

## **Caracterización de superficies de erosión mediante geomorfología cuantitativa, Altiplano Antioqueño, Cordillera Central de Colombia**

Erosion Surface Description using Quantitative Geomorphology, Antioquia upland, situated in the Central Chain of mountains of Colombia

*Xavier Bustos, Mauricio A. Bermúdez, Gloria M. Toro, Matthias Bernet, Otilio Rojas, y María I. Marín*

---

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se caracterizan treinta y cinco superficies de erosión (SE) en la Cordillera Central de Colombia mediante geomorfología cuantitativa y análisis digital de terreno. Utilizando modelos digitales de elevación (MDE) se derivaron las curvas hipsométricas para dichas superficies, y se comparan los resultados desde dos ópticas. Primero, mediante técnicas geoestadísticas utilizando subrutinas elaboradas bajo R, en combinación con el Lenguaje de Consulta Estructurado (SQL). Segundo, mediante sus respectivos valores de integral hipsométrica, lo que permitió discriminar el grado de madurez, juventud y vejez de las mismas. Desde un vista geomático este trabajo contribuye en el empleo de Bases de Datos Geográficas (Geodatabase) lo que permite optimizar el tiempo y el número de cálculos en el procesamiento, todo esto fue integrado usando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados obtenidos acá permiten caracterizar las superficies y relacionar su morfología con fenómenos físicos y climáticos tales como: levantamiento superficial del terreno, erosión, incisión de ríos y presencia de fallas. Adicionalmente, este enfoque multidisciplinario podría ser utilizado para caracterizar topo-formas remanentes a lo largo de Suramérica, las cuales son de vital importancia ya que contienen información de la interacción de procesos climáticos y tectónicos a lo largo del tiempo geológico.

*Palabras clave: Geomorfología, superficie, erosión, bases de datos, análisis cuantitativo, información, hipsometría, caracterización morfológica*

### **ABSTRACT**

In this work, thirty-five (35) Erosion Surfaces (ES) across The Antioqueño Plateau (AP), in the Central Andes of Colombia were characterized and analyzed using quantitative geomorphology techniques and digital terrain analysis. For this, digital elevation model (DEM) were used in order to calculate primary topographical attributes, which were combined with geostatistical techniques using the software R and Structured Query Language (SQL). Assuming that each ES could be considered as basins located at high elevations, we calculated the hypsometric integral in order to determine the maturity degree of the surfaces across the AP, and related them with different controlling processes of the current landscape. From a geomatic point of view this job provides an important contribution in combining geographical databases (Geodatabase), Geographical information System (GIS) and processing optimization. The results obtained here permit us characterize different SE, and related its geomorphic properties with physical and climatic phenomena, such as, rock-uplift, erosion, river incision and presence of faults. The methodology

developed in this work could be used worldwide, where important topographic remnants keep geological information, key to understand the geological evolution of the ancient orogens.

*Key words: Geomorphology, erosion, surface, database, quantitative analysis, information, hypsometric, morphologic characterization*

\*\*\*\*\*

## Introducción

El Altiplano Antioqueño (AA) en la Cordillera Central de Colombia representa el mayor conjunto de superficies de erosión en Los Andes Nortes de Suramérica. El levantamiento está asociado con procesos de exhumación por combinación de fallamiento y erosión a largo plazo (Restrepo-Moreno *et al.*, 2009; Hermelin, 2007; Saenz, 2003). Edades de trazas de fisión en circón en la región oscilan entre 46 a 64 Ma, mientras que edades derivadas del mismo método de datación sobre minerales de apatitos se encuentran en el rango de 34 a 49 Ma, y edades por el método de (U-Th)/He varían desde 22 Ma (~ 760 m) en la parte inferior del escarpe regional a 49 Ma (~ 2.350 m) en la parte superior del AA (Saenz 2003; Toro *et al.*, 2008; Restrepo-Moreno *et al.*, 2009) lo cual sugiere que la exhumación ha sido continua desde la etapa Pre-Andes durante el Eoceno medio, hasta las fases orogénicas Miocena-Pliocena. Sin embargo, existen muchas discrepancias con respecto a las fases de levantamiento y la forma del AA, Page y James (1981) sugieren que inicialmente la superficie fue una sola y que los diferentes niveles observados podrían ser producto de fallamientos en bloques ocurridos durante diferentes fases de levantamiento (Hermelin, 1983). Toro *et al.*, (2008) sugieren la existencia de la existencia de 4 niveles distintos de altiplanos entre 2100 y 2750 m sobre el nivel del mar, separados por elementos tectónicos y relacionados con la actividad tectónica.

La mayor parte del AA es ocupada por el Batolito Antioqueño, el cual se caracteriza por su homogeneidad litológica y poca variabilidad petroquímica, en este predominan rocas granitoides de la serie granodiorita-tonalita, macizas, y faneríticas equigranulares de grano medio (Londoño, 1998). Desde su exhumación, el batolito ampliamente fracturado por diferentes procesos continuos que originaron los levantamientos orogénicos de la Cordillera Central de Colombia, ha sido sometido a diferentes procesos de meteorización, que se traduce en un aumento significativo del espesor de los saprolitos derivados del mismo. De acuerdo con Hermelin (2007), mediciones de esos espesores fueron realizados por investigadores de la Universidad EAFIT de Medellín, e indicarían una mayor profundidad para las superficies más altas, lo que parecería conformar la hipótesis de levantamientos sucesivos (Hermelin, 2007). La forma trapezoidal del Batolito Antioqueño y la deformación relacionada con su emplazamiento, no han sido suficientemente explicado (Londoño, 1998). Hacia su parte este yacen grandes zonas de cizallas a lo largo de las cuales podrían acentuarse los procesos de meteorización y erosión, facilitando el desarrollo de geoformas particulares. Estas últimas podrían ser el resultado de la interacción entre procesos geológicos y del clima a diferentes intervalos de tiempo geológico.

Los altiplanos corresponden a superficies de erosión antiguas ("etchplains"; Wayland, 1933; Goudie, 2013), levantadas tectónicamente, que suelen ser modeladas por procesos climáticos o superficiales generando un nuevo relieve. Cuando la incisión fluvial es pronunciada, se produce un relieve montañoso. El tránsito de superficies de erosión modeladas cerca al nivel del mar a altiplanos escalonados involucra diferentes mecanismos y procesos de levantamiento tectónico. La configuración y extensión de las superficies de erosión pueden emplearse de manera confiable para

visualizar los mecanismos de levantamiento tectónico cuando estos relieves quedan incorporados como altiplanos dentro de las cadenas montañosas. Por ejemplo, van der Beek *et al.*, (2009) muestran como remanentes de un plateau o altiplano antiguo (Eoceno) existen a lo largo de grandes cadenas como Los Himalayas.

Entender, los mecanismos que generan los altiplanos y cómo evolucionan a lo largo del tiempo geológico por la interacción de procesos tectónicos, climáticos y superficiales es de vital importancia, para entender la evolución del paisaje a lo largo del tiempo. Estos estudios podrían ser extendidos a otras áreas de Suramérica, cómo en el caso de Venezuela, donde remanentes de altiplanos, superficies de aplanamientos y grandes mesetas o Tepuyes (Aguerrevere y Zuloaga, 1937; Singer, 1977) han sido pobremente estudiados. Adicionalmente, la existencia de esas superficies planas, podrían representar la expresión superficial de la dinámica mantelar (Braun, 2010; Moucha *et al.*, 2009).

Al menos 35 superficies de erosión, fueron identificadas dentro del AA por Hermelin (2007) y por Toro *et al.* (2008). Fueron clasificadas como PRE-A (Pre-Andes), Tectónicas, B (Batolito), SI (Llanos de Cuivá, La Unión formadas del Oligoceno al Mioceno), SII (Río Negro, formadas del Mioceno al Plioceno) y el tipo Otras (Origen desconocido). En este trabajo se trata de caracterizar las SE desde un punto de vista cuantitativo según van der Beek y Bourbon (2008) para caracterizar las huellas dejadas sobre el relieve por los glaciares en Los Alpes Franceses y los análisis topográficos realizados por Bermúdez *et al.* (2010) para discriminar diferencias entre bloques tectónicos dentro de Los Andes de Venezuela, con el fin de identificar rasgos como levantamiento, basculamiento, incisión de ríos y efectos de la erosión sobre tales superficies.

Adicionalmente al problema que se trata de resolver, la caracterización de las superficies de erosión a través de técnicas de geomorfología cuantitativa y análisis de terreno implica el manejo de grandes cantidades de información, procesamiento y cómputo científico. Así, uno de los aspectos claves para abordar con éxito proyectos que necesitan procesar grandes volúmenes de información geoespacial es mediante el enfoque de Bases de Datos Geográficas o Geodatabase (Zeiler, 1999) por sus siglas en inglés. Esto tiene la ventaja adicional de que permite utilizar los mecanismos ofrecidos por los gestores de bases de datos relacionales como la búsqueda y recuperación rápida de los datos, integración de las herramientas de análisis como el uso del Lenguaje de Consulta Estructurado - SQL- (Silberschatz *et al.*, 2002) y otras ventajas como la validación topológica de las coberturas vectoriales, gestión de la información teselar (*raster*) desde su estructura, integración con Sistemas de Información Geográfica (SIG), generación de interfaces usuarios y de archivos de texto con un formato particular a través de lenguajes de programación.

Así el objetivo general de la presente investigación es caracterizar y discriminar mediante geomorfología cuantitativa las diferentes superficies de erosión a lo largo del Altiplano Antioqueño con la finalidad de analizar relaciones entre las geoformas y diferentes procesos: eventos tectónicos, procesos climáticos y/o superficiales o la interacción de estos procesos. Existen otros aportes adicionales generados del presente estudio, entre ellos destaca la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con herramientas de lenguaje de consulta estructurado SQL.

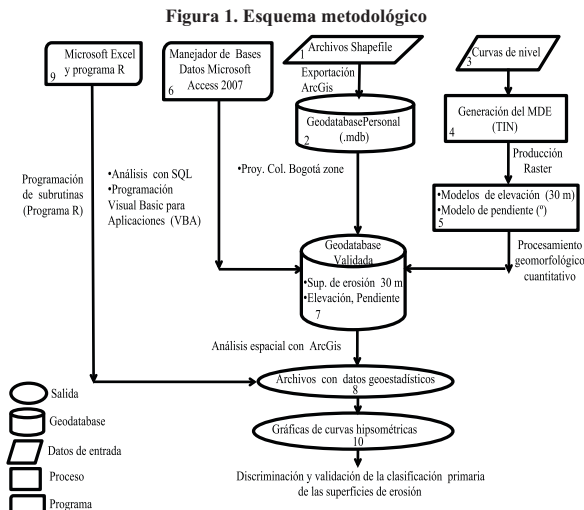
### **Metodología empleada**

Para el desarrollo de esta investigación, se describirán a continuación los códigos utilizados y sus funciones para la generación de las curvas hipsométricas. Estas últimas son

definidas como diagramas utilizados para indicar la proporción de la superficie con respecto a la altura (Strahler, 1952). La curva hipsométrica permite conocer la distribución de masa en la cuenca desde arriba hacia abajo. Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos (Racca, 2007). El valor del área relativa que yace bajo la curva (integral hipsométrica) es indicativo del estado de desarrollo de la cuenca o área de estudio; valores superiores al 60% indican fase de desequilibrio o juventud, valores cercanos al 47% representan equilibrio (madurez), e inferiores a 30% implican fase de *monadnock* o vejez (Racca, 2007; Sencales y Ferre, 1992).

En primer lugar, se utilizó el programa *ArcGis* 10.0 de Esri (Crosier *et al.*, 2005) por ser un software robusto en el área de los SIG, adicionalmente toda la información de las superficies de erosión fueron suministradas por Gloria Toro en ese formato. Usando el software antes mencionado se generó a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) la pendiente (Wilson y Gallant, 2000), posteriormente se realizó todo el procesamiento y análisis de la data geoespacial. *ArcGis* permite además emplearlo bajo el enfoque de bases de datos geográficas o Geodatabases (Booth *et al.*, 2002), en el caso particular de este trabajo, se utilizó el sistema gestor de bases de datos relacional (Silberschatz *et al.*, 2002) Microsoft Access 2010 (Viescas, 2000); el rol principal de este gestor de base de datos es acceder las Geodatabases personales (Zeiler, 1999), trabajándolas simultáneamente con *ArcGis* complementando los análisis espaciales generados por este programa a través del Lenguaje de Consulta Estructurado, mejor conocido como Lenguaje SQL por sus siglas en inglés (Silberschatz *et al.*, 2002), esto permitió adicionalmente programar requerimientos específicos, como la generación de los archivos de texto, con los que fueron incorporados en el programa matemático-estadístico R, para graficar las curvas hipsométricas. Finalmente, se realizó la interpretación cuantitativa de los datos y de las gráficas asociadas a las SE agrupadas por tipo; el esquema metodológico propuesto se muestra en forma de diagrama de flujo en la figura 1.

Una vez generados los modelos numéricos de terreno (MNT), referidos a elevación y pendiente a partir del Modelo de Red de Triángulos Irregulares –TIN (Li *et al.*, 2005) se convierten



Las clasificaciones para las superficies de erosión mencionadas anteriormente se realizaron en base a mapas geomorfológicos detallados a escala 1:25.000, interpretación de fotografías aéreas, análisis de modelos digitales de elevación y observaciones de campo. El cuadro 1 muestra en detalle esta clasificación.

Mediante la combinación de comandos de análisis espacial que se encuentran en la opción *ArcToolbox* de *Arcgis* 10.0, y el Lenguaje SQL combinado con el lenguaje Visual Basic para Aplicaciones -VBA- (Dobson, 2000) se crearon archivos (ficheros) de texto que sirvieron como entrada a una rutina escrita en R (Venables, *et al.*, 2013), el cual tiene la función de calcular y graficar los valores estadísticos (pendiente promedio, altura promedio, entre otros) asociados a las curvas hipsométricas.

Los valores de elevación versus pendientes para cada pixel sobre el modelo digital de elevación son agrupados cada 20 metros y superpuestos con las curvas envolventes (punteadas), un ejemplo de esto es mostrado en la figura 3, las cuales representan bandas de confiabilidad, éstas fueron generadas a través de la combinación del método de media móvil combinado con las técnicas de las bandas de Bollinger con rupturas (Bollinger, 2001; Cahen, 2011). En estadística el método de la media móvil se utiliza para analizar un conjunto de datos puntuales y crear series de promedios. La media móvil representa una serie de números, en la que cada uno de ellos representa el promedio de un subconjunto de los datos originales. Este método tiene diversas ventajas estadísticas ya que suaviza fluctuaciones puntuales (por píxel) y resalta las tendencias a lo largo de cada una de las superficies de erosión analizadas.

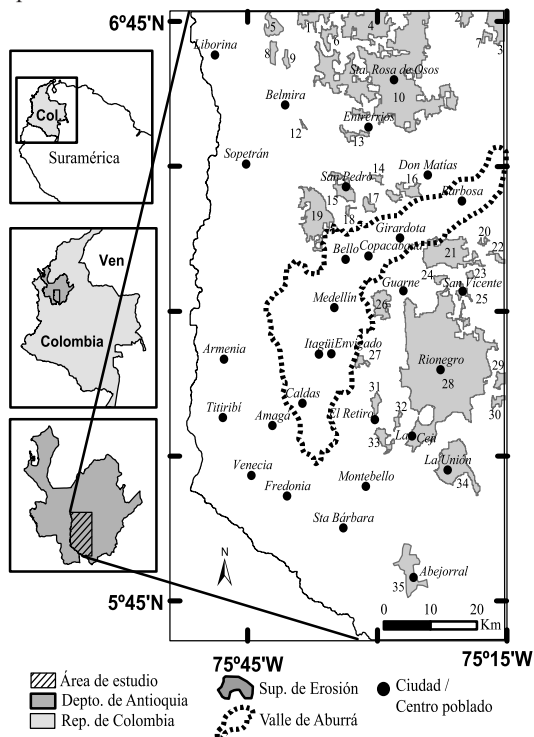


Figura 2. Ubicación del área de estudio en el Departamento de Antioquia, República de Colombia. La ciudad principal es Medellín ubicada en el Valle de Aburrá. Las superficies erosión están descritas en el cuadro 1.

Fuente: Toro et al. (2008).

Cuadro 1. Clasificación de las superficies de erosión de acuerdo a Hermelin (2007) y Toro *et al.* (2008).

Tipo	Identificador	Descripción
B	11,13,14,16,20,22,23,24,30, 32	Batolito (Roca ígnea homogénea)
Pre-A	1,4,6	Pre-Andes, también referenciada por <u>Hermelin</u> (2007) como Pre Cordillera Central.
Otras	2, 3, 7, 21	Su origen es desconocido.
SI	10,17,34	(Cordillera Central) (Llanos de <u>Cuivá</u> , La Unión) formadas desde el Oligoceno al Mioceno. <u>Hermelin</u> (2007).
SII	25, 28,29, 31,35	(Río Negro) formadas durante el Mioceno - Plioceno, de acuerdo a <u>Soeters</u> (1981). Referenciado por <u>Hermelin</u> (2007).
Tectónicas	5,8,9,12,15,18,19,26,27, 33	Formadas por fuerzas tectónicas.

Así, la media móvil (MM) es calculada como:  $MM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{t-i}$  donde n es el número total

de elevaciones, y  $x_{t-i}$  es el valor de elevación para los píxeles anteriores a i.

El modelo de Bandas de Bollinger con rupturas indica cambios en frecuencia o intensidad de los cambios en ciertos intervalos de interés. El método se calcula en función de la media móvil de las elevaciones y n desviaciones estándar por encima y por debajo de la misma (bandas superiores e inferiores). Una banda Bollinger consiste de una media móvil n-períodos, una banda superior (BS) e inferior (BI) situada a K veces una desviación estándar ( $\sigma$ ) n-periodo sobre o por debajo de la media móvil. Así:

$$BS = MM + K\sigma$$

$$BI = MM - K\sigma$$

Los valores típicos para n y K en este caso son 20 y 2, respectivamente.

En la figura 3, se presenta la curva resultante de este proceso, junto con su respectiva envolvente para la SE N° 1.

Los otros programas claves desarrollados bajo R, consisten en extraer las elevaciones (msnm) contenidas en cada celda para cada superficie, generando las gráficas de valores acumulados vs elevación y de elevación vs frecuencia normalizada (0-1) con su media móvil, es de vital importancia, de acuerdo a lo mencionado, porque resalta la presencia de basculamientos en las SE. Los resultados obtenidos tras la ejecución de dichos programas para la SE N° 1 del tipo Pre-A son resumidos en la figura 4.

Figura 3. Curvas de elevación vs pendiente para la SE 1

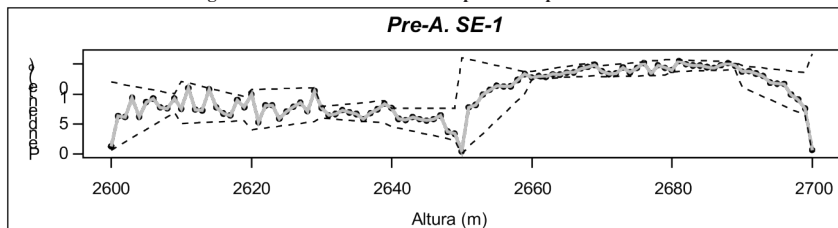
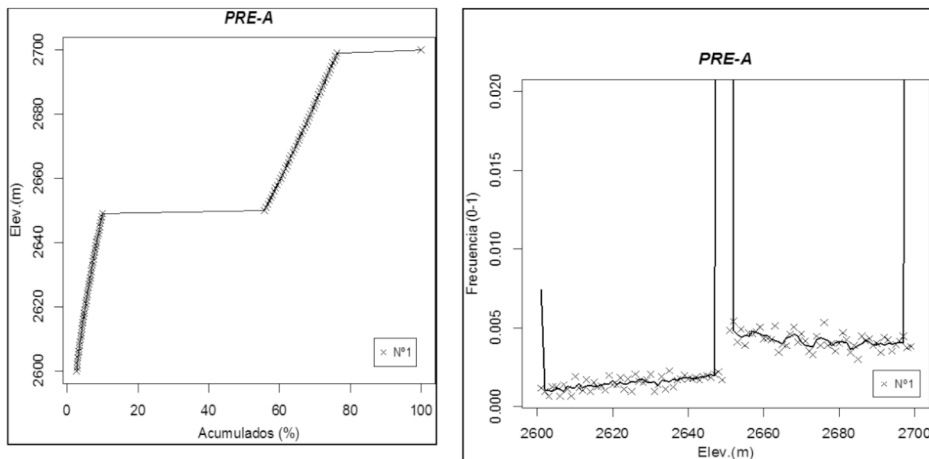


Figura 4. (Izq.) Gráfica de valores acumulados vs elevación para la SE N°1 (Der.) Gráfica de elevación vs valores normalizados



Un estudio complementario a la metodología mostrada es la determinación del grado de madurez de las SE, se realiza mediante el cálculo del área bajo la curva hipsométrica, y se conoce como integral hipsométrica (Strahler, 1952).

La integral hipsométrica (Hsi) es también un indicador del “ciclo de erosión” (Strahler, 1952). El ciclo de erosión puede dividirse en tres etapas: vieja ( $Hsi < 0.3$ ), en el cual la cuenca está completamente estabilizada, etapa de madurez o equilibrio ( $Hsi$  entre 0.3 a 0.6) y etapa juventud o desequilibrio ( $Hsi > 0.6$ ), donde la cuenca es altamente susceptible a la erosión (Strahler, 1952). Los dos gráficos situados a la izquierda de la figura 5 describen como las curvas hipsométricas pueden pasar de inestables a estables según diferentes enfoques (Strahler, 1952, Ohmori, 1993); a la derecha de esta figura, se presentan una idea de los cambios en el relieve y la evolución del paisaje a lo largo del tiempo geológico de acuerdo con los enfoques de Davis (1899) y Hack (1976).

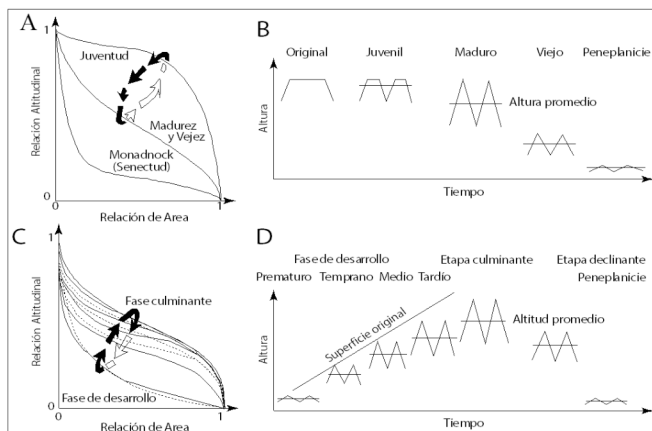


Figura 5. Hipsometría de la cuenca y evolución del paisaje (A) Cambio en la curva hipsométrica según Strahler (1952). (B) Cambios en el relieve inferido a partir del esquema Davisian (Davis, 1899). (C) Cambios en la curva hipsométrica de acuerdo a Ohmori (1993). (D) Cambios en el relieve inferido a partir del esquema de Hack (1976) (Ohmori, 1993). Tomado de Cheng *et al.* 2012. Traducido por los autores.

En este trabajo la integral hipsométrica o área bajo la curva para cada superficie de erosión y para todo el altiplano fue calculada de acuerdo al método propuesto por Pike y Wilson (1971), como la relación (E) Elevación-Relieve expresada como:

$$E \approx Hsi = \frac{Elev\ promedio - Elev\ min}{Elev\ max - Elev\ min}$$

Donde  $E$  es la relación elevación - relieve equivalente a la integral hipsométrica  $Hsi$ ,  $Elev\ promedio$  es la elevación media de la cuenca estimada a partir de las curvas de nivel (contours) de las subcuencas delineadas;  $Elev\ max$  y  $Elev\ min$  son las elevaciones mínimas y máximas de las subcuencas.

Aunque la metodología de curvas hipsométricas fue hecha para cuencas, nosotros estamos asumiendo que cada superficie de erosión representa una de ellas, y estamos viendo sus variaciones altitudinales para identificar si efectivamente corresponden con el concepto de superficies de erosión o *etchplain*. En el cuadro 2, se presenta un sumario o clasificación de las SE en función del grado de madurez, basados en los rangos para la  $Hsi$  establecidos por Kumar *et al.* (2013) e intervalos de clases considerados en este trabajo.

Cuadro 2. Frecuencia de SE por intervalos de vejez, madurez y juventud

Clases	Frecuencia	% acumulado	Grado de madurez
[0,0.3)	11	31.42	Vejez o estabilidad
[0.3,0.6)	15	42.86	Madurez
[0.6,1)	9	25.72	Juventud o desequilibrio

El cuadro 3 muestra por tipo de superficie de erosión los valores promedios de los  $Hsi$ , así como sus desviaciones estándares.

Cuadro 3. Valores del índice  $Hsi$  por tipos de SE

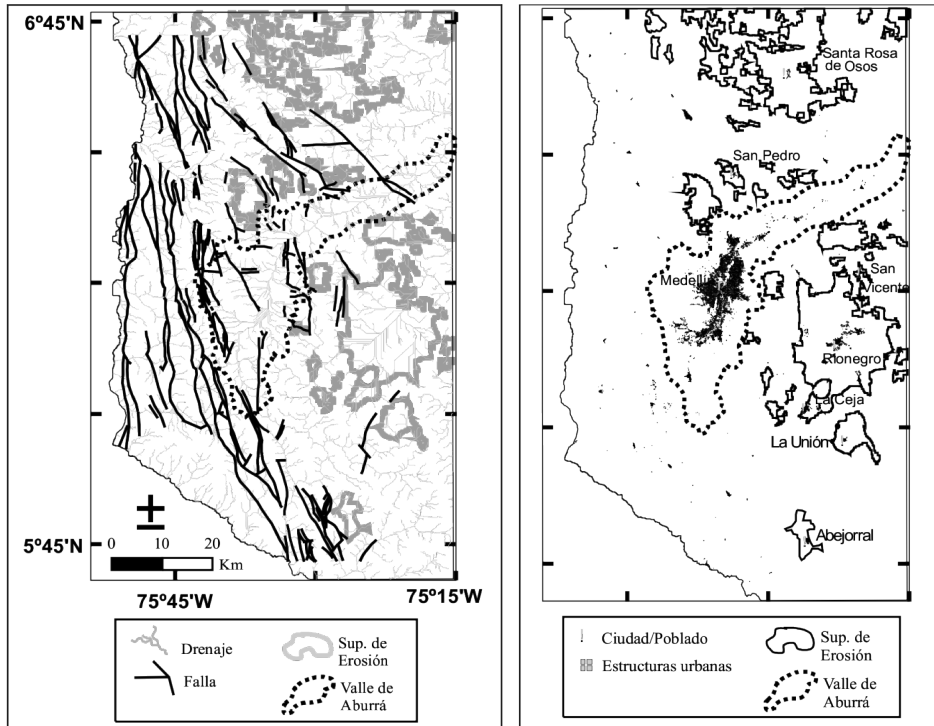
SE	Cantidad	Desv. Estándar $Hsi$	limite inf	Promedio $Hsi$	limite sup	
Altiplano				0.55		Madurez
B	10	0.27	0.14	0.55	0.68	Vejez a desequilibrio
Tectónicas	10	0.17	0.22	0.41	0.56	Vejez a desequilibrio
SI	3	0.07	0.32	0.39	0.46	Madurez
SII	5	0.27	0.02	0.39	0.57	Vejez a desequilibrio
Pre-A	3	0.17	0.39	0.29	0.72	Madurez a desequilibrio
Otras	4	0.31	0.05	0.55	0.67	Vejez a desequilibrio

## Resultados obtenidos y discusión

Previo a la discusión, se presenta en la figura 7A la relación espacial entre las SE, las fallas y el patrón de drenaje, y en la figura 7B los principales asentamientos humanos y estructuras urbanas



Figura 7. (Izq.) Red de drenaje y fallamientos en el Altiplano Antioqueño. (Der.) Asentamientos urbanos importantes ubicados en las superficies de erosión; la ciudad más importante del altiplano es Medellín ubicada en el Valle de Aburrá

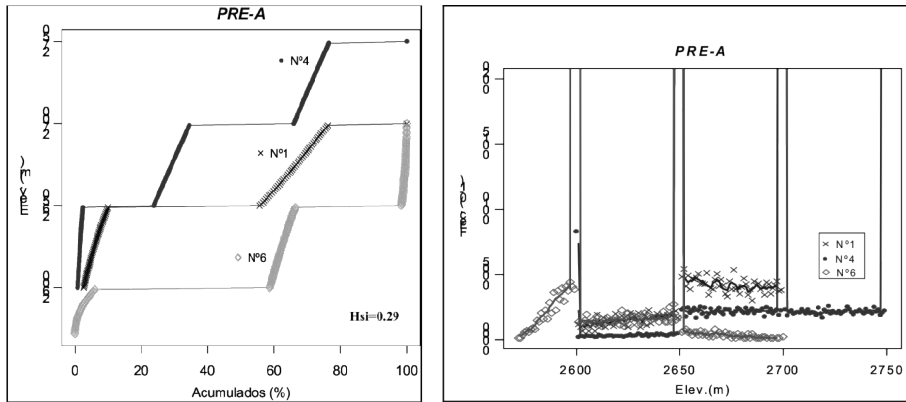


A continuación, se presentarán en forma gráfica los resultados obtenidos y su respectiva interpretación para cada grupo de SE de acuerdo a su curva hipsométrica. También se presentan gráficos de elevación vs frecuencia normalizada y de elevación vs pendiente. El objetivo de estas gráficas, es tratar de identificar patrones similares en los diferentes tipos de SE como por ejemplo: altura sobre el nivel del mar, número de discontinuidades, basculamientos, incisión de ríos o fallamientos, incluso relacionar su forma con la litología y procesos de erosión diferencial (por contrastes litológicos), entre otras.

### Superficies de erosión tipo Pre-A

De acuerdo a Toro *et al.* (2008) se identificaron tres superficies de erosión de este tipo identificadas respectivamente como N° 1, N° 4 y N° 6, localizadas al norte del Altiplano Antioqueño. La Figura 8 muestra la Función de Distribución Acumulada (CDF) y de elevación vs frecuencia para este grupo de superficies.

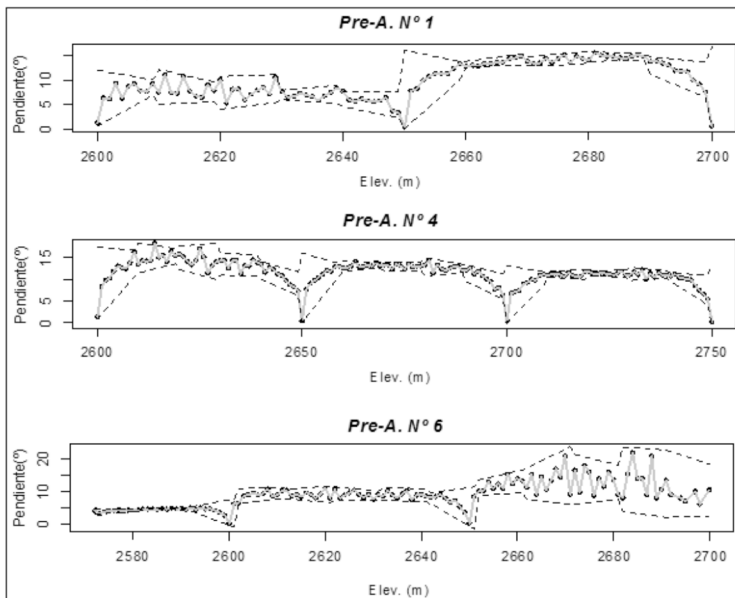
Figura 8. (Izq.) Valores acumulados vs Elevación. (Der.) Elevación vs frecuencia normalizada (0-1) para las SE 1, 4, 6



A través de la función de densidad acumulativa (CDF) de las superficies de erosión: 1, 4 y 6 se identifica la ocurrencia de saltos (entre 100 y 150 m) para este grupo de SE.

Las curvas de elevación vs frecuencia (0-1) sugieren que la superficie 4 ha sufrido levantamientos sin basculamiento; en contraste las superficies 1 y 6 experimentan basculamiento (fallas cercanas a 4.5 km). A continuación se muestran en la figura 9 para cada superficie las curvas de elevación vs pendiente.

Figura 9. Curvas de elevación vs pendiente para las SE 1,4,6

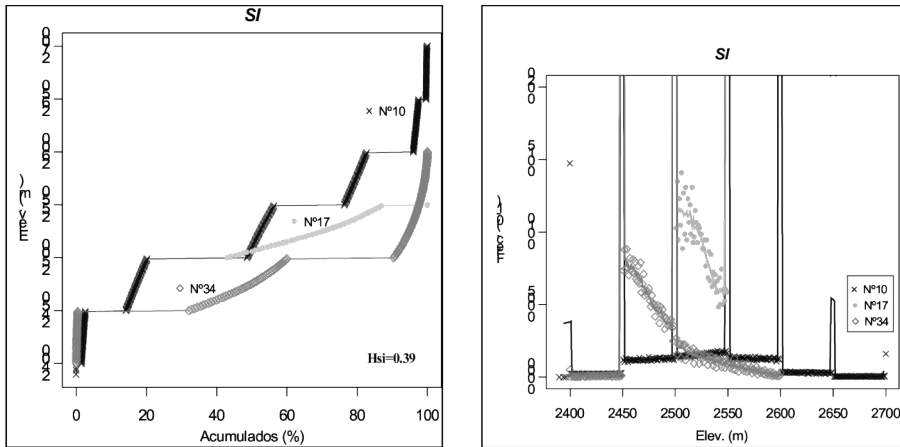


La comparación entre las curvas de elevación versus pendiente (figura 9) muestra claramente los levantamientos e incisión de río de la superficie 1, incisión de ríos y efectos de la erosión sobre la superficie 4 y 6 y las presencias de levantamiento, erosión e incisión de ríos en la superficie 6.

### Superficies de Erosión tipo SI

Toro *et al.* (2008) identificaron tres superficies de erosión de este tipo, rotuladas respectivamente como 10, 17 y 34 distribuidas a lo largo del área de estudio. A continuación en la figura 10, mostramos las curvas hipsométricas para dichas superficies.

Figura 10. (Izq.) Valores acumulados vs Elevación. (Der.) Elevación vs frecuencia normalizada (0-1) para las SE 10,17, 34

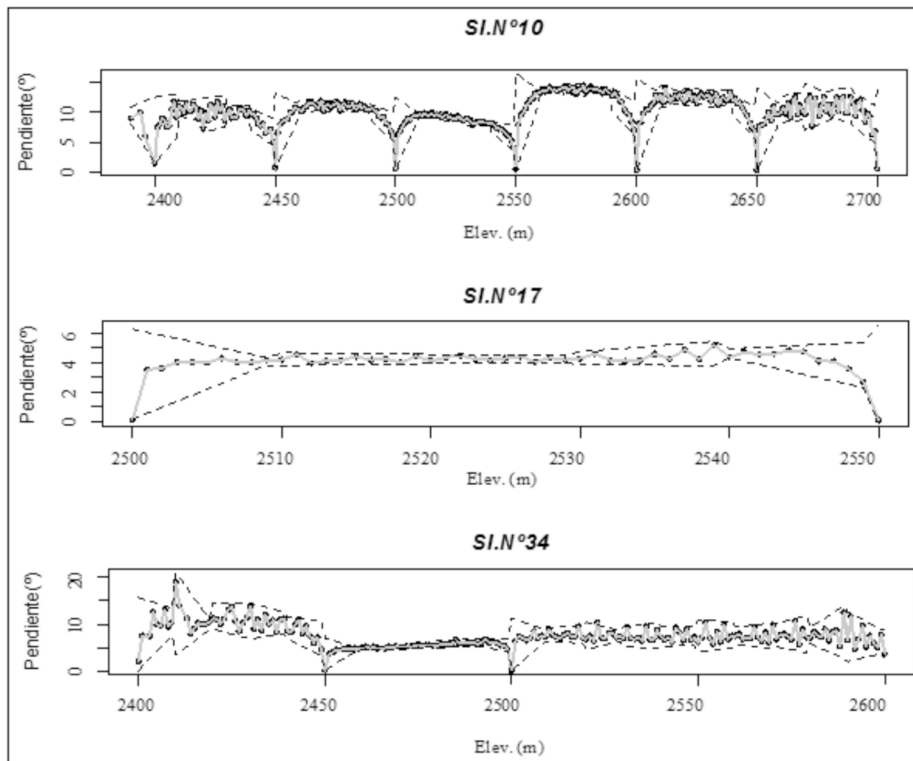


La curva hipsométrica de la SE 10 indica saltos alrededor de 300 m (figura 10. Der). Un similar comportamiento se puede observar con la SE 34; por el contrario la SE 17 muestra un patrón regular (sin saltos), el área de la SE 10 es de 250.53 km<sup>2</sup> en contraste con la SE 17 cuya superficie es de 4.51 Km<sup>2</sup> (mucho menor). Las SE de este grupo están todas a una elevación similar.

Las curvas de elevación vs frecuencia (0-1) indican que las superficies 10 y 17 han sufrido levantamientos sin basculamiento; en contraste la superficie 34 experimenta un posible basculamiento (está cercana a fallas), esto podría explicar los pequeños saltos dentro de la superficie de erosión y el alto grado de inclinación que tiene la curva hipsométrica (figura 10. Der). A continuación, en la figura 11 señala individualmente las curvas de elevación vs pendiente para este tipo de superficies.

Las curvas de elevación versus pendiente de la figura 11 ilustra los efectos de la erosión sobre la superficie 17 y la mezcla de diferentes procesos como lo son: levantamiento superficial, erosión e incisión de ríos en la superficie 10 y 34. Los efectos de la erosión en la SE 34 no son uniformes como en la SE 10, estos son mayores entre 2450 y 2600 m pudiendo tal diferencia deberse a la presencia de litología diferencial; la litología de esta SE es presentada en el cuadro 4.

Figura 11. Elevación versus pendiente para las SE 10, 17, 34



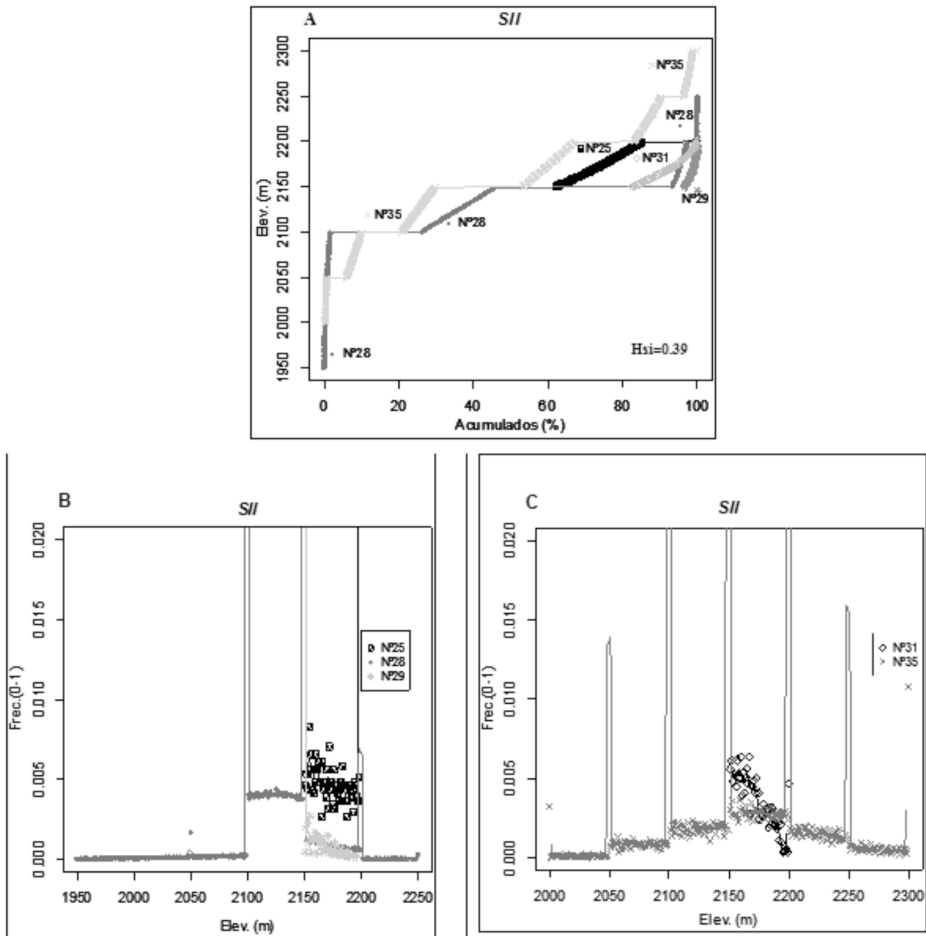
Cuadro 4. Litologías asociadas a las superficies de erosión N° 34

Unidad Geológica	Nombre	Área (ha)
Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central	Anfibolitas	7.8
Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central	Esquistos cuarzo-sericiticos y cloríticos	519.7
Aluviales	Aluviales	706.3
Cuerpos Plutónicos Cretácicos	Stock de La Unión	3156.7

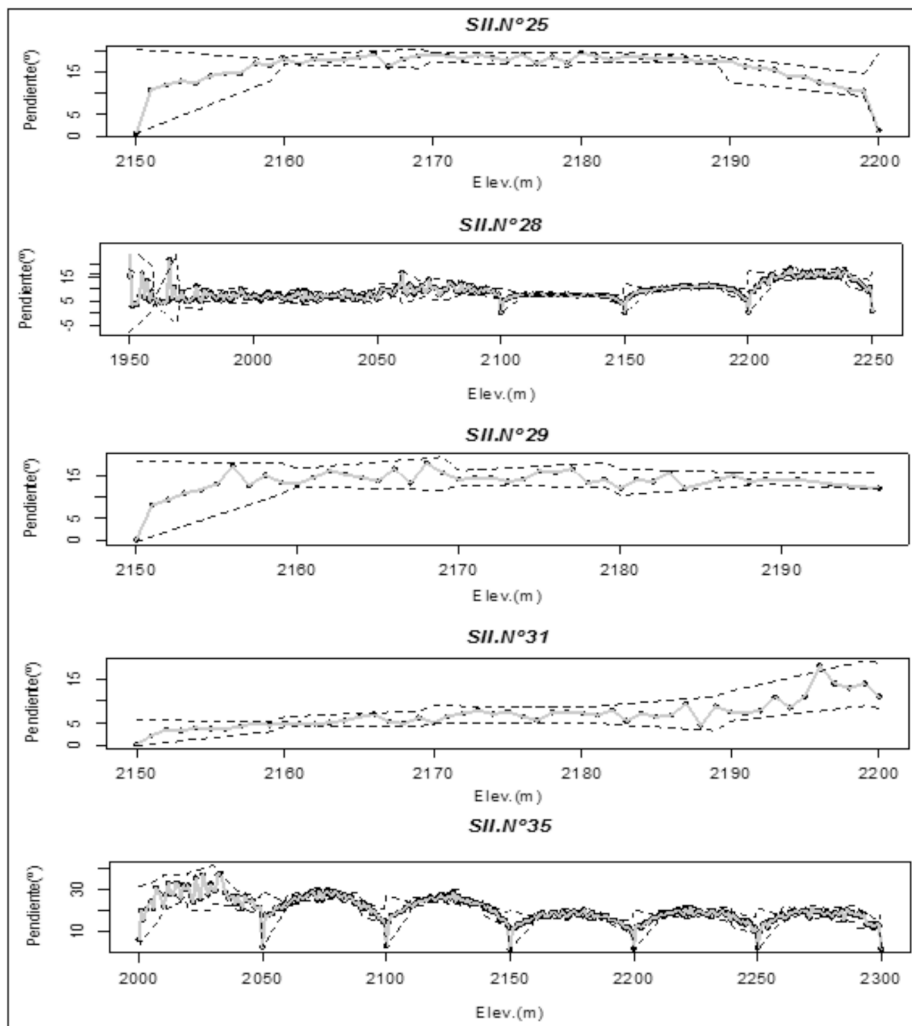
### Superficies de Erosión tipo SII

Toro *et al.* (2008) identificaron cinco superficies de erosión de este tipo, denotadas respectivamente como 25, 28, 29, 31 y 35 localizadas en el centro y sur del área de estudio. La figura 12 resume la comparación de las curvas hipsométricas para estas superficies.

Figura 12.(A). Valores acumulados vs elevación.(B) Elevación vs frecuencia normalizada (0-1) SE 25, 28, 29. (C) Elevación vs frecuencia normalizada (0-1) SE 31, 35



Las curvas de elevación vs frecuencia normalizada revelan que las SE 28 y 35 han sufrido levantamiento con basculamiento (ambas se encuentran cercanas a fallas, figura 7), en contraste las superficies 25, 29 y 31 que no experimentan basculamiento pero si levantamiento. La figura 13 se muestra individualmente las curvas de elevación vs pendiente para este tipo de superficies.

Figura 13. Elevación *versus* Pendiente asociadas a las SE 25, 28, 29, 31, 35

Los gráficos de elevación *versus* pendiente ilustrados en la figura 13 muestran los efectos de la erosión y levantamiento sobre las superficies 25 y 31 y erosión sobre la SE 29. En la SE 28 se observa una combinación de levantamiento, erosión y de incisión de ríos. La SE 35 presenta múltiples y notables incisiones de ríos.

#### Superficies de Erosión tipo Otras

Toro *et al.* (2008) identificaron cuatro superficies de erosión de este tipo, identificadas

respectivamente como 2, 3, 7, 21 localizadas al nor-este y centro del Altiplano Antioqueño. La figura 14 muestra las curvas hipsométricas para estas superficies.

Figura 14. (Der.) Valores acumulados vs Elevación. (Izq.) Elevación versus frecuencia normalizada (0-1) para las SE 2, 3, 7, 21

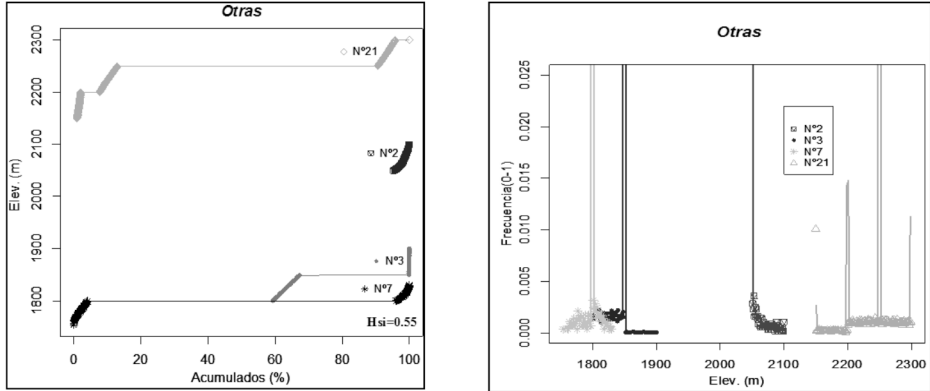
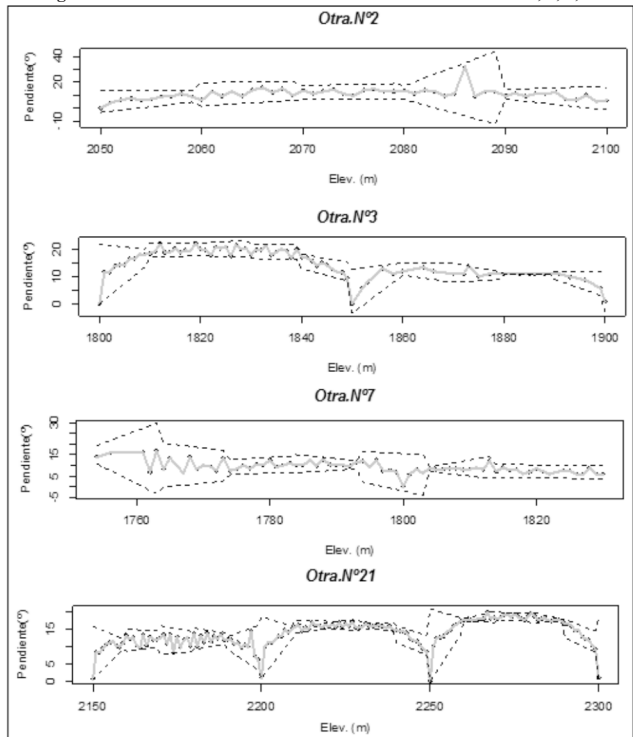


Figura 15. Elevación versus Pendiente asociadas a las SE N° 2, 3, 7, 21

La figura 14 (Der.) muestra que exceptuando la SE 2 (5.16 km<sup>2</sup>), las SE 7 (2.65 km<sup>2</sup>) SE 3 (16.03 km<sup>2</sup>) y SE 21 (45.21 km<sup>2</sup>) presenta saltos; se distribuyen además a diferentes elevaciones. Las curvas de elevación vs frecuencia normalizada mostradas en la figura 14 (Izq.) revelan que la SE 7, ha sufrido basculamiento (aunque no está cercana a fallas), mientras que las SE 2, 3 y 21 han sufrido levantamiento sin basculamiento.

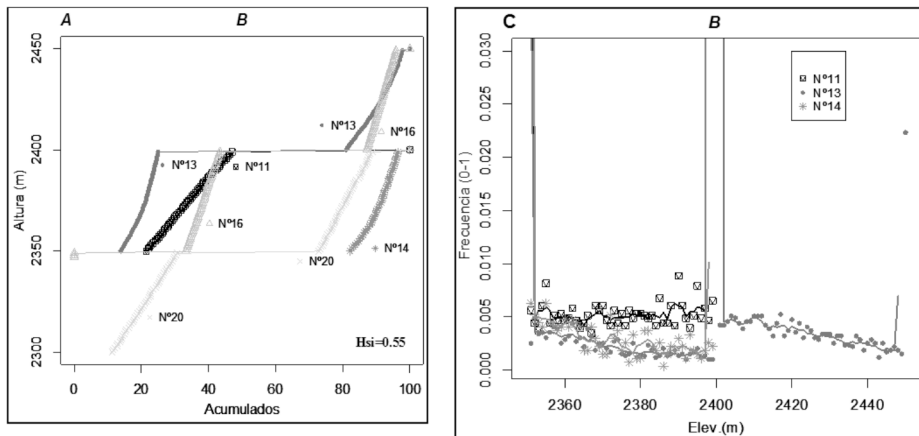
Las curvas hipsométricas de elevación versus pendiente de la figura 15 muestran lo siguiente: efectos de la erosión, levantamiento e incisión de ríos sobre las superficies 3 y 21; erosión e incisión de ríos en la SE 7. Respecto a la SE 2 (menor tamaño), se observa un leve levantamiento y efectos de la erosión.



## Superficies de Erosión B

De acuerdo a Toro *et al.* (2008) se identificaron diez superficies de erosión de este tipo, identificadas respectivamente como 11, 13, 14, 16, 20, 22, 23, 24, 30, 32, distribuidas a lo largo del área de estudio. Debido a su patrón y elevación similares mostramos las funciones de densidad acumulada, por razones de espacio sólo se muestran los gráficos para las primeras cinco superficies de erosión en la figura 16.

Figura 16. (A) Valores acumulados versus elevación SE 11, 13, 14, 16 y 20 (B). Elevación versus frecuencia normalizada (0-1) para las SE 11, 13, 14



Este análisis será realizado por subgrupo de SE con el fin de realizar una mejor interpretación, las SE 13 (5.5 km<sup>2</sup>), SE 16 (11.86 km<sup>2</sup>) y SE 20 (1.37 km<sup>2</sup>) presentan escalonamientos similares coincidiendo además en la elevación; La SE 11 (3.93 km<sup>2</sup>) y SE 14 (2.51 km<sup>2</sup>), no presentan discontinuidades; todas se distribuyen entre los 2300 y 2450 msnm (figura 16A).

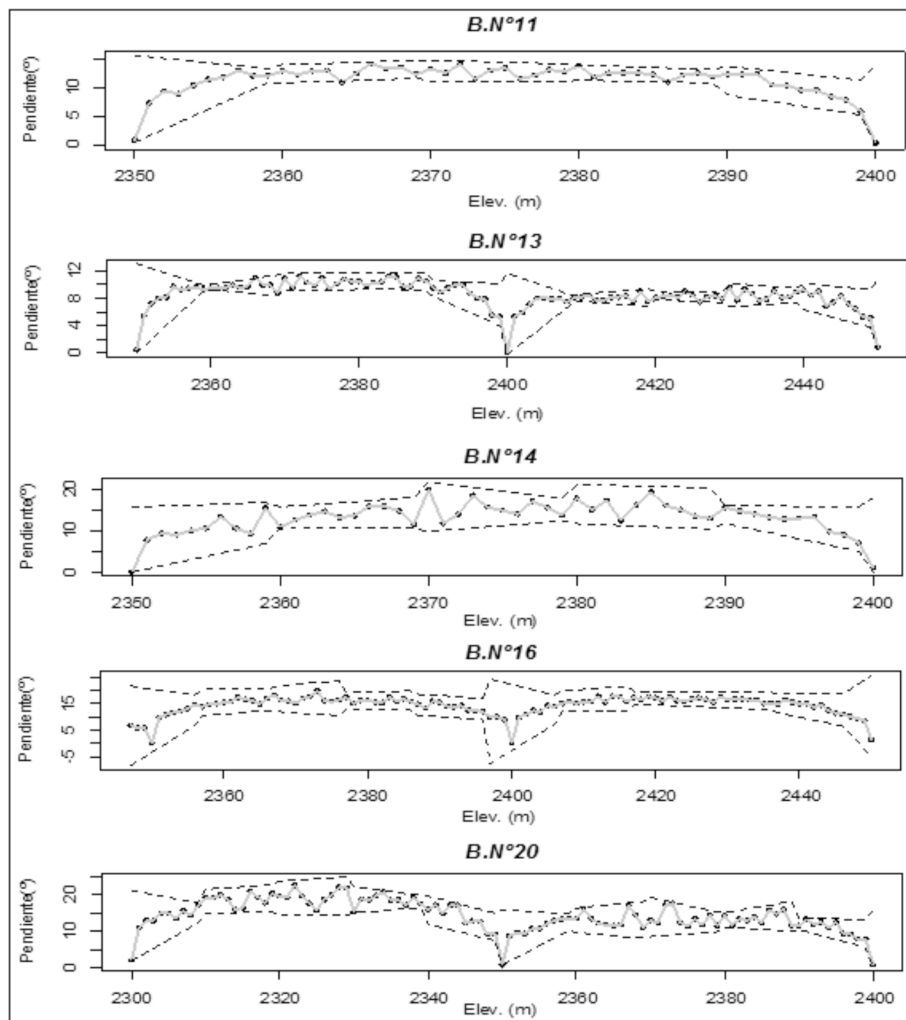
La comparación de las curvas de elevación vs pendiente asociadas a la figura 17 tiende a indicar gran similitud entre las SE tipo B; especialmente un subgrupo conformada por las SE 11 y 14 respecto a los patrones de erosión y levantamiento; las SE 13, 16, y 20 muestran patrones similares al del subgrupo anterior pero con incisiones de ríos.

## Superficies de erosión tipo Tectónicas

De acuerdo a Toro *et al.* (2008) se identificaron diez superficies de erosión de este tipo, identificadas respectivamente como 5, 8, 9, 12, 15, 18, 19, 26, 27 y 33 distribuidas principalmente hacia el nor-oeste y centro del área de estudio con una SE hacia el sur del Altiplano Antioqueño, todas cercanas a la zona montañosa del Altiplano. A continuación en las figuras 18 A-B se muestran las curvas hipsométricas para un grupo de estas superficies.

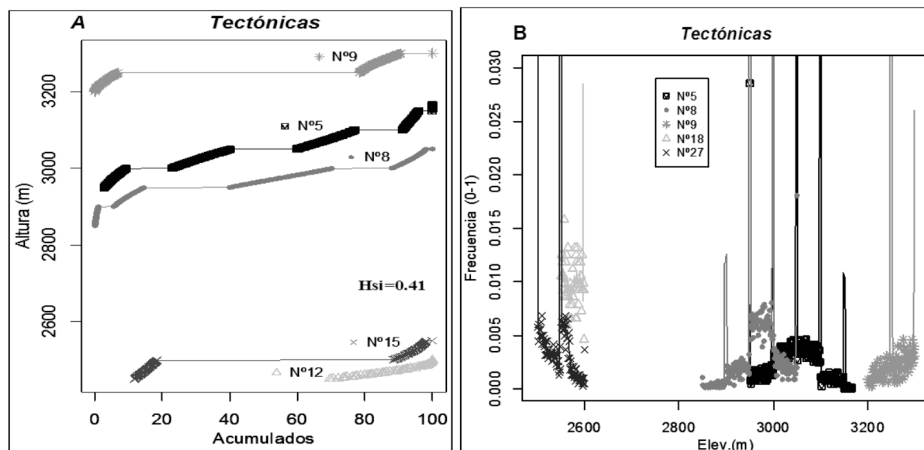


Figura 17. Elevación versus pendiente asociada a las SE 11, 13, 14, 16, 20



Para el subgrupo de superficies tectónicas mostradas en la figura 19-A se observa que en las SE 5 (10.45 km<sup>2</sup>), 8 (5.11 km<sup>2</sup>), 9 (2.97 km<sup>2</sup>) y 15 (13.91 km<sup>2</sup>) presentan ocurrencias de saltos; a excepción de la SE 12 (0.62 km<sup>2</sup>), que es la menor en superficie. Estas superficies se ubican en zonas próximas a la zona montañosa del área de estudio y cercanas o entre fallamientos.

Figura 18. (A) Valores acumulados vs elevación para las SE 5, 8, 9, 12, 15. (B) Elevación vs Frecuencia normalizada (0-1) para las SE 5, 8, 9, 18, 27



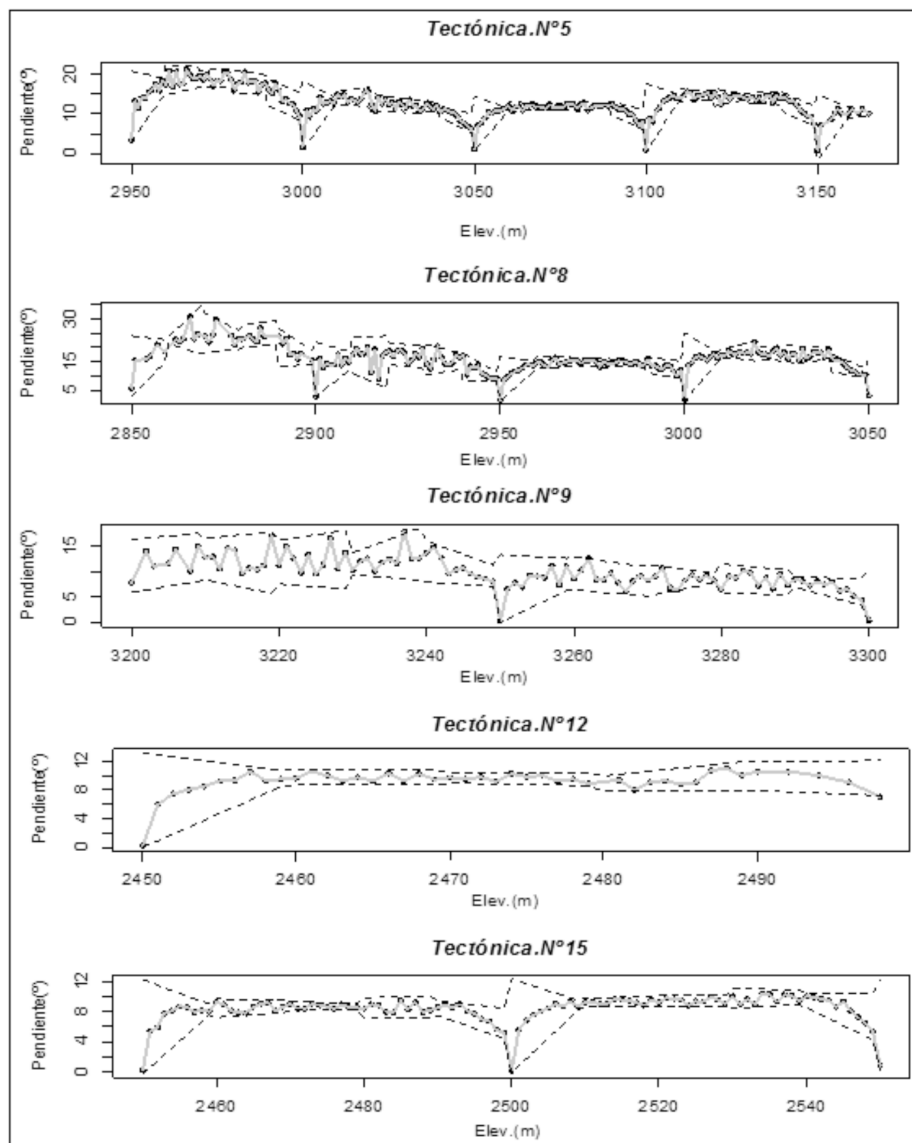
Las curvas de elevación vs frecuencia normalizada asociadas a las SE tipo tectónicas, mostradas en la figura 18-B revelan que las 5, 8, 15 (confundida entre las SE 19 y 26) y 19 (están entre fallamientos) posiblemente han experimentado levantamiento con basculamiento; en el resto de este tipo de superficies de erosión se observa levantamiento sin basculamientos. A continuación, en la Figura 19 se muestran las gráficas de elevación vs pendiente y se describen algunas características importantes.

Las SE 5, 8 y 15 presentan una combinación de erosión con incisión de ríos. Las SE 12 ( $0.62 \text{ km}^2$ ) no presenta incisiones en sus áreas y tienen además un patrón de continuidad similar.

### Análisis general de resultados

Los resultados aquí sugeridos son relativamente consistentes con la clasificación geomorfológica realizada en función de fotografías aéreas, datos de geología de campo y observación de información satelital, previamente realizados por Toro *et al.*, (2008). Sin embargo, en términos cuantitativos, a partir de las técnicas aquí empleadas, que se basan en modelos de elevación digital a resolución de 30 m, indican pequeñas variaciones en tales clasificaciones, siendo posible discriminar otros rasgos, que posiblemente no serían posibles de detectar mediante las técnicas de interpretación y visualización estándar en ciencias de la tierra (estudio foto-geológico e imágenes de satélite, entre otros).

Figura 19. Elevación vs Pendiente asociada a las SE 5, 8, 9, 12,15



Características como inclinaciones o basculamientos en tales superficies, interrupciones por estructuras, erosión diferencial, y diferentes fases de aplanamiento producidos por procesos superficiales, son algunos de los rasgos que se han podido discriminar en este trabajo.

El análisis de las geoformas a lo largo del Batolito Antioqueño, resulta útil para tratar de relacionar la deformación vinculada con su emplazamiento, cambios en el régimen de esfuerzos motivado a diferentes fases orogénicas, y la acción de otros procesos como la meteorización física y química. La preservación de minerales volcánicos procedentes de caídas de ceniza con edades hasta de 5 millones de años (Hermelin 2007; Toro *et al.*, 2008) sobre mantos saprolíticos pareciera indicar que la erosión no juega un papel importante a gran escala, y podría argumentarse que nuestros resultados sólo discriminan saltos e interrupciones en el orden de decenas de metros, sugiriendo que posiblemente no exista una modificación sustancial de la topografía del altiplano a gran escala. A pesar de esta última observación, nuestros resultados apoyan y demuestran la coexistencia de diferentes sistemas morfogénéticos que han evolucionado bajo condiciones climáticas similares, pero posiblemente bajo diferentes regímenes tectónicos, esto es consistente con las diferentes superficies de erosión discriminadas por Ríos-Escobar *et al.*, (2005) quienes utilizaron superficies de tendencias para diferenciar las geoformas.

Además de las diferencias mencionadas anteriormente, la clasificación del grado de madurez de las SE basados en los cálculos de las integrales hipsométricas (Hsi) (cuadro3) en realidad no es fija, es decir, no pueden establecerse grado de madurez absoluta, ya que está cambiando a lo largo del tiempo geológico, y esto es soportado por los resultados mostrados en la cuadro4, en donde se evidencia que a pesar de la clasificación inicial de 7 tipos de SE, al menos 5 de ellas están en fase de desequilibrio o juventud, así la topografía o el paisaje está siendo afectado a gran escala a lo largo del Altiplano. La figura 20A ilustra el histograma y la función de densidad para todas las SE. La curva continua negra indica una característica bimodal, sugiere la presencia de dos poblaciones, la de SE antiguas o viejas y las jóvenes o en desequilibrio dominan la distribución de valores de Hsi. En esta figura se ha superpuesto las funciones de densidad para cada grupo, nótese que en la mayoría de los casos la tendencia bimodal se mantiene, es decir, la variación entre los diferentes grados de madurez. La figura 20B demuestra el solapamiento existente entre las diferentes SE lo cual indica que es muy difícil que el área esté en equilibrio.

Aunque aparentemente todos los valores de Hsi parecieran solaparse cuando la desviación estándar es considerada. Existen diferencias significativas entre las superficies SII y Pre-A con el resto de las SE. De forma general, el altiplano pareciera que estuviese en una fase de madurez (Hsi=0.5), los resultados aquí mostrados sugieren que a excepción de las SE tipo SI el resto están indicando un cambio de fase de vejez o madurez a desequilibrio, lo que pareciera indicar cambios drásticos en el relieve.

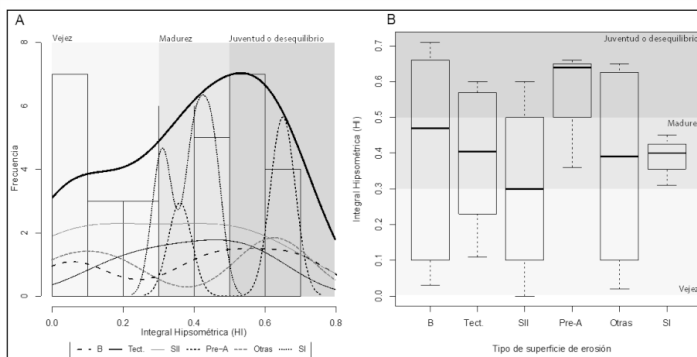


Figura 20. (A). Frecuencia combinada y por tipo particular de SE para los índices hipsométricos. (B). Índice Hipsométrico (Hsi) por tipo de superficie de erosión. Representación por cajas de bigotes.

Las tasas de erosión reportadas durante las diferentes fases de exhumación están en el orden de (~0.2–0.4 mm/año (Restrepo-Moreno *et al.*, 2009) y las similitudes entre diferentes perfiles mediante métodos termocronológicos de baja temperatura (~40-70°C) como (U-Th)/He en apatitos sugieren que toda el área posiblemente haya sido exhumada como una sola unidad estructural o bloque tectónico. A lo largo de Los Andes del Norte de Suramérica, y específicamente en la Cordillera Oriental de Colombia y en Los Andes de Venezuela (Ramírez-Arias *et al.*, 2012; Bermúdez *et al.*, 2010) existe un fuerte control estructural heredado de procesos de “rifting” que controlan los patrones de exhumación. Sin embargo, la presencia de estas estructuras tectónicas heredadas son desconocidas o pobremente estudiadas en la Cordillera Central de Colombia. Información de campo y resultados de laboratorio realizados por Rodríguez-Jiménez (2010) indican que algunos cuerpos intrusivos en la zona de estudio fueron emplazados en regiones superiores de la corteza y que el arreglo general de la fábrica interna sugiere que durante la intrusión los magmas en proceso de cristalización se acomodaron a estructuras preexistentes. Así, una pregunta que aparece y queda sin resolver es ¿Cuál sería el aporte de la herencia tectónica existente a lo largo de Los Andes Nortes de Suramérica en la región del Altiplano de Medellín y cómo ha evolucionado a lo largo del tiempo geológico?

## Conclusiones

Este trabajo arrojó importantes hallazgos desde dos áreas diferentes de las ciencias, la primera, computacional, entre las cuales destaca lo siguiente:

### Desde un punto de vista Informático

1. Trabajar con la estructura de la *Geodatabase* nos permitió una mejor gestión de la información geoespacial y atributiva debido a que se explotaron las ventajas de combinar los análisis espaciales ofrecidos por el entorno *ArcGIS* con aspectos de programación a través del Lenguaje de Consulta Estructurado (SQL) y *Visual Basic* para Aplicaciones (VBA) dentro del entorno del manejador de bases de datos Microsoft Access.
2. Una de estas ventajas es la rapidez de procesamiento computacional, y la relativa facilidad de interpretar y graficar datos provenientes de archivos de texto ofrecido por el código R (software libre), el cual ha cumplido con las expectativas para realizar dichas tareas.

### Desde un punto de vista geológico

3. Los resultados presentados proporcionan con gran resolución indicios de levantamiento, erosión e incisión de ríos. Cada una de las superficies analizadas indica que la tectónica y los procesos climáticos en Colombia afecta las superficies de erosión de diferentes maneras, incluso produciendo basculamiento de tales rasgos.
4. En términos generales, este trabajo permitió validar la discriminación hecha durante el proyecto desarrollado por Toro *et al.* (2008) a lo largo de tales superficies de erosión usando la nomenclatura definida por Page y James (1981). Los resultados obtenidos indican que el empleo de la geomorfología cuantitativa permiten determinar saltos o dislocaciones producidos posiblemente por fallas que muchas veces son difíciles de reconocer en el campo.
5. Los cálculos de la integral hipsométrica permitieron detectar que aunque aparentemente todo el Altiplano Antioqueño esté en una fase de madurez ( $H_{si}=0.5$ ), dentro de cada subgrupo de las SE

existen diferencias significativas en cuanto a su fase evolutiva. El hecho que 5 de 7 tipos de SE indiquen que hay desequilibrio o juventud, refleja la acción de procesos tectónicos, climáticos y superficiales que están afectando el relieve actual.

6. Adicionalmente, se detectó fenómenos de erosión diferencial en varias de las SE, sobre todo en las paredes o vertientes de las mismas, por lo que se necesita estudiar en detalle la litología subyacente, en conjunto con el patrón de precipitaciones, el grado de meteorización, el efecto de la sismicidad circundante y el empleo de datos termocronológicos de alta y baja temperatura.

7. Como recomendación, es de vital importancia realizar medidas en el campo, y correlacionar ellas con imágenes de alta resolución de la distribución y uso del terreno con la finalidad de cuantificar el impacto de las intervenciones antrópicas como procesos superficiales que están modificando el relieve a lo largo del Altiplano Antioqueño.

### Agradecimientos

A COLCIENCIAS 1216-05-13572 y a la Universidad EAFIT por el financiamiento otorgado bajo el proyecto 1216-05-13572 titulado “Estudio del levantamiento de Los Andes en el norte de la Cordillera Central de Colombia; una aproximación por geomorfología, estructural y cronología por trazas de fisión”. Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento otorgado al proyecto PG 08-8273-2011. Al proyecto Geociencia Integral de [Los Andes de Mérida (GIAME).

### Referencias bibliográficas

- AGUERREVERE, A. & ZULOAGA, G. (1937). Observaciones geológicas en la parte Central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Bol. Geol. y Min. Caracas*. Tomo 1 N° 2, 3 y 4 pp. 824.
- BERMÚDEZ, M., KOHN, B., VAN DER BEEK, P., BERNET, M., O'SULLIVAN, P., SHAGAM, R. *et al.* (2010). Spatial and temporal patterns of exhumation across the Venezuelan Andes: Implications for Cenozoic *Caribbean geodynamics Tectonics*, Vol. 29, TC5009, doi:10.1029/2009TC002635.
- BERMÚDEZ, M., VAN DER BEEK, P., BERNET, M. (2012). *Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes*. The Geological Society of America. Lithosphere, published online doi:10.1130/L212.1
- BOLLINGER, J. (2001). *Bollinger on Bollinger Bands*, McGraw Hill, ISBN 978-0-07-137368-5. USA.
- BOOTH, B., CROSIER, S., CLARK, J., MACDONALD, A. *et al.* (2002). *Building a Geodatabase GIS by ESRI*. 380, New York, St. Redlands, California, 92373-8100, USA.
- BRAUN, J. (2010). The many surface expressions of mantle dynamics. *Nature Geoscience* 3, 825-833. doi:10.1038/ngeo1020.
- Cahen, P. (2011). *Dynamic Technical Analysis*. Wiley, ISBN 978-0-471-89947-1. Paris.
- CHENG, K., HUNG, J., CHANG, H., TSAI, H., SUNG, Q. *et al.* (2012). Scale independence of basin hypsometry and steady state topography. *Geomorphology* 171-172 (2012) 1-11. Elsevier.
- CROSIER, S., BOOTH, B., DALTON, K., MITCHELL, A., CLARK, K. *et al.* (2005). *ArcGIS 9. Getting Started With ArcGIS*. ESRI. 380, New York, St. Redlands, California, 92373-8100.
- DAVIS, W. (1899). The geographical cycle. *The Geographical Journal*, Vol. 14, No. 5 (Nov., 1899), pp. 481-504. Blackwell Publishing on behalf of The Royal Geographical Society
- Dobson, R. (2000). *Programación avanzada con Microsoft Access 2000*. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. ISBN: 0-7356-0500-9.
- GOUDIE, A. (2013). *Encyclopedia of geomorphology*. London: Routledge.
- HACK, J. (1976) *Land use transport interaction - a new approach to accessibility*: Development Plans Regional Strategies 2 Division, Department of the Environment, Working Note No 151. London
- Hermelin, M. (1983). Origen del Valle de Aburrá. Evolución de las ideas. *Bol. de Ciencias de la Tierra*, Vols. 78: pp 4765.

- HERMELIN, M. (2007). Sistemas morfogénicos contrastados en el Norte de la Cordillera Central Colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 31 (119):199-216, 2007. ISSN 0370-3908.
- AGUERREVERE, A. & ZULOAGA, G. (1937). Observaciones geológicas en la parte Central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Bol. Gol. y Min. Caracas*. Tomo 1 N° 2, 3 y 4 pp. 824.
- BERMÚDEZ, M., KOHN, B., VAN DER BEEK, P., BERNET, M., O'SULLIVAN, P., SHAGAM, R. *et al.* (2010). Spatial and temporal patterns of exhumation across the Venezuelan Andes: Implications for Cenozoic Caribbean geodynamics *Tectonics*, Vol. 29, TC5009, doi:10.1029/2009TC002635.
- BERMÚDEZ, M., VAN DER BEEK, P., BERNET, M. (2012). *Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes*. The Geological Society of America. Lithosphere, published online doi:10.1130/L212.1
- BOLLINGER, J. (2001). *Bollinger on Bollinger Bands*, McGraw Hill, ISBN 978-0-07-137368-5. USA.
- BOOTH, B., CROSIER, S., CLARK, J., MACDONALD, A. *et al.* (2002). *Building a Geodatabase GIS by ESRI*. 380, New York, St. Redlands, California, 92373-8100, USA.
- BRAUN, J. (2010). The many surface expressions of mantle dynamics. *Nature Geoscience* 3, 825–833. doi:10.1038/ngeo1020.
- Cahen, P. (2011). *Dynamic Technical Analysis*. Wiley, ISBN 978-0-471-89947-1. Paris.
- CHENG, K., HUNG, J., CHANG, H., TSAI, H., SUNG, Q. *et al.* (2012). Scale independence of basin hypsometry and steady state topography. *Geomorphology* 171-172 (2012) 1-11. Elsevier.
- CROSIER, S., BOOTH, B., DALTON, K., MITCHELL, A., CLARK, K. *et al.* (2005). *ArcGIS 9. Getting Started With ArcGIS*. ESRI. 380, New York, St. Redlands, California, 92373-8100.
- DAVIS, W. (1899). The geographical cycle. *The Geographical Journal*, Vol. 14, No. 5 (Nov., 1899), pp. 481-504. Blackwell Publishing on behalf of The Royal Geographical Society
- Dobson, R. (2000). *Programación avanzada con Microsoft Access 2000*. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. ISBN: 0-7356-0500-9.
- GOUDIE, A. (2013). *Encyclopedia of geomorphology*. London: Routledge.
- HACK, J. (1976) *Land use transport interaction - a new approach to accessibility*. Development Plans Regional Strategies 2 Division, Department of the Environment, Working Note No 151. London
- Hermelin, M. (1983). Origen del Valle de Aburrá. Evolución de las ideas. *Bol. de Ciencias de la Tierra*, Vols. 78: pp 4765.
- HERMELIN, M. (2007). Sistemas morfogénicos contrastados en el Norte de la Cordillera Central Colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 31 (119):199-216, 2007. ISSN 0370-3908.
- KUMAR, S., TIGNATH, S., GAJBHIYE, S., PATIL, R. *et al.* (2013). Use of Geographical Information System in Hypsometric Analysis of Kanhiya Nala Watershed. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRS&G)*. Vol.2, 3. ISSN No: 2319-3484.
- LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C., *et al.* (2005). *Digital terrain modeling*. Principles and Methodology. CRC PRESS. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431. USA.
- Londoño, A. (1998). *Geoformas asociadas al Batolito Antioqueño*. - Geología colombiana, 23, pgs 133 Bogotá.
- MOUCHA, R., FORTE, A., ROWLEY, D., MITROVICA, J., SIMMONS, N., GRAND, S. *et al.*, (2009). Deep mantle forces and the uplift of the Colorado Plateau, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L19310, doi:10.1029/2009GL039778.
- OHMORI, H. (1993) Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation: *Geomorphology*, 8, 263–277.
- PAGE, W. & JAMES, M. (1981). The Antiquity of the erosion surfaces and the Late Cenozoic deposits near Medellín, Colombia: implications to tectonics and erosion rates *Rev. CIAF*, 6 (1-3): 421-454.
- PIKE, R. & WILSON S. (1971). Elevation- relief ratio hypsometric integral and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Soc. Am. Bull.* 82: 1079-1084.
- RACCAJ, (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* 77(1-2): 31-38. Rosario, 01-10-2007. ISSN 1666-115X.
- RAMÍREZ-ARIAS, J., MORA, A., RUBIANO, J., DUDDY, I., PARRA, M., MORENO, N., STOCKLI, D., CASALLAS, W. *et al.* (2012). The asymmetric evolution of the Colombian Eastern Cordillera. Tectonic inheritance or climatic forcing? New evidence from thermochronology and sedimentology: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 39, p. 112-137.
- RESTREPO-MORENO, S., FOSTER, D., STOCKLI, D., PARRA-SÁNCHEZ, L. *et al.* (2009) *Long-term erosion and exhumation of the "Altiplano Antioqueño", Northern Andes (Colombia) from apatite (U–Th)/He thermochronology*. Earth and Planetary Science Letters.
- RÍOS-ESCOBAR, V., RENDÓN, D., TORO, G. (2005). Metodología de análisis de superficies de tendencia (trend surfaces analysis) en el norte de la Cordillera Central colombiana. *Memorias X Congreso Colombiano De Geología, IV Seminario Sobre El Cuaternario* En Colombia, Editorial Gente Nueva Ltda. , p.1-8, v.1, fasc.1

- RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ, J. (2010). *Fábrica y emplazamiento de la Diorita de Pueblito, NW Cordillera Central de Colombia: análisis de fábrica magnética y mineral*. Master Tesis de la Universidad Nacional de Colombia, 60p.
- SAENZ, E. (2003). *Fission Track Thermochronology and Denudational Response to Tectonics in the north of the Colombian Central Cordillera*. Master thesis. Course of Geology, Graduate School of Science. Shimane University, Japan.
- SENCIALES, J., & FERRE, E. (1992). Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (provincia de Málaga) en López B. F., C. Conesa y M.A. Romero: Estudios de Geomorfología en España. *Actas de la II Reunión Nacional de Geomorfología, Murcia*, S.E.G. 365-375 p.
- SINGER, A. (1977). Síntesis Regional de la Evolución Geomorfológica de La Cordillera de La Costa en el área De Caracas, *V Congreso Geológico Venezolano, Memorias*, Tomo V, 1977, pp. 55-76.
- SILBERSCHATZ, A., KORTH, H., SUDARSHAN, S., et al. (2002). *Fundamentos de Bases de Datos*. Cuarta Edición. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. ISBN: 84-481-3654-3.
- STRAHLERA. (1952). Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* 63: 1117-1142.
- TORO, G., RENDON, D., MONTES, L. et al. (2008). Levantamiento de los Andes en el Norte de la Cordillera Central de Colombia: Una aproximación geomorfológica, estructural y cronológica (trazas de fisión). En: Colombia *Boletín de Ciencias de la Tierra* ISSN: 0120-3630. v.22 fasc. p.125-126.
- van der BEEK, P., & BOURBON, P. (2008). A quantification of the glacial imprint on relief development in the French western Alps: *Geomorphology*, v. 97, p. 52-72.
- van der BEEK, P., VAN MELLE, J., GUILLOT, S., PECHER, A., REINERS, P., NICOLESCU, S., LATIF, M. et al. (2009). Eocene Tibetan plateau remnants preserved in the northwest Himalaya: *Nature, v. Geosci*, v. 2 (5), 364-368.
- VENABLES, W., SMITH, D., AND THE R CORE TEAM., et al. (2013). An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics. Disponible en <http://www.r-project.org/>
- VIASCAS, J. (2000). *Guía Completa de Microsoft Access 2000*. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. ISBN: 84-481-2512-6. Impreso en España.
- WAYLAND, E. (1933). Peneplains and some erosional platforms. *Annual Report Bulletin Protectorate Uganda*, 1, 77-79.
- WILSON, J., & GALLANT, J. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 479 p.
- ZEILER, M. (1999). *Modeling our World*. Environmental System Research Institute, Inc. 380, New York, St. Redlands, California.



### ■ Xavier Bustos C.

Maestría en Ciencias Mención Ciencias de la Computación, UCV 2000. Licenciado en Ciencias de la Computación, UCV 1994. Profesor Agregado adscrito al Centro de Estudios Integrales del Ambiente (CENAMB) de la UCV. Miembro del Comité Académico de la Maestría en Planificación Integral del Ambiente, UCV. Docente de pre y postgrado, UCV. Doctorado en Ciencias de la Computación (en curso). Correo electrónico: [xavier.bustos@ucv.ve](mailto:xavier.bustos@ucv.ve)

### ■ Gloria Elena Toro Villegas

Doctorado Universite Joseph Fourier Grenoble I 1999. Maestría/Magister Université de Liège (Universidad de Lieja), 1998. Pregrado/Universitario Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Ingeniero Geólogo Universidad Nacional de Colombia, 1984. Profesora Titular Jubilada Universidad EAFIT, Medellín-Colombia. Correo electrónico: [gtoro@eafit.edu.co](mailto:gtoro@eafit.edu.co)

### ■ María I. Marín C.

Doctorado en Ciencias de la Tierra e Ingeniería Ambiental Universidad de Okayama, Japón 2007. Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle - Univalle, Colombia 2004. Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad de Shimane, Japón 2004. Especialización en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle, Univalle Colombia, 2001. Ingeniera Geóloga, Universidad Nacional de Colombia, 2000. Profesora e Investigadora Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Correo electrónico: [mmarine@eafit.edu.co](mailto:mmarine@eafit.edu.co)

### ■ Mauricio A. Bermúdez

Post-doctorado Syracuse University, New York, USA 2012. Doctorado en Ciencias de la Tierra, Universidad Joseph Fourier, 2009, Grenoble-Francia. Maestría en Ciencias Mención Matemáticas, Facultad de Ciencias, UCV, 2002. Licenciado en Matemáticas, Facultad de Ciencias, UCV, 1998. Profesor Asociado en la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, UCV. Correo electrónico: [mauricio.bermudez@ucv.ve](mailto:mauricio.bermudez@ucv.ve)

### ■ Matthias Bernet

Postdoc (Marie Curie stipend), LGCA, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2004. Postdoc, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003. Ph.D. in Geology, Yale University, New Haven, CT, USA, 2002. M.Phil. in Geology, Yale University, New Haven, CT, USA, 2000. Diplom (MSc.) in Geology, Johannes-Gutenberg Universität, Mainz, Germany 1997. Vordiplom (BSc.) in Geology, Johannes-Gutenberg Universität, Mainz, Germany, 1994. Maître de Conférences (Lecturer), ISTERre, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2009. Correo electrónico: [matthias.bernet@ujf-grenoble.fr](mailto:matthias.bernet@ujf-grenoble.fr)

### ■ Otilio J. Rojas

Doctorado en Ciencias Computacionales, Universidad del Estado de California, San Diego, 2009, USA. Maestría en Ciencias Mención Computación, Facultad de Ciencias, UCV, 2000. Licenciado en Computación, Facultad de Ciencias, UCV, 1995. Profesor Asociado en la Escuela de Computación, Facultad de Ciencias, UCV. Correo electrónico: [otilio.rojas@ciens.ucv.ve](mailto:otilio.rojas@ciens.ucv.ve)