eventos tectotérmicos recientes mediante el método de huellas de fisión en apatitos detríticos*. Trabajo de Ascenso a Profesor Agregado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 156 p.
- BERMÚDEZ-CELLA, M., LÓPEZ, A., BALCÁZAR, M., ZARAZÚA-ORTEGA, G., BONA, R. (2009). Characterization of Zircon and Apatite Crystals from Fish Canyon Tuff International Standard for use in a Thermochronology Laboratory. *Interciencia*, 34 (4), 240–246.
- BERMÚDEZ, M.A., VAN DER BEEK, P. BERNET, M. (2013). Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes. *Lithosphere*, 5, 3–16. doi:10.1130/L212.1
- BERMÚDEZ, M.A., GLOTZBACH, C., ALSON, P., (2015). A new Poissonian algorithm for the determination of fission-track ages: *Computers & Geosciences*, 76, 141–150.
- BERMÚDEZ, M.A., HOORN, C., BERNET, M., CARRILLO, E., VAN DER BEEK, P.A., GARVER, J.I., MORA, J.L., MEHRKIAN, K. (2015). The detrital record of late-Miocene to Pliocene surface uplift and exhumation of the Venezuelan Andes in the Maracaibo and Barinas foreland basins. *Basin Research*, 1–26, doi: 10.1111/bre.12154
- BUSTOS, X., BERMÚDEZ, M.A., TORO, G.E., BERNET, M., ROJAS, O., MARÍN-CERÓN, M.I. (2013). Caracterización de superficies de erosión mediante geomorfología cuantitativa, Altiplano Antioqueño, Cordillera Central de Colombia. *Terra Nueva Etapa*, 24(46) 43–67
- BRANDON, M.T. (1996), Probability density plots for fission-track grain age distributions. *Radiation Measurements*, 26, 663–676
- BRANDON, M.T., VANCE, J.A., (1992). Tectonic evolution of the Cenozoic Olympic subduction complex, Washington State, as deduced from fission track ages for detrital zircons. *American Journal of Science*, v. 292, p. 565-636.

- BRANDON, M.T. RODEN-TICE, M.K., GARVER, J.I. (1998). Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, northwest Washington State. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 985–1009.
- BROCKLEHURST, S. WHIPPLE, K. FOSTER, D. (2008). Ice thickness and topographic relief in glaciated landscapes of the western USA. *Geomorphology*, 97, 35–51.
- BOOKHAGEN, B. (2010). High resolution spatiotemporal distribution of rainfall seasonality and extreme events. based on a 12-year TRMM time series, in review.(1998-2009).Documento en línea, disponible en: <http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>. [Consultado: 2013, Noviembre]
- CHAMPAGNAC, J., MOLNAR, P., ANDERSON, R., SUE, C., DELACOU, B. (2007). Quaternary erosion-induced isostatic rebound in the western Alps. *Geology*, 35 (3), 195–198.
- COELLO V. (2012). *Significado tectónico y procedencia de la Formación Guárico a través de análisis petrográfico y minerales pesados*, Venezuela norcentral. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, 281 p.
- DEMETS, C., GORDON, R.G., ARGUS, D.F. (2010). Geologically current plate motions, *Geophysical Journal International* 181, 1–80, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491x.
- DODSON, M.H. (1973). Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Contribution. *Mineralogy and Petrology*, 40, 259–74.
- EHLERS, T.A. (2005). Crustal thermal processes and the interpretation of thermochronometer data, in Ehlers, T., and Reiners, P.W., eds., *Low Temperature Thermochronometry: Techniques, Interpretations, and Applications: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58, 315–350.
- FELICÍSIMO, A.M. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales* 118 pp. Documento en línea, disponible en : <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf> [Consultado: 2013, Diciembre]

- FELICÍSIMO, A.M. (1999). *La utilización de los MDT en los estudios del medio físico*, 16 . Documento en línea, disponible en : [http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE\\_150a.pdf](http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE_150a.pdf) [Consultado: 2013, Diciembre]
- FERREIRA, T. RASBAND,W. (2012). *ImageJ User Guide ImageJ 1.46 r*. Documento en línea, disponible en : <http://rsbweb.nih.gov/ij/docs/user-guide.pdf> [Consultado: 2013, Diciembre]
- FINLAYSON, D.P, MONTGOMERY, D.R., HALLET B. (2002). Spatial coincidence of rapid inferred erosion with young metamorphic massifs in the Himalayas: *Geology*, 30, 219–222.
- FLORES, M. (2013). Estudio de la relación entre clima, erosión y tectónica a lo largo del río Guárico mediante análisis geomorfológicos, geológicos y datos termocronológicos existentes. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 230 p.
- GALBRAITH, R.F, GREEN, P.F. (1990). Estimating the component ages in a finite mixture. *Nuclear Tracks Radiation Measurements*, 17, 196–206.
- GARCÍA-ABDESLEM, J., REGALADO-SOSA, J.J, CERQUONE-RAVELO, H.R. (2013). Un modelo 3D de la densidad del subsuelo en el graben de Espino: un aulacógeno Jurásico en el oriente de Venezuela. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30 (1), 110–120.
- GUILLEN, W.E., TORIBIO, E.P. (2006). Compilación, digitalización y actualización geológica-cartográfica de la zona Nor-Central estados Guárico y Aragua. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 250p.
- HACKLEY, P, URBANI, F, KARLSEN, A., GARRITY, C.P. (2006). Mapa geológico de Venezuela a escala 1:750.000. *U.S. Geological Survey*, Open File Report 2006-1109. Documento en línea, disponible en : <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1109/>. [Consultado: 2013, Agosto]

- HERMAN, F., SEWARD, D., VALLA, P.G., CARTER, A., KOHN, B., WILLETT, S.D., EHLERS, T.A. (2013). Worldwide acceleration of mountain erosion under a cooling climate: *Nature*, 504, 423–426.
- HERNÁNDEZ, M. (2006). *Modelado numérico 1D de la Cuenca Oriental de Venezuela (USB)*. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar, 153 p.
- KHANBABAELI, Z., KARAM, A., ROSTAMIZAD, G. (2013). Studying Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of Their Geomorphological Characteristics. *International Journal of Geosciences*, 2013, 4, 636–642
- KOHN, B.P., SHAGAM, R., SUBIETA, T. (1984). Results and preliminary implications of sixteen fission-track ages from rocks of the western Caribbean Mountains, Venezuela. *Geological Society of America. Memoir*, 162, 415–421.
- KRUMBEIN, W.C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11 (2), 64–72.
- LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. (2005). *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC Press: Boca Raton, FL, 323 p.
- MACHADO, G. (2011). Relación entre la orientación de las laderas y atributos del suelo en la cuenca del río Caramacate, estado Aragua. Trabajo de Grado para optar al título de Magíster en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, 116 p.
- MACHADO D., PUCHE M., VILORIA J., PARRA M., PRIMERA M. (2007). *Geoespacialización de información climática mediante la utilización de sistemas de información geográfica. caso cuenca alta del río Guárico*. Proyecto Manejo Integral de la Cuenca Alta del Río Guárico, Núcleo de Investigación y Excelencia, Proyecto Iniciativa Científica del milenio. UCV. UNERG.INIA. UPEL. Documento en línea, disponible en: <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/venezuela2008/Geoespacializacion.pdf> [Consultado: 2013, Marzo]

- MANDELBROT, B.B. (1985). Self-affine fractals and fractal dimension. *Physica Scripta*, 32, 257–260.
- MOORE I.D., BURCH, G.J. (1986). Sediment Transport Capacity of Sheet and Rill Flow Application of Unit Stream Power Theory. *Water Resources Research*, 22 (8), 1350–1360.
- MOISY F. (2008). Boxcount (MATLAB Central File Exchange).
- PEREZ-PEÑA, J.V., AZAÑÓN J.M., AZOR, A. (2009). CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers and Geosciences*, 35, 1214–1223
- PÉREZ DE ARMAS, J. (2005). Tectonic and thermal history of the western Serranía del Interior foreland fold and thrust belt and Guárico basin, north-central Venezuela: Implications of new apatite fission-track analysis and seismic interpretation: *Geological Society of America Special Papers*, 394, 271–314.
- PIKE, R., WILSON, S. (1971). Elevation- relief ratio hypsometric integral and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin.*, 82, 1079–1084.
- PINEDA, M.C., ELIZALDE, G., Y VILORIA, J. (2011a). Relación suelo-paisaje en un sector de la cuenca del río Caramacate, Aragua, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*. Universidad Central de Venezuela, 37 (1), 27-37.
- PINEDA, M.C., ELIZALDE, G., Y VILORIA, J. (2011b). Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en un sector de la Cordillera de la Costa Central de Venezuela. *Interciencia*, vol. 36, núm. 5, pp. 370-377.
- PINDELL, J.L. (1991). Geologic rationale for hydrocarbon exploration in the Caribbean and adjacent regions. *Journal of Petroleum Geology*, 14 (3), 237–257.
- PINDELL, J., KENNAN, L., WRIGHT, D., ERIKSON, J. (2009). Clastic domains of sandstones in central/eastern Venezuela, Trinidad, and Barbados: heavy mineral and tectonic constraints on provenance and palaeogeography. In: James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. (eds) *The geology and evolution of the region between*

- North and South America, *Geological Society of London, Special Publications*, 328, 743–797. doi:10.1144/SP328.29
- RAHL, J.M., EHLERS, T.A., VAN DER PLUIJM, B.A. (2007). *Quantifying transient erosion of orogens with detrital thermochronology from syntectonic basin deposits*, *Earth and Planetary Science Letters*, 256, 147–161.
- REINERS, P.W., BRANDON, M.T. (2006). Using thermochronology to understand orogenic erosion. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 34, 419–466.
- SCHMITZ, M., BEZADA, M., AVILA, J., VIEIRA, E., YÁNEZ, M., LEVANDER, A., ZELT, M., MAGNANI, B., ROCABADO, V., OLLARVES, R., GIL, G., SÁNCHEZ, J., CANO, V., JACOME, M. 2008. Crustal thickness variations in Venezuela from deep seismic observations. *Tectonophysics*, 459, 14–26.
- SISSON, V.B., AVÉ LALLEMANT, H.G., OSTOS, M., BLYTHE, A.E., SNEE, L.W., COPELAND, P., WRIGHT, J.E., DONELICK, R.A., GUTH, L.R. (2005). Overview of radiometric ages in three allochthonous belts of northern Venezuela: Old zones, new ones, and their impact on regional geology, in Avé Lallemand, H.G., and Sisson, V.B., eds., *Caribbean-South American plate interactions, Venezuela: Geological Society of America Special Paper*, 394, 91–117, doi: 10.1130/2005.2394(03).
- SMALL, E.E., ANDERSON, R.S. (1998). Pleistocene relief production in Laramide mountain ranges, western United States. *Geology*, 26, 123–126.
- STRAHLER, A.N. (1952). Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63, 1117–1142.
- TABOADA, A., RIVERA, L.A., FUENZALIDA, A., CISTERNAS, A., PHILIP, H., BIJWAARD, H., OLAYA, J., RIVERA, C. (2000). Geodynamic of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787–813.
- TUCKER, G. E., Whipple, K.X. (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodel comparison. *Journal of Geophysical Research* 107, 2179.

TURCOTTE, D.L. (2007). *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 398 p.

WHIPP, D.M. JR., EHLERS, T.A., BRAUN, J., SPATH, C.D. (2009). Effect of exhumation kinematics and topographic evolution on detrital thermochronometer data: *Journal of Geophysical Research*, 114, F04014, doi:10.1029/2008JF001195.

WILSON, J.P., GALLANT, J.C. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: Wiley. 1–27 p. ISBN 0-471-32188-5.

**MARLENE FLORES**. Laboratorio de Termocronología, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Email:

*marleneferrin@gmail.com*

**MAURICIO A BERMÚDEZ**. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de Ibagué, Carrera 22 Calle 67, Ibagué 730001, Colombia Laboratorio de Termocronología, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

**XAVIER BUSTOS**. Centro de Estudios Integrales del Ambiente, Universidad Central de Venezuela

**MATTHIAS BERNET**. Institute des Sciences de la Terre, Université Joseph Fourier, Grenoble-Francia

**CHARLES VIANA**. Laboratorio de Termocronología, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio, km. 8, Carretera Panamericana, Caracas, Venezuela

**SURISADAY ARCIA**. Laboratorio de Termocronología, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. <sup>5</sup>Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio, km. 8, Carretera Panamericana, Caracas, Venezuela

**MICHAEL SCHMITZ**. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS)