

CONTROL DE LA ACTIVIDAD TECTÓNICA SOBRE LOS PROCESOS DE EROSIÓN REMONTANTE: EL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA, CORDILLERA CENTRAL, COLOMBIA

Mario Andrés Cuéllar-Cárdenas¹, Julián Andrés López-Isaza², Edgar Joaquín Carrillo-Lombana¹,
Diego Gerardo Ibáñez-Almeida¹, Jesús Hernando Sandoval-Ramírez¹, Jairo Alonso Osorio-Naranjo³

Forma de citar: Cuellar-Cárdenas, M.A., López-Isaza, J.A., Carrillo-Lombana, E.J., Ibáñez-Almeida, D.G., Sandoval-Ramírez, J.H., y Osorio-Naranjo, J.A. 2014. Control de la actividad tectónica sobre los procesos de erosión remontante: el caso de la cuenca del río Combeima, Cordillera Central, Colombia. Boletín de Geología, 36(1): 37-56.

RESUMEN

En la cuenca del río Combeima, localizada en el departamento del Tolima, sobre la vertiente oriental de la Cordillera Central de Colombia, se evidencian varios eventos de deformación de la corteza asociados a sistemas de fallas mayores, como son el Sistema de Fallas Otú – Pericos y la falla de Ibagué, los cuales controlan las fases deformativas observadas en campo. La cuenca posee un lóbulo alargado en el que se identifican como mínimo cinco etapas hasta su conformación actual, relacionadas a procesos de erosión remontante. Este proceso ha ocasionado la expansión de la cuenca hidrográfica con el progreso gradual hacia su cabecera, mediante la incisión fluvial en la parte alta del río, como una consecuencia directa de la caída del nivel base, relacionado a causas geotectónicas y morfodinámicas presentes en esta zona.

Palabras Clave: Sistemas de fallas, fases deformativas, cuenca del río Combeima, procesos de erosión remontante.

TECTONIC ACTIVITY CONTROL OVER THE HEADWARD EROSION PROCESS: THE COMBEIMA RIVER BASIN CASE, CENTRAL MOUNTAIN RANGE, COLOMBIA

ABSTRACT

In The Combeima River Basin, located in the department of Tolima, on the eastern slopes of the Cordillera Central of Colombia, several events of crustal deformation associated with major faults systems are evident. System failures such as The Otu - Pericos and Ibagué faults controls the deformational phases observed in the field. The basin has an elongated lobe, in which at least five depositional episodes can be identified and that are related to headward erosion processes. This process has resulted in the expansion of the basin towards its headwater through fluvial incision in the upper river as a direct consequence of the drop of its base level, related to geotectonic and morphodynamic processes present in this area.

Keywords: Faults system, deformation stages, Combeima river basin, headward erosion processes.

¹ Servicio Geológico Colombiano, Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, Diagonal 53 No. 34-53, Oficina 209, Teléfono 2200249. Bogotá D.C., Colombia, marioandres_cuellar@yahoo.com

² Eco Oro Minerals Corp. Bucaramanga, Colombia.

³ Agencia Nacional de Hidrocarburos. Bogotá, Colombia.

INTRODUCCIÓN

El término “erosión remontante” o “regresiva” describe el proceso de expansión de una cuenca hidrográfica, relacionado con el progreso gradual hacia la cabecera de la cuenca, mediante la incisión fluvial en la parte alta de los ríos como consecuencia directa de la caída del nivel base por causas climáticas y/o tectónicas (Chen and Chen, 2006). La erosión terrestre es el resultado de la acción combinada de varios factores, como la temperatura, la atmósfera, el agua, el viento, la gravedad, la vida vegetal y animal. La remoción de materiales por la acción de estos agentes externos, conduce al desgaste de rocas, relieve y suelo. A diferencia de la meteorización, la erosión implica necesariamente un transporte, pues al quitar o desprender fragmentos de la roca, éstos son transportados a mayor o menor distancia, proceso que contribuye a la denudación del relieve, al continuo desgaste que tiende a atenuar las diferencias de altitud y a suavizar las irregularidades topográficas en la superficie terrestre.

La tectónica activa y reciente puede ser observada en el paisaje como el principal factor que contribuye al levantamiento de las rocas (Pérez-Peña *et al.*, 2010), dando como resultado una topografía que es el efecto de la interrelación entre los procesos tectónicos y erosivos (Bishop, 2007). Así, la evolución y evaluación de la actividad tectónica pueden ser analizadas en función de la topografía, el patrón de drenaje y las características geomorfológicas (Bull, 2007; Pérez-Peña *et al.*, 2009). El patrón de drenaje en regiones tectónicamente activas es muy sensible a los procesos de fallamiento y plegamiento (Pérez-Peña *et al.*, 2010), los cuales a su vez son los responsables de la acelerada incisión fluvial, asimetría de las cuencas y las desviaciones de los drenajes. Algunos índices geomorfológicos han sido desarrollados como una herramienta básica de reconocimiento para identificar áreas que están experimentando rápida deformación tectónica (Chen *et al.*, 2003). Así, en estudios de tectónica activa las herramientas más usadas son la integral hipsométrica, asimetría de la cuenca de drenaje, índice de gradiente de flujo, sinuosidad frente a la montaña y la relación entre la amplitud del fondo del valle y la altura del valle (Keller and Pinter, 1996). El índice de gradiente de flujo refleja el cambio en la pendiente de un perfil longitudinal de una corriente, el cual puede reflejar actividad tectónica (Brookfield, 1998). Hipsometría es la porción relativa de un área a diferentes elevaciones dentro de una cuenca y puede ser sensible a factores tales como la tectónica, litología y clima (Strahler, 1952; Lifton and Chase, 1992). El análisis morfométrico de una cuenca de drenaje es de gran importancia para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico e hidrológico, así como

para inferir indirecta y cualitativamente la estructura, características y formas de los hidrogramas resultantes de eventos de crecientes (respuesta hidrológica). También permite analizar y comprender los elementos geométricos básicos del sistema, que ante la presencia de agentes externos (por ejemplo precipitaciones extremas), interactúan para originar y/o activar procesos geomorfológicos (movimientos en masa) de vertientes y aludes torrenciales.

El paisaje fisiográfico de la cuenca del río Combeima, en la Cordillera Central de Los Andes colombianos, se caracteriza por presentar profundos valles de laderas abruptas de montaña. El cañón del río Combeima está ubicado sobre la vertiente oriental de la Cordillera Central, cerca al municipio de Ibagué. Como unidad geográfica, limita por el norte con el municipio de Anzoátegui; por el occidente con la cuenca del río Coello; por el oriente con el municipio de Anzoátegui y las cuencas de los ríos La China, Alvarado y Chipalo y por el sur limita con las cuencas de los ríos Opía y Coello. Esta región se encuentra dominada por el Sistema de Falla Otú – Pericos y la Falla de Ibagué, las cuales controlan las fases de deformación observadas en campo.

La cuenca del río Combeima es la principal abastecedora de agua para el consumo humano, industrial y agropecuario en el abanico de Ibagué y ha sufrido durante los últimos años deterioro acelerado con generación de movimientos en masa, que frecuentemente generan desastres como la destrucción de poblaciones y numerosos barrios de esta ciudad (Vergara y Moreno, 1992), pérdida de vidas, daños materiales importantes, interrupción del suministro de agua y movilización de personas asentadas en las riberas del río.

El objeto del presente artículo es analizar el control tectónico sobre los procesos de erosión remontante del río Combeima a través de índices morfométricos, definiendo las relaciones entre el grado de deformación del relieve y la red de drenaje, con el fin de comprender mejor las deformaciones asociadas a los sistemas de fallas y la evolución tectónica de esta parte de Los Andes Colombianos.

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La geología de la cuenca del río Combeima, está representada fundamentalmente por afloramientos de rocas metamórficas correspondientes a las siguientes unidades litoestratigráficas: Neis y Anfibolitas de Tierradentro (neises, anfibolitas, milonitas), Metasedimentarias de Santa Teresa (cherts,

subgrawacas, liditas) y Complejo Cajamarca (esquistos negros y verdes, anfibolitas, mármoles, serpentinitas, milonitas) (Vergara y Moreno, 1992). De igual manera se observan rocas ígneas intrusivas asociadas al Batolito de Ibagué (granodioritas, tonalitas, granitos), pórfidos (andesíticos, dacíticos), y rocas ígneas extrusivas como depósitos de flujo piroclásticos (lapilli, ceniza) y lavas antiguas y recientes (andesíticas) (Vergara y Moreno, 1992). En forma discordante se presentan depósitos aluvio-torrenciales suprayacentes (holocénicos), pertenecientes al Abanico de Ibagué (Barrero y Vesga, 1976) y sedimentos aluviales recientes aportados por las microcuencas El Filtro, El Guamal, La Honda, Juntas, La Plata, La Platica, Cay, Ramos – Astilleros, Samú y Corazón (FIGURA 1). La cuenca presenta dos grandes

unidades de relieve con topografías contrastantes: (a) Un sector montañoso de topografía muy abrupta que abarca la mayor extensión del área, con alturas comprendidas entre 1.300 m.s.n.m. y más de 5.000 m.s.n.m., y pendientes que oscilan entre 35° y 90°; (b) una unidad de abanico aluvio-torrencial de topografía suave a moderadamente inclinada, emplazada en la parte media - baja (o terminal) de la cuenca, con elevaciones desde 800 m.s.n.m. en la línea base del abanico, hasta 1.300 m.s.n.m. en el ápice del mismo con pendientes entre 5° y 50°. Estructuralmente esta región evidencia diversos eventos de deformación asociados a sistemas de fallas mayores como son el Sistema de Fallas Otú – Pericos (SFOP) y la Falla de Ibagué (FI), las cuales controlan la actividad tectónica observada en la región (FIGURA 2).

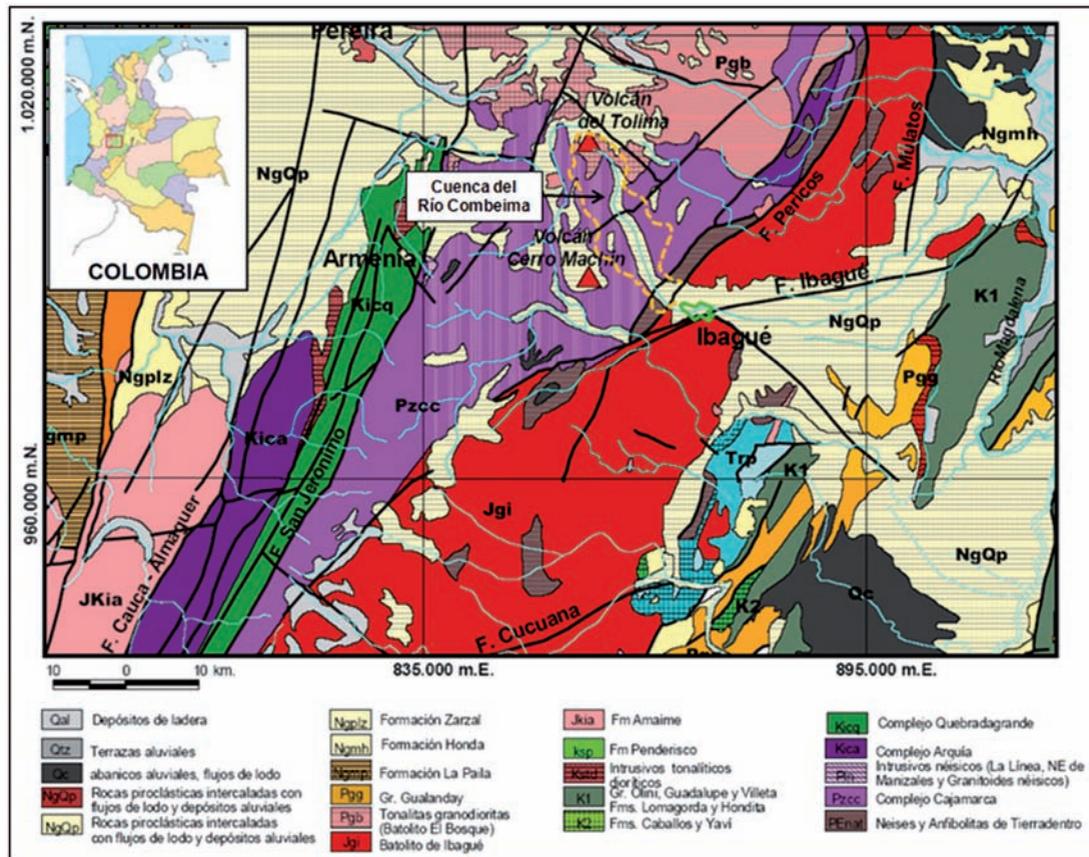


FIGURA 1. Mapa geológico generalizado de la zona de Falla Ibagué, departamentos de Tolima, Quindío y Valle del Cauca. Tomado de INGEOMINAS (1997).

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se realizaron estudios mesoestructurales, microestructurales y cinemáticos. Adicionalmente, se emplearon técnicas de análisis de índices geomorfológicos de hipsometría y el factor de asimetría de la cuenca de drenaje, al igual

que índices morfométricos, para establecer el grado de deformación en el relieve y la red de drenaje de esta cuenca. Para este fin, se analizaron cinco etapas de erosión de la cuenca del río Combeima, dividiéndola en cuenca baja, media, media alta, alta y total. Cada etapa identificada en el modelo digital del terreno (MDT), se estableció siguiendo dos criterios fundamentales, el

primero de tipo estructural, integra la delimitación de bloques por trazos de falla de sistemas regionales, con el objetivo de determinar si el área registra en su historia evolutiva múltiples fases de deformación (Hatcher, 1995) y presenta tectónica activa (Keller and Pinter, 1996) que condicione la evolución del paisaje. Los datos estructurales levantados en campo relacionados con los

diferentes sistemas de fallas fueron analizados mediante el software TectonicsFP (Reiter and Acs, 2000), se calculó el régimen de esfuerzos con ayuda de la técnica de los diedros rectos, y la solución de dispersión de los ejes P y T usando el diagrama de estabilidad definido por los ángulos máximos de desviación ideal al igual que para la particular de cada estría.

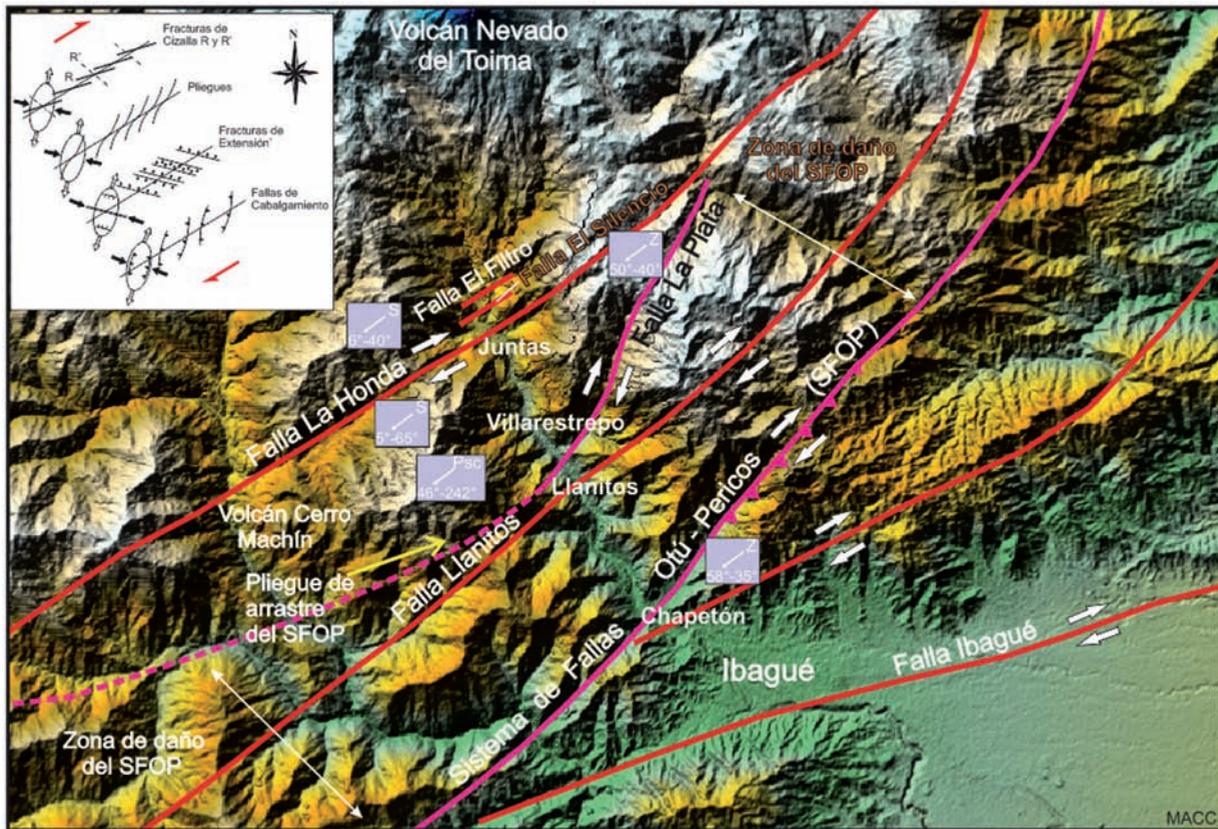


FIGURA 2. Estilo estructural propuesto para la cuenca del río Combeima. En el recuadro se esquematiza la orientación teórica de fallas y pliegues en una zona rumbo deslizante dextral.

El segundo criterio de tipo geomorfológico se establece una vez reconocidas las deformaciones asociadas a las estructuras mayores definidas, para esto se adelantaron análisis de elementos geomorfológicos (Verstappen and Van Zuidam, 1992) en la zona de estudio, tanto de las márgenes, como de las microcuenas del río Combeima, con el objetivo de establecer las características morfométricas de la cuenca, el relieve relativo de los elementos y el análisis de patrón y grado de incisión del drenaje. En este sentido, se implementaron técnicas de análisis de índices morfométricos para encontrar y definir relaciones que permitieran medir de manera relativa el grado de deformación del relieve y de la red de drenaje asociado con los procesos tectónicos recientes que afectan la región.

El análisis morfométrico de una cuenca de drenaje es de gran importancia para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico e hidrológico, así como para inferir indirecta y cualitativamente la estructura, características y formas de los hidrogramas resultantes de eventos de crecidas (respuesta hidrológica). También permiten analizar y comprender los elementos geométricos básicos del sistema, que ante la presencia de externalidades (por ejemplo precipitaciones extremas), interactúan para originar y/o activar procesos geomorfológicos (movimientos de masa) de vertientes y aludes torrenciales.

Para cada etapa propuesta en este estudio, se generó un “alineamiento” y una línea de contorno o divisoria

empleando la extensión *hidrology* del sistema de información geográfico ArcGIS (FIGURA 3A). Cada “alineamiento” corresponde al perfil del cauce del río en cada una de las etapas. Para el cálculo de la hipsometría de la cuenca, cada perfil se tabuló en Excel, como una curva de longitudes acumuladas en las abscisas y elevaciones en las ordenadas a partir de los datos exportados de la extensión *3D Analyst* del sistema de información geográfico ArcGIS. El cálculo de las “áreas superficiales, altura media y volúmenes de desplazamiento” de cada una de las cinco etapas de evolución propuestas, se efectuó con el programa computacional *Autocad Civil 3D* del año 2008. El procedimiento empleado para obtener

las áreas superficiales se fundamenta en la generación de superficies desde las curvas de nivel, las cuales se presentan delimitadas según los bloques propuestos. A partir de las superficies generadas se efectuaron los cálculos del volumen desplazado, que incluyen el límite de la cuenca con coordenadas X, Y, Z. Con este borde se crea una superficie superior a modo de “tapa” del segmento a analizar. El programa calcula el volumen asumiendo la continuidad de la superficie del terreno como la diferencia entre la superficie inferior (superficie actual) y la superficie superior (“tapa”), simulando el molde negativo previo a los procesos de erosión remontante analizados (FIGURA 3B).

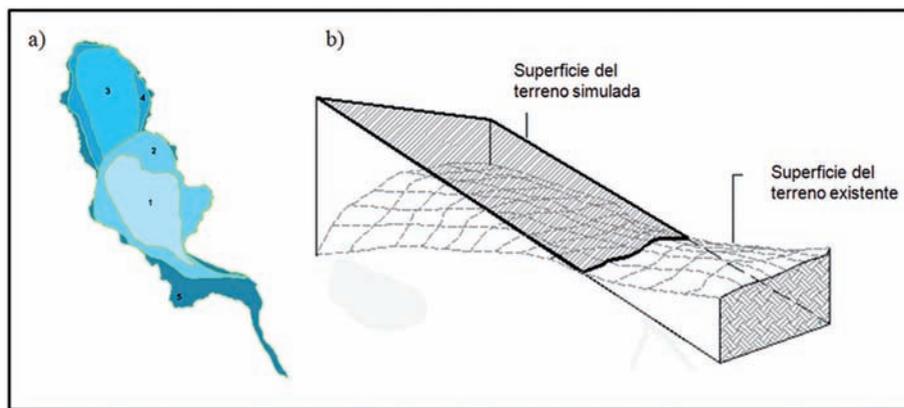


FIGURA 3. (a) Etapas evolutivas sugeridas, para la evaluación del proceso de erosión remontante en la zona de estudio. (b) Bloque diagrama donde se presenta las superficies: actual y superior (“tapa”) empleadas para el cálculo del volumen desplazado durante estas fases.

Hipsometría de la cuenca de drenaje

Este método se centra en la evaluación de la cuenca de drenaje como unidad fundamental del paisaje, mediante la identificación de los ajustes que la cuenca debe realizar a la influencia de fuerzas tectónicas, procesos climáticos y erosivos. Esta técnica además, permite un análisis volumétrico del relieve para definir las cargas verticales a través de la identificación de la distribución de elevaciones en una cuenca de drenaje y de la compensación de áreas. El análisis consiste en comparar la curva calculada de la cuenca contra una curva teórica que refleja una cuenca en equilibrio, de tal forma que los desajustes que presente la curva calculada indicará puntos de inflexión donde el sistema está en desequilibrio por algún fenómeno tectónico o erosivo (FIGURA 4A). La curva calculada se construye graficando en las ordenadas la proporción de la altura total de la cuenca h/H contra la proporción del área total de la misma a/A en las abscisas, donde: A es el área total de la cuenca, a es el área por encima de la línea de elevación elegida, h es la línea de elevación elegida y H es la diferencia de elevación entre el punto más alto y el más bajo de la cuenca.

Para la cuenca del río Combeima se elaboró un análisis de las etapas evolutivas identificadas hasta la conformación actual de la misma para encontrar similitudes y convergencia en los aspectos hipsométricos que se relacionan con el dominio de los diversos procesos tectónicos planteados. De igual manera, se interpretó el valor de la “integral hipsométrica” (IH), la cual es un índice del ciclo de erosión del paisaje:

$$IH = \frac{\text{elevación media} - \text{elevación mínima}}{\text{elevación máxima} - \text{elevación mínima}}$$

Los valores de la IH oscilan entre 0,15 y 0,85, y tienden a estar entre 0,4 y 0,6 (Pike and Wilson, 1971). La interpretación de este índice depende de los valores obtenidos, indicando relieve juvenil si los valores son altos, producto de levantamientos tectónicos. Si los valores son intermedios a bajos, sugiere un relieve maduro donde existe un equilibrio entre el levantamiento tectónico y la disección de los drenajes. De igual manera, valores altos de la IH indican que amplias áreas de la cuenca original no han sido modificadas a laderas.

Factor de Asimetría (FA) área total de la cuenca del río Combeima

El índice de Factor de Asimetría de la cuenca de drenaje (FA) detecta basculamientos tectónicos perpendiculares a la dirección de drenaje principal y es definido por Keller and Pinter (1996) como: FA: $100 * (Ar / At)$,

donde Ar es el área de la cuenca a la derecha del drenaje principal aguas abajo y At es el área total de la cuenca (FIGURA 4B). Su rango de valores está entre 0 y 100, de manera que valores cercanos a 50 indican un marco tectónico estable y valores mayores o menores sugieren basculamientos a la izquierda o a la derecha respectivamente (Keller and Pinter, 1996).

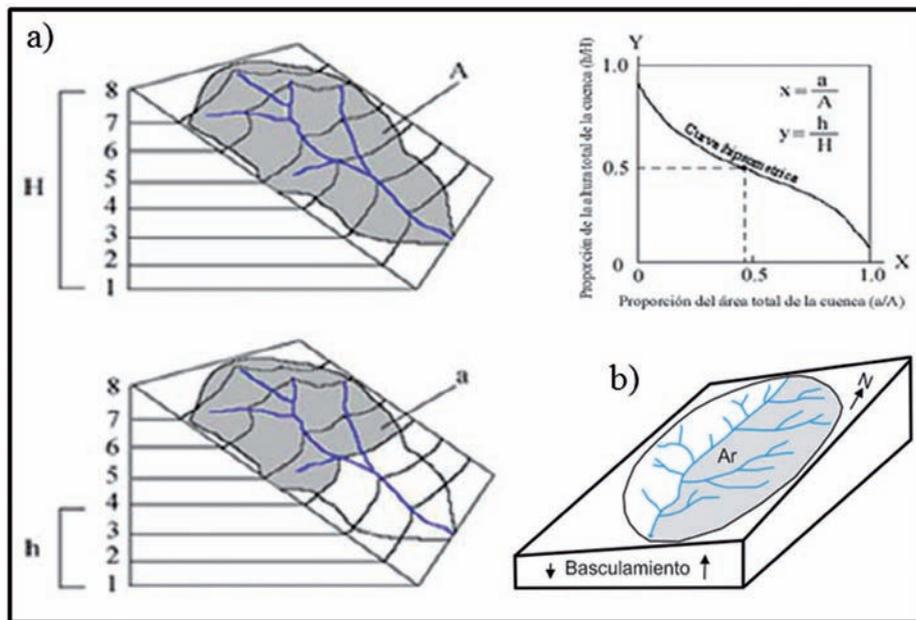


FIGURA 4. (a) Curva hipsométrica y (b) Factor de asimetría (FA) de la cuenca de drenaje, modificado de Keller and Pinter (1996).

Perfil longitudinal fluvial de la cuenca del río Combeima

Los ajustes del drenaje pueden ser considerados marcadores morfodinámicos que registran espacialmente las variaciones en la tasa de levantamiento (Burbank and Anderson, 2001). Con el fin de detectar tales ajustes se trabajó con la metodología de Duran (1964), quien parte de la hipótesis que las corrientes en equilibrio presentan un perfil longitudinal semejante a una parábola, debido a que el poder de la corriente es proporcional a la pendiente del canal, alto hacia la cabecera y con una disminución gradual aguas abajo. Con la implementación de esta metodología se realiza un análisis comparativo del perfil fluvial con un perfil teórico obtenido para cada cuenca de drenaje, planteando:

$$X = \sqrt{(D^2/H)} * \sqrt{(C-A)}, Y = (HX^2/D^2)$$

Donde, D es la longitud total del drenaje principal, H es la diferencia de elevación entre el punto más alto y más bajo de la cuenca, C es la cota correspondiente a la curva de nivel y A es la cota del punto más bajo.

Mediante el análisis de los perfiles de las corrientes es posible inferir el movimiento relativo de los bloques de una falla, sin embargo, es de anotar que su carácter es esencialmente confirmativo puesto que resultados positivos permiten inferir movimientos de la corteza, mientras que resultados negativos no indican necesariamente lo contrario, ya que la erosión puede destruir o borrar las anomalías del relieve (Duran, 1964).

RESULTADOS

Fallas y estilos estructurales

Para esta región se evidencian tres eventos o fases de deformación asociados a sistemas de fallas mayores como son el Sistema de Fallas Otú – Pericos (SFOP), sistemas imbricados de cabalgamiento (SIC) y, la Falla de Ibagué (FI) y sus estructuras sintéticas. La primera fase deformativa se relaciona al SFOP, con un carácter cinemático dextral y presencia de tectonitas tales como milonitas y cataclasitas. La segunda fase deformativa corresponde a sistemas imbricados de cabalgamiento con levantamiento dirigido SEE sobre NWW. La

tercera fase deformativa corresponde a un proceso penetrativo de bloques en dirección NEE, sobrepuesto estructuralmente a SFOP y SIC, el cual está relacionado

principalmente a la FI y a sus sistemas sintéticos, tales como las fallas Llanitos, La Honda, El Silencio y El Filtro (FIGURA 5).

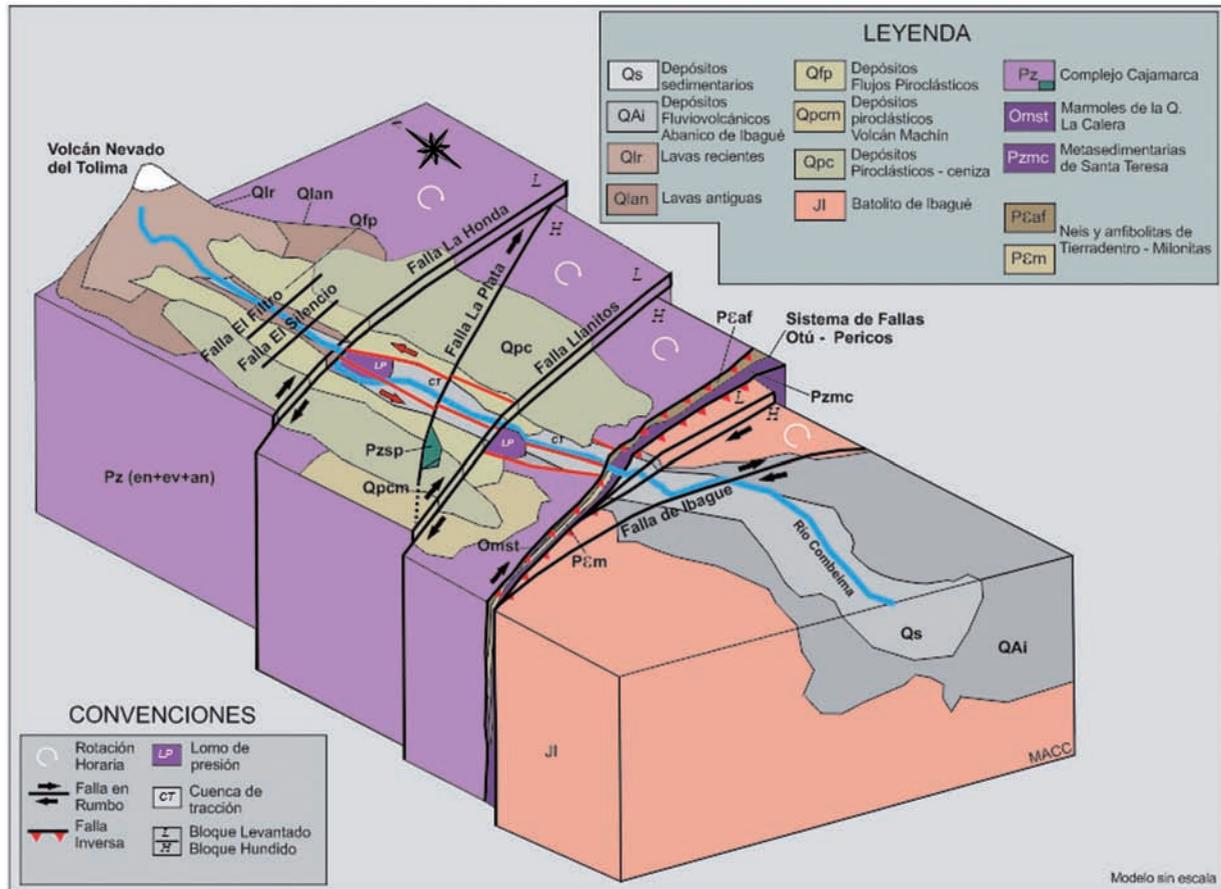


FIGURA 5. Estilo estructural sugerido para la cuenca del río Combeima, donde se aprecian fallas rumbo deslizantes dextrales, con una tendencia N60-70E, que limitan bloques con una rotación de carácter horario.

Sistema de Fallas Otú – Pericos (SFOP). El SFOP presenta dos límites frágiles para su zona de daño, los cuales son de norte a sur, las fallas La Plata y Otú – Pericos. Ambas fallas delimitan las fases deformativas relacionadas a la actividad tectónica del sistema. La característica principal de este sistema es que distribuye sus fases deformativas de forma esencialmente dextral, desde rocas de alto grado de deformación (milonitas) en el núcleo del sistema hasta las series cataclásticas cerca al trazo de las fallas, con desarrollo de estructuras tipo *pop up* (FIGURA 6) y de una foliación tectónica con una orientación en azimuth del rumbo N55°E-80°SE.

Sistema imbricado de cabalgamiento (SIC). Este tipo de sistema presenta el desarrollo de pliegues por propagación de falla (FIGURA 7), que permiten inferir un levantamiento dirigido SEE sobre NWW y una posible correspondencia en profundidad de estructuras tipo abanico imbricado (FIGURA 8).

Una evidencia del transporte tectónico con levantamiento SSE sobre NNW relacionado a los SIC en el sector de la subcuenca de la quebrada Cay, tributario del río Combeima, es el plegamiento de la estratificación (S_0) de las rocas sedimentarias asociadas a la Formación Metasedimentaria de Santa Teresa con una tendencia predominante NNE (FIGURA 9).

Falla de Ibagué (FI) y sistemas sintéticos. Estas estructuras corresponden a un proceso penetrativo de bloques en dirección NEE sobrepuesto estructuralmente al sistema deformativo del SFOP, el cual está relacionado a la FI y a sistemas sintéticos a su traza principal, tales como, las fallas Llanitos, La Honda, El Silencio y El Filtro, con orientaciones promedio N60-70E. La característica principal de estas fallas es que transportan y rotan horariamente bloques tectónicos de forma esencialmente dextral, a manera de rampas, con levantamiento por arrastre de la parte frontal y

desplazamiento de las fases deformativas predecesoras, y en las zonas cercanas a las fallas principales generan deformación cataclástica orientada en la dirección de su propagación. Debido a este fenómeno es posible

encontrar en la cuenca foliaciones rotadas de las rocas asociadas con el Complejo Cajamarca, orientadas en dirección NNE y opuestas a la tendencia NNW (FIGURA 10).

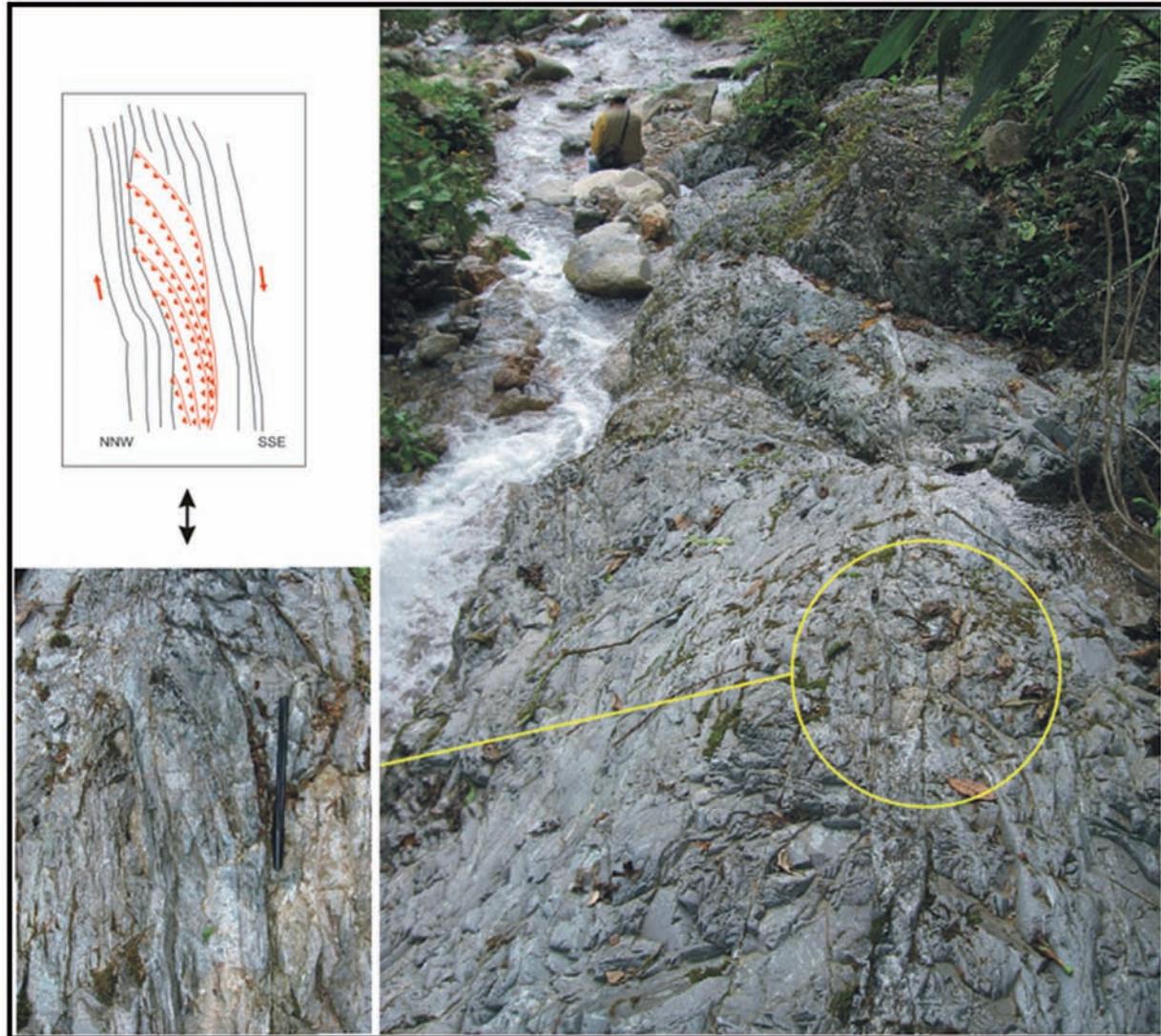


FIGURA 6. Estructuras tipo *Pop Up*, rasgo relacionado con la actividad tectónica del Sistema de Fallas Otú – Pericos, estructura ubicada en el cauce de la quebrada Cay. En el círculo amarillo terminación en cola de caballo inversa con cinemática dextral.

Falla La Honda. Esta estructura se localiza a la altura de la margen derecha de la quebrada La Honda, presenta expresión neotectónica asociada a bermas o “*bench*”, facetas triangulares, silletas y hombreras de falla (FIGURA 11), con un carácter rumbo deslizante dextral y una zona de deformación estrecha con un ancho aproximado de 20 a 30 m, en donde aflora a modo de estructura en flor positiva, presentando manifestaciones

hidrotermales (azufre) a través de sus trazos y dando origen a una serie de tectonitas, cuyos protolitos son relacionados a esquistos negros y verdes del Complejo Cajamarca. La falla presenta asociada estrías de tipo dextral con tendencias E y NE ($90^\circ - 75^\circ - 5^\circ$) y algunos pliegues isoclinales apretados involucrados en la foliación que revelan el transporte tectónico de la unidad (FIGURA 12).

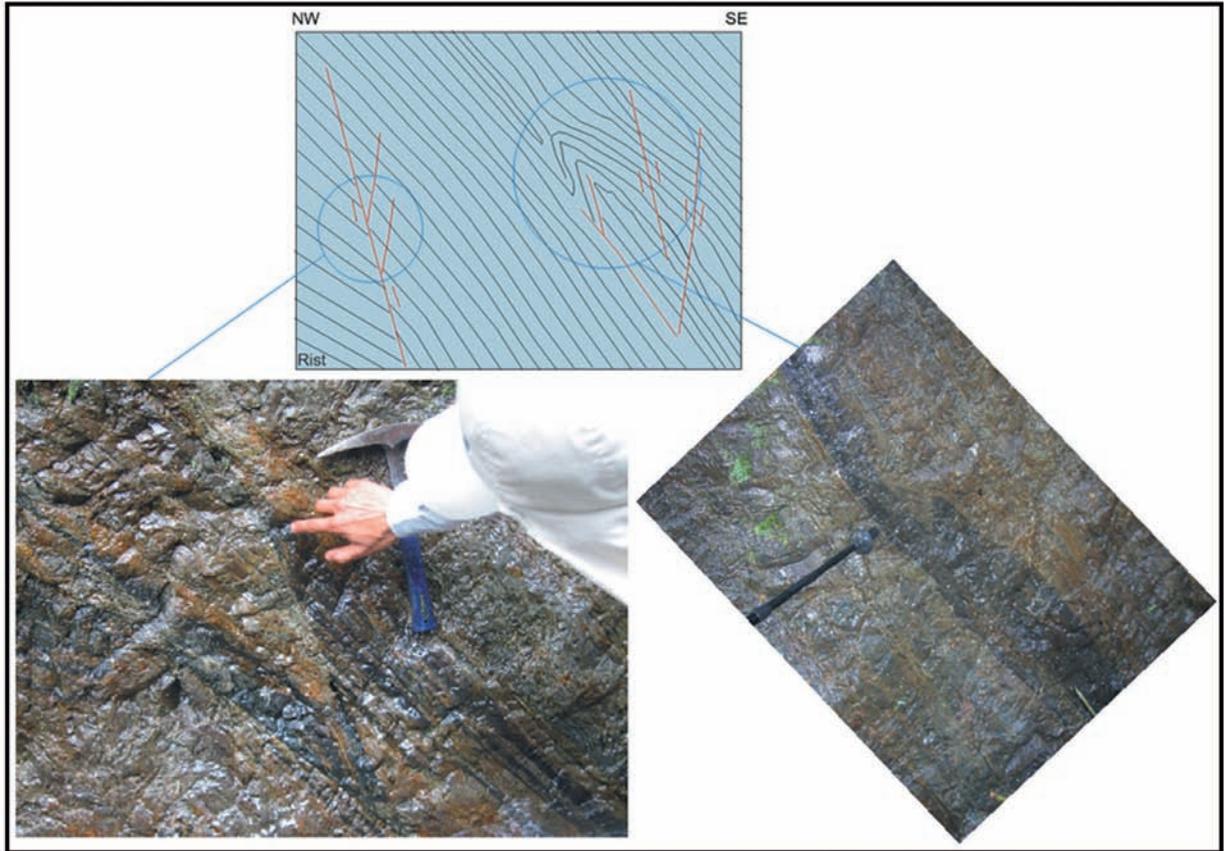


FIGURA 7. Fallas de tipo inverso con levantamiento SSE sobre NNW y pliegues por propagación de falla asociados a sistemas de abanicos imbricados. Sector La Cascada, quebrada afluente a la quebrada Cay.



FIGURA 8. Sistemas de abanicos imbricados con transporte tectónico y levantamiento del SSE sobre NNW. Sector Buenos Aires.

La inversión de los datos de estrías realizada con el software TectonicsFP (Reiter and Acs, 2000) en la estación del sector de la Virgen, aledaño al Corregimiento de Juntas, arrojó un tensor de esfuerzos local para la Falla La Honda con esfuerzos máximo horizontal (σ_1) de dirección $319^\circ/20^\circ$, intermedio (σ_2) $218^\circ/29^\circ$ y mínimo horizontal (σ_3) $79^\circ/54^\circ$, con una relación de esfuerzos de

0,39 (FIGURAS 13 A y B) y un factor de forma $R=0,57$ (falla en rumbo según Philip, 1987), que indicaría un régimen de esfuerzo de tipo transcurrente; resultado que es comparable con la dirección del esfuerzo máximo regional ($\sigma_1=290^\circ$) definido previamente para la zona adyacente perteneciente a la Falla de Ibagué (Toro y Osorio, 2005). De igual manera, se calculó el diagrama

de diedros rectos, basados en el desarrollo de Angelier et Mechler (1977) que muestran un diedro recto de tipo transcurrente donde el valor propio para el (σ_1) es $315^\circ/6^\circ$, para (σ_2) $203^\circ/75^\circ$ y para (σ_3) $47^\circ/14^\circ$ (FIGURAS 13 C y D). Para los datos de las estrías medidas, se calculó la solución de dispersión de los ejes P y T usando el diagrama de estabilidad de la solución definido por los ángulos máximos de desviación ideal al igual que para

la particular de cada estría (FIGURA 13 E), definiendo el ángulo de correlación crítica theta en 84° ; así se obtuvieron los ejes P en dirección $354^\circ/14^\circ$ con un factor de correlación $R=100\%$, B de $199^\circ/74^\circ$ $R=100\%$ y T de $86^\circ/6^\circ$ $R=100\%$, que muestran una excelente correlación de todas las estrías para la solución general, que a su vez es muy cercana a las soluciones encontradas por los métodos anteriores.

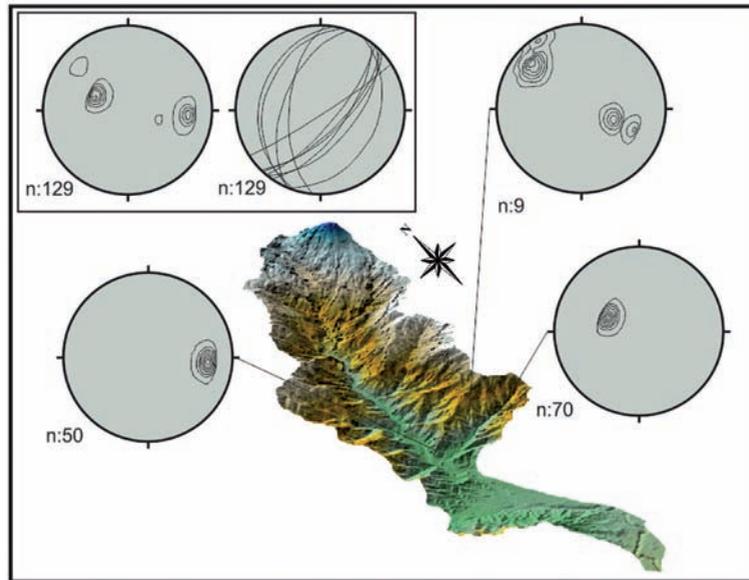


FIGURA 9. Estereogramas de densidad de contornos para la estratificación (S_0) de las rocas sedimentarias asociadas a la Formación Metasedimentaria de Santa Teresa, donde se aprecian la tendencia predominante con dirección NNE y el plegamiento de estos planos. Proyección equiareal hemisferio inferior.

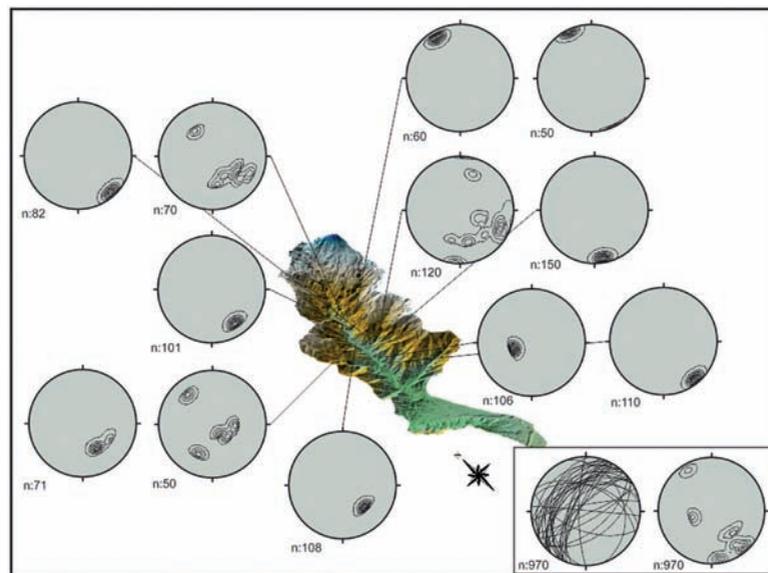


FIGURA 10. Estereogramas de densidad de contornos para la foliación de esquistosidad (S_1) de las rocas metamórficas asociadas al Complejo Cajamarca donde se aprecian la tendencia predominante con dirección NNE opuesta a la orientación NNW subordinada en el área y el plegamiento de las foliaciones con tendencia NNE con un cabeceo de su aje axial hacia el SSW, el cual es consistente con los datos de estructuras de plegamientos menores tipo “S” y “Z” levantados de la cuenca. Proyección equiareal hemisferio inferior.



FIGURA 11. Expresión neotectónica de la Falla La Honda, asociada a bermas o “bench”, facetas triangulares, silletas y hombreras de falla.

El levantamiento geológico estructural de la cuenca del río Combeima, basado en la interpretación de indicadores cinemáticos (FIGURA 14), permite

registrar estructuras deformativas a diversos ordenes, tales como plegamientos menores tipo “S” y “Z”, plegamientos envolventes *sheath folds* (FIGURA 15), bandas de deformación milonítica (FIGURA 16) y deformaciones frágiles sobrepuestas asociados con la actividad tectónica de este conjunto de fallas NNE en el área de estudio.

Falla El Silencio. Esta estructura se localiza a la altura de la margen izquierda del río Combeima, en el sector aguas arriba de la confluencia con la quebrada El Billar; presenta expresión neotectónica asociada a bermas o “bench”, silletas, hombreras y trincheras de falla (FIGURA 17), con un carácter rumbo deslizante dextral y una zona de deformación estrecha con un ancho aproximado de 25 a 30 m, en donde aflora a modo de estructura en flor positiva, dando origen a una serie de tectonitas cuyos protolitos son relacionados a cuerpos de lavas. La falla presenta asociada estrías de tipo dextral con tendencias NE ($80^\circ - 74^\circ - 10^\circ$) (FIGURA 18).



FIGURA 12. Trazo frágil de la Falla La Honda en el sector de La Virgen, aledaño al Corregimiento de Juntas. (a) Manifestaciones hidrotermales (s: azufre), (b) Estrías de falla dextrales, (c) Plegues isoclinales apretados involucrados en la foliación.

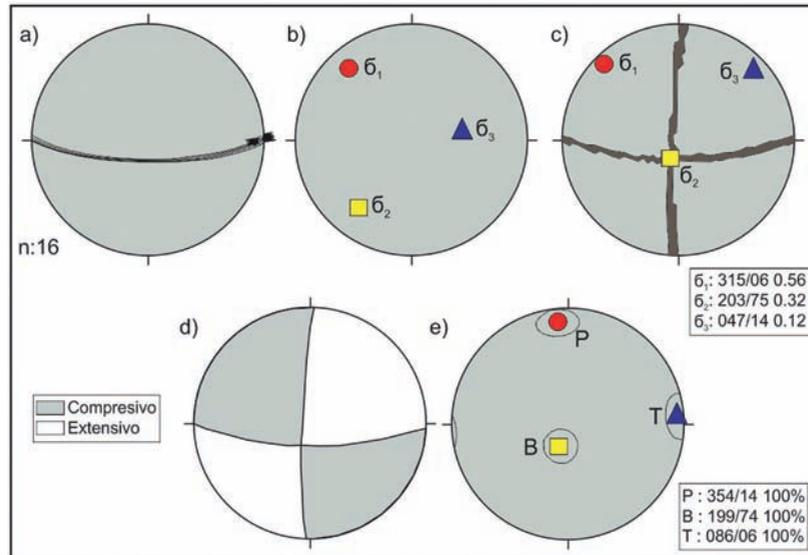


FIGURA 13. (a) y (b) Diagramas de esfuerzos resultante de la inversión de estrías medidas en la Falla La Honda (sector de la Virgen, aledaño al Corregimiento de Juntas). (c) Diagrama de diedros rectos calculado con base al desarrollo de Angelier et Mechler (1977). (d) Representación con sombras del diedro recto. (e) Diagrama de dispersión de ejes P y T.

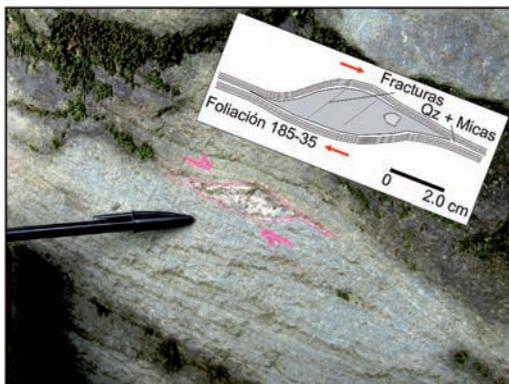


FIGURA 14. Indicador cinemático en forma de “pez”, con desarrollo de colas (Qz + micas) a partir de un núcleo rígido de cuarzo (Qz), con cinemática de tipo dextral en rocas asociadas al Complejo Cajamarca, aflorantes en la quebrada “Gonza” (González).

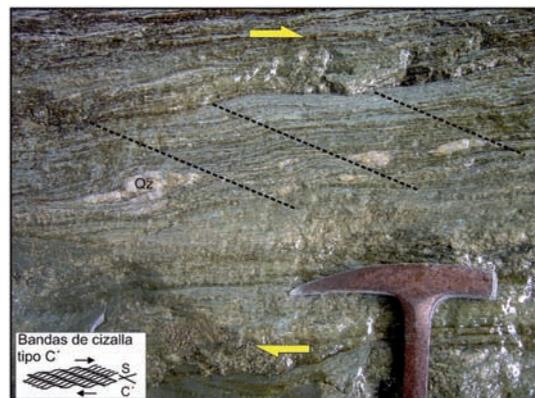


FIGURA 16. Bandas de cizalla C' dextrales, en rocas de la serie milonita asociadas al Complejo Cajamarca, aflorantes en el cauce de la quebrada El Guamal.



FIGURA 15. Pliegues envolventes (Sheath Folds) de la foliación de rocas del complejo Cajamarca, aflorantes en el cauce de la quebrada La Honda (parte alta), con una cinemática dextral.



FIGURA 17. Trinchera de la Falla El Silencio.



FIGURA 18. Estructura en flor positiva de la Falla El Silencio que limita una zona de deformación con un ancho aproximado de 25 a 30 m.

La inversión de los datos de estrías realizada con el software TectonicsFP (Reiter and Acs, 2000) para la Falla El Silencio, en la estación sobre el talud de la vía que conduce al caserío del mismo nombre, arrojó un tensor de esfuerzos local con esfuerzos máximo horizontal (σ_1) de dirección $349^\circ/17^\circ$, intermedio (σ_2) $203^\circ/70^\circ$ y

mínimo horizontal (σ_3) $82^\circ/10^\circ$, con una relación de esfuerzos de 0,98 (FIGURAS 19 A y B) y un factor de forma $R=0.45$ (falla en rumbo según Philip, 1987), que indicaría un régimen de esfuerzo de tipo transcurrente, resultado que es comparable con la dirección del esfuerzo máximo regional ($\sigma_1=290^\circ$) definido previamente para la zona adyacente perteneciente a la Falla de Ibagué (Toro y Osorio, 2005). También se calculó el diagrama de diedros rectos (Angelier et Mechler, 1977) que muestra transcurrencia con valores propios para σ_1 de $306^\circ/4^\circ$, σ_2 de $205^\circ/72^\circ$ y σ_3 de $37^\circ/18^\circ$ (FIGURAS 19 C y D). Se calculó la solución de dispersión de los ejes P y T para los datos de las estrías medidos, usando el diagrama de estabilidad de la solución definido por los ángulos máximos de desviación ideal, al igual que para la particular de cada estría (FIGURA 19 E), definiendo el ángulo de correlación crítico theta en 84° . Se obtuvieron los ejes P en dirección $344^\circ/15^\circ$ con un factor de correlación $R=100\%$, B de $202^\circ/72^\circ$ $R=100\%$ y T de $77^\circ/11^\circ$ $R=100\%$, que muestran una excelente correlación de todas las estrías para la solución general, muy cercana a las soluciones encontradas por los métodos anteriores.

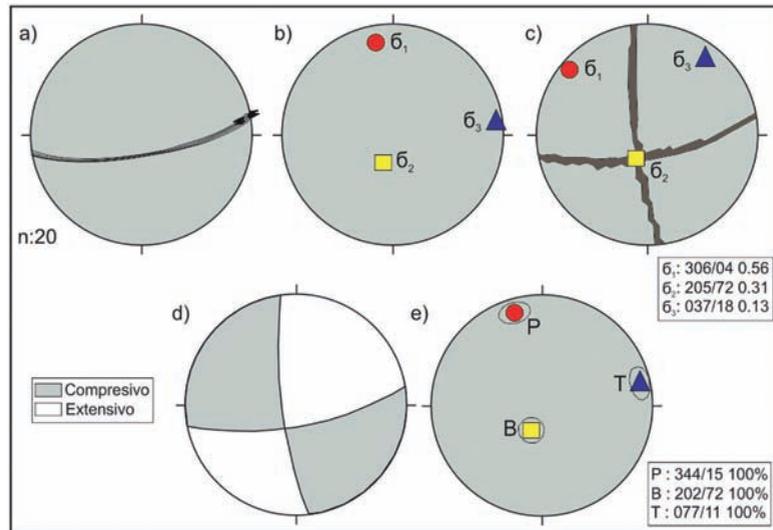


FIGURA 19. (a) y (b) Diagramas de esfuerzos resultante de la inversión de estrías medidas en la Falla El Silencio (estación sobre talud de la vía que conduce al caserío del mismo nombre). (c) Diagrama de diedros rectos calculado con base al desarrollo de Angelier et Mechler (1977). (d) Representación con sombras del diedro recto. (e) Diagrama de dispersión de ejes P y T.

Sistemas extensionales. Sistemas extensionales cartografiados con una orientación promedio NNW, presentes a través de la cuenca del Río Combeima, se relacionan con fallas de tipo normal (FIGURA 20). Estas estructuras se originan en los macizos rocosos como respuesta a los fenómenos de compensación y al levantamiento de la parte frontal de los bloques, asociado al transporte tectónico con dirección NNE. Rasgos morfológicos en la cuenca del río Combeima,

tales como estructuras tipo flor negativa, relieves desplazados, deslizamientos de bloques y rotación de los mismos, están asociados a fenómenos de inestabilidad en relación a los sistemas tipo extensionales propuestos (FIGURA 21).

Sistemas de fallas antitéticas al esfuerzo principal, presentan una orientación NNW, con una cinemática normal sinistral. Estas estructuras facilitan la generación

de espacios abiertos a modo de *pull apart*, evidenciados en la cuenca del río Combeima que permiten la acumulación de espesores anómalos, materiales esencialmente asociados con depósitos torrenciales, coluviales, flujos de escombros y detritos, generados por

la denudación de las márgenes adyacentes (FIGURA 22). Dichos materiales por acción del conjunto de fallas NNE, presenta abombamientos o *doming* y/o plegamientos, que pueden ser empleados como indicadores cinemáticos de su actividad (FIGURA 23).

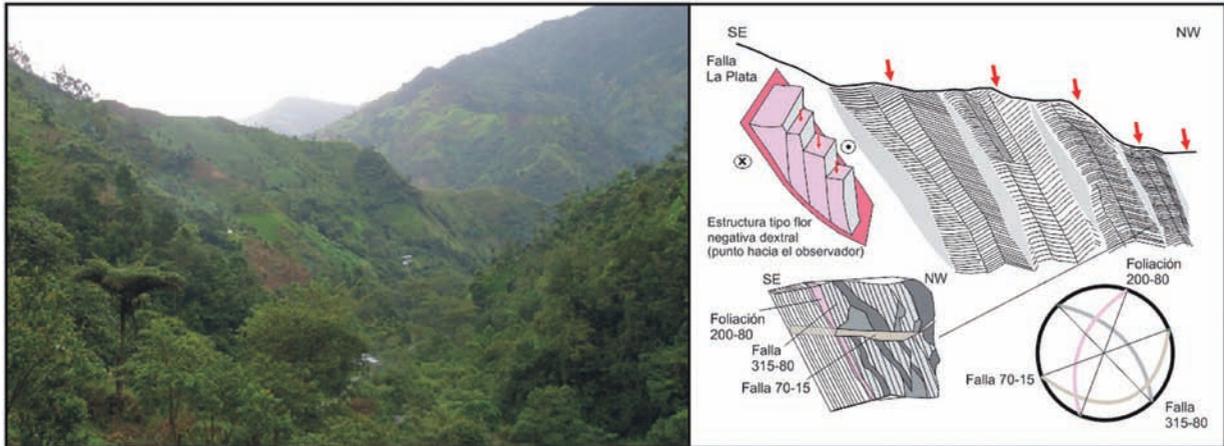


FIGURA 20. Sistemas extensionales asociados a fallas de tipo normal, que involucran bloques de gran dimensión en respuesta a los fenómenos de compensación del transporte tectónico. Margen derecha quebrada La Plata, vereda Pico de Oro.



FIGURA 21. Rasgos morfológicos asociados a sistemas extensionales en la parte media de la cuenca del río Combeima.



FIGURA 22. Depresión alargada originada por actividad de tipo tectónico a modo de cuenca de tracción. Sector Pástaes.



FIGURA 23. Abombamiento o “*doming*” y/o plegamiento de una cuenca de tracción a través del cauce del río Combeima. Sector Hotel Iguaimé. La línea amarilla y las flechas opuestas amarillas y rojas indican el eje de la estructura.

Hipsometría de la cuenca de drenaje

La cuenca del río Combeima presenta un lóbulo principal alargado en el que se identifican como mínimo cinco etapas de erosión remontante hasta su conformación actual. Estas fases desarrolladas en un

marco estructural activo, presentan correspondencia con el estilo estructural sugerido que unida a análisis de índices geomorfológicos, proporcionan información relevante acerca de la actividad de las estructuras tectónicas relacionadas (FIGURA 24).

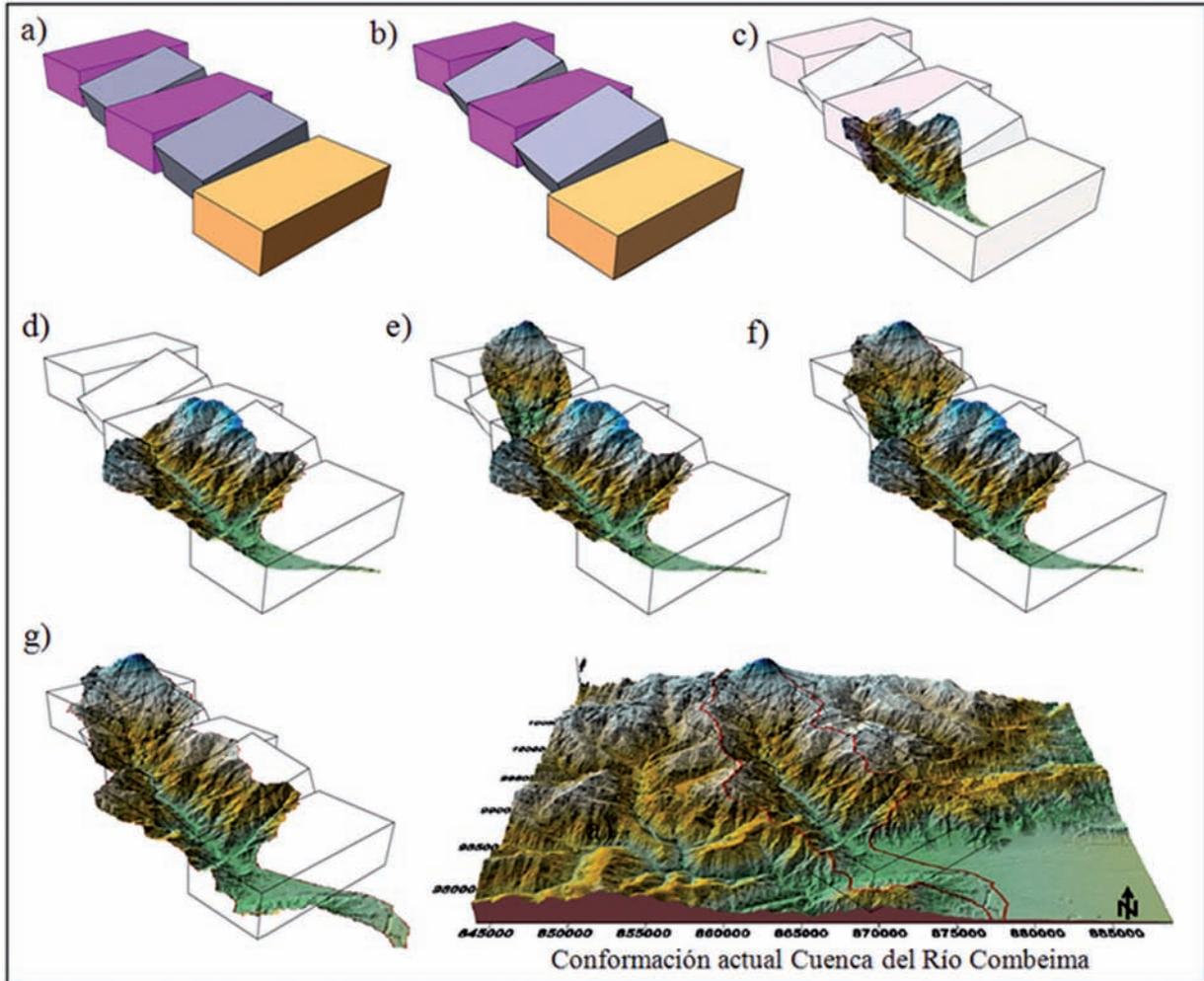


FIGURA 24. Proceso de erosión remontante o regresiva, donde se identifican como mínimo cinco etapas de desarrollo hasta la conformación actual la cuenca del río Combeima y su íntima relación con el estilo estructural propuesto. (a) y (b) Fases tectónicas, (c) Primera etapa evolutiva, (d) Segunda etapa evolutiva, (e) Tercera etapa evolutiva, (f) Cuarta etapa evolutiva, (g) Quinta etapa evolutiva y conformación actual de la cuenca.

El proceso de erosión remontante, el cual ocasiona la expansión de la cuenca hidrográfica, está relacionado con un progreso gradual hacia su cabecera, que genera la incisión fluvial de la parte alta del río como una consecuencia directa de la caída del nivel base. Dicho proceso está directamente relacionado con los procesos tectónicos de la zona, que unidos al alto grado de meteorización de las unidades, facilitan la degradación de los cuerpos rocosos y de los suelos, dando lugar al transporte y depósitos de considerables volúmenes de material.

Las curvas hipsométricas obtenidas para estas etapas evolutivas presentan una forma general de “S”. En las fases 1, 2, 3 y 5 inicia con una superficie cóncava en la parte superior que pasa a un segmento plano y termina en una forma convexa en su sección inferior (FIGURA 25). A diferencia de las anteriores, la fase número 4 inicia con un tramo convexo en la parte superior que pasa a una parte plana y finaliza con una forma cóncava en su parte inferior. Los puntos de inflexión de las fases intermedias (1 a 3) son muy similares y estos son cercanos al 20% de la relación (a/A) y al 60% de (h/H) . La inflexión de

la fase 4, se registra al 33% (a/A) y al 60% (h/H) que es equivalente a una altura aproximada de 3.790 m.s.n.m. La fase 5, presenta su punto de inflexión al 10% (a/A) y al 60% (h/H) que es una altura equivalente aproximada de 3.630 m.s.n.m.

Las curvas hipsométricas de las fases 1, 2, 3 y 5; se presentan localizadas por debajo de la curva teórica y solo la fase 4 presenta un segmento por encima de esta.

Las Integrales Hipsométricas (IH) y volúmenes desplazados por los procesos erosivos se presentan en la TABLA 1. Los resultados obtenidos de la IH para las fases previas, son en promedio 0,37 y concuerdan muy bien con el resultado calculado para la fase 5. Es de destacar que la fase 2 registra un valor de IH

de 0,43 que difiere del promedio calculado para la cuenca.

Dada la distribución de la curva hipsométrica para la fase 4 y que los resultados obtenidos para su IH no muestran un comportamiento diferente a lo obtenido en las anteriores etapas, se procedió a efectuar un análisis detallado de esta zona. En los mapas topográficos y en el MDT del área de estudio se identifican importantes cambios morfométricos y en el patrón de drenaje, así como un mayor grado de la pendiente a la altura de 4.200 m.s.n.m., que permiten sugerir el cierre de una microcuenca en el sector nor-noroccidental de la cuenca del río Combeima. Para esta estructura, que se desarrolla principalmente en productos volcánicos (lavas y flujos piroclásticos), se obtuvieron resultados de IH cercanos a 0,55.

TABLA 1. Resultados de la Integral Hipsométrica y el volumen desplazado para las fases evolutivas sugeridas en este trabajo. Alturas definidas con levantamiento topográfico.

Fase	Elevación mínima (m)	Elevación máxima (m)	Elevación media (m)	Integral Hipsométrica	Volumen desplazado (km ³)	Factor de Asimetría
1	1.198,893	3.261,960	1.969,507	0,37	20,4	
2	1.044,823	3.650,000	2.176,389	0,43	62,2	
3	1.847,846	5.200,000	3.107,603	0,37	12,8	60,09
4	1.847,846	5.200,000	3.148,558	0,38	28,9	
5	716,680	5.200,000	2.402,911	0,37	124	52,38
6	1.847,846	4.200,000	3.148,558	0,55	9,7	

Factor de Asimetría (FA)

Se calcularon los FA para el área total y para las zonas media a superior de la cuenca del río Combeima (bloques 2 y 4) (TABLA 1). Los resultados obtenidos para el área total, indican un FA del 52,38 y para las zonas media y superior del 60,09.

Perfil longitudinal fluvial de la cuenca del río Combeima.

Para la cuenca del río Combeima se elaboró el perfil longitudinal fluvial calculándose la parábola teórica del mismo (FIGURA 26). El perfil real inicia con una parte menor convexa que se intercepta con la parábola calculada, seguido por un amplio segmento cóncavo que continúa a una zona plana y finaliza con una forma convexa. Estos resultados indican dos importantes puntos de inflexión, el primero localizado a la altura del Sistema de Fallas Otú-Pericos, cerca al

ápice del Abanico de Ibagué y el segundo a una altura aproximada de 3.650 m.s.n.m. Para este perfil de igual manera, se aprecian variaciones o saltos topográficos, los cuales se relacionan con la actividad geológica de las estructuras penetrativas con rumbo NE, que destacan la importancia de la interacción entre la tectónica y los procesos de erosión remontante.

Con base en los datos obtenidos durante el trabajo de campo, se procedió al análisis del perfil longitudinal fluvial en un segmento relacionado a la Falla El Silencio (FIGURA 27). Producto de su actividad neotectónica, la estructura presenta una cinemática dextral inversa, con el bloque NW levantado respecto al SE. Los perfiles reales de los segmentos de la cuenca, calculados para este punto, denominado escalón BB' en este trabajo, se presentan en color naranja (perfil real B1) y azul oscuro (perfil real B2). De estos se puede deducir un mayor grado de incisión del bloque SE, cambios en la

resistencia de las unidades geológicas en este límite o el levantamiento tectónico del bloque NW.

Para los bloques SW (AB) y NW (B'C), se procedió a efectuar el cálculo de su parábola. La parábola calculada B1, se presenta en color verde claro y se relaciona con el segmento B'C o bloque levantado. La parábola calculada B2, se presenta en color verde oscuro y se relaciona con

el segmento AB o bloque yacente. La parábola calculada B1 (verde claro) del bloque NW, se presenta paralela o en algunos segmentos es más baja que el perfil real B1 (naranja), sugiriendo el levantamiento del mismo. La parábola calculada B2 (verde oscuro) del bloque SW, se presenta por encima del perfil real B2 (azul oscuro). Estos resultados concuerdan con los análisis estructurales efectuados en esta estructura.

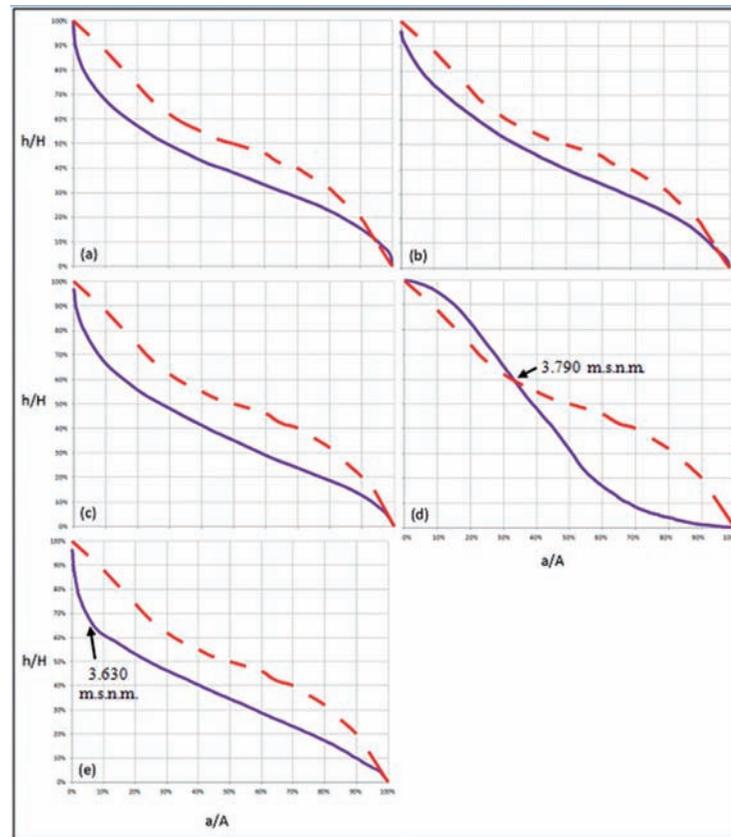


FIGURA 25. (a) Curva hipsométrica para la primera etapa evolutiva. (b) Curva hipsométrica para la segunda etapa evolutiva. (c) Curva hipsométrica para la tercera etapa evolutiva. (d) Curva hipsométrica para la cuarta etapa evolutiva. (e) Curva hipsométrica para la quinta etapa evolutiva. Curva teórica: línea roja discontinua. Curva calculada: línea morada continua.

DISCUSIÓN

El paisaje fisiográfico de la cuenca del río Combeima en la Cordillera Central de Los Andes colombianos, se caracteriza por presentar profundos valles de laderas de montaña en forma de “V”. La cuenca exhibe un estilo estructural que evidencia varios eventos de deformación asociados al Sistema de Fallas Otú – Pericos (SFOP) y la Falla de Ibagué (FI), que a su vez controlan las fases deformativas observadas en campo. Relacionados a la FI y a sus sistemas sintéticos, se registran estructuras con cinemáticas dextrales a manera de rampas de dirección NNE, que transportan y rotan horariamente bloques tectónicos y facilitan el arrastre de la parte frontal, con

desplazamiento de las fases deformativas predecesoras. En respuesta a estos procesos se presentan levantamientos y hundimientos de bloques, al igual que fenómenos de compensación que originan en los macizos rocosos sistemas extensionales asociados a fallas de tipo normal con una orientación promedio NNW.

La delimitación de bloques por trazos de falla de sistemas regionales y su posterior análisis estructural y geomorfológico, permite destacar diferentes fases evolutivas del paisaje. Dichas fases, si se evalúan como única etapa o fase actual, no permiten identificar en su totalidad, importantes aspectos secuenciales del grado de deformación del relieve en zonas tectónicamente activas.

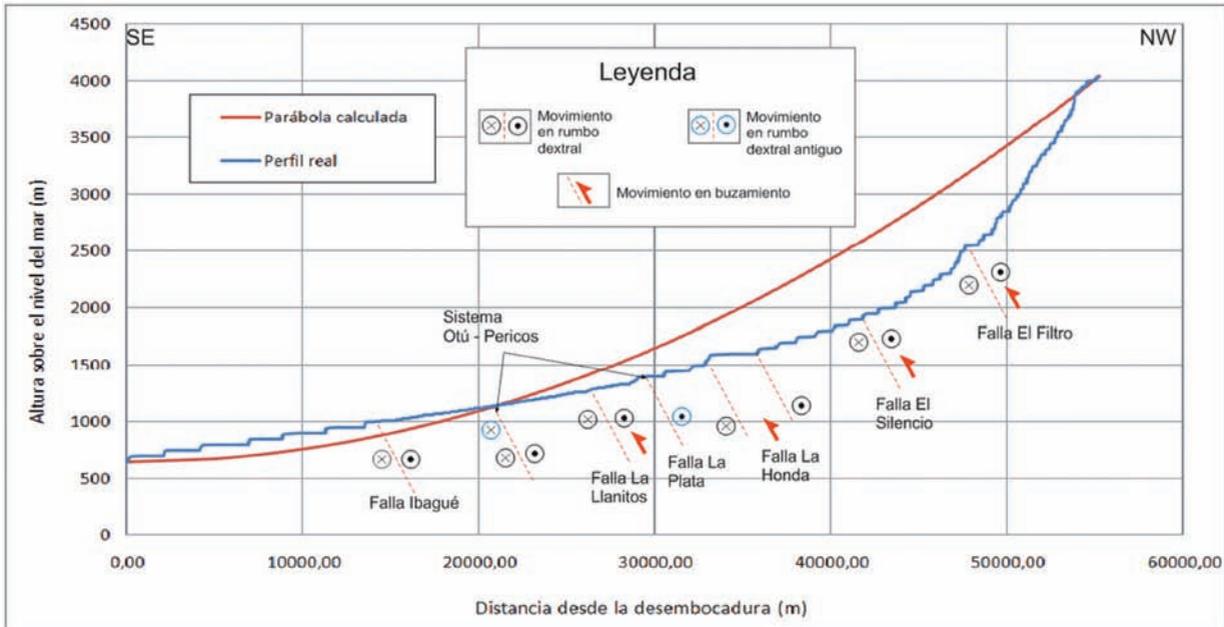


FIGURA 26. Perfil longitudinal fluvial y parábola teórica obtenida para la cuenca del río Combeima. Se observa a la altura del Sistema de Fallas Otú-Pericos un punto de inflexión de la cuenca, el cual puede ser relacionado con la depositación del Abanico de Ibagué y la actividad tectónica de las fallas en este tramo de la cuenca.

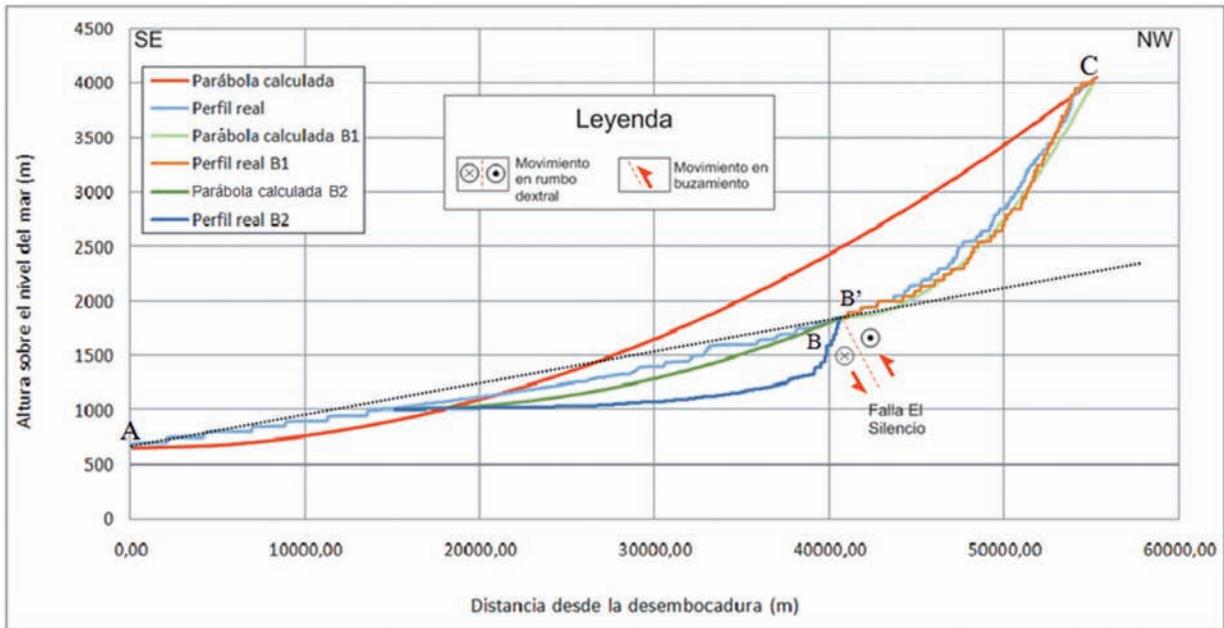


FIGURA 27. Perfil longitudinal fluvial y parábola teórica obtenida para la cuenca del río Combeima. Se presentan las relaciones obtenidas entre las parábolas calculadas B1 (bloque NW) y B2 (bloque SW) y sus perfiles reales, que reafirman la cinemática inversa de la Falla El Silencio.

Las curvas hipsométricas obtenidas en este estudio, presentan relaciones asimétricas en relación a la curva teórica en las fases 1, 2, 3 y 5. Su localización por debajo de ésta, sugiere un alto grado de incisión de la red de drenaje en comparación a su distribución lateral, reafirmada por la relación altura versus área calculada.

La fase 4 presenta un tramo por encima de la curva teórica, que se interpreta como el único segmento analizado de la cuenca con neoformación del paisaje.

La comparación de los puntos de inflexión de las fases 4 y 5, permite destacar una mayor relación (a/A)

para la fase de neoformación respecto a la etapa de conformación actual de la cuenca. Las alturas obtenidas para estos puntos (3.790 m.s.n.m. y 3.630 m.s.n.m., respectivamente), unidas a la altura de 3.650 m.s.n.m. obtenida del perfil longitudinal fluvial, destaca el intervalo de altura en el cual los procesos de erosión remontante operan en la actualidad.

Las *IH* obtenidas para cada fase evolutiva, registran valores promedio 0,37 y concuerdan muy bien con el resultado calculado para la fase 5. Este valor ubica la etapa actual de evolución en los rangos bajo (0,35) a intermedio (0,60) propuestos por Strahler (1952), lo que sugiere un relieve maduro, donde existe un equilibrio entre el levantamiento tectónico y el grado de incisión de los drenajes, y que según Keller and Pinter (1996), permite relacionar esta cuenca a un estado de clasificación de “moderna”.

Según Strahler (1952), la evolución teórica de un paisaje sigue las siguientes fases: (1) una etapa juvenil, que se caracteriza por una profunda incisión y relieve accidentado, (2) una etapa madura, donde diversos procesos geomórficos operan cerca del equilibrio, y (3) una etapa de vejez, que se distingue por un paisaje cerca de su nivel base con relieve muy tenue. Este mismo autor sugiere la existencia de etapas transitorias, con curvas muy similares a la de vejez, pero que incluyen prominencias topográficas que al ser erosionadas permiten caracterizar dichas zonas como áreas de relieve maduro. Es importante tener en cuenta que la cuenca del río Combeima puede en general estar experimentando una fase de transición, dado que en algunas etapas evaluadas, p.e. las fases 4 (neoformación) y 2, se obtuvieron valores *IH* cercanos a 0,55 y de 0,43, respectivamente; sumado a las evidencias de basculamiento al occidente de la cuenca (FA de 52,38 y 60,09), lo que permite plantear dos escenarios evolutivos para la cuenca: en el primero, se presentaría la captura de una cuenca vecina de manera lateral y en el segundo, la captura de la cuenca inmediatamente opuesta con el traspaso de la divisoria de aguas.

CONCLUSIÓN

Asociado con el estilo estructural de la cuenca del río Combeima se diferencian cinco etapas de desarrollo y evolución hasta su conformación actual, las cuales se relacionan con un proceso de erosión de tipo remontante o regresiva. La importancia del proceso de erosión remontante, asociado con la actividad tectónica, es confirmada por los resultados obtenidos

del análisis de los índices morfométricos para cada una de las etapas evolutivas. La cuenca del río Combeima es catalogada como una típica cuenca remontante donde la curva hipsométrica calculada está por debajo de la curva teórica, proceso que permite establecer que para esta cuenca hidrográfica aún se hace necesario compensar área para el cambio de altura que presenta en este momento y así nivelar el tope erosivo actual. La cuenca presenta rejuvenecimiento en su parte NNW y basculamiento general al occidente (FA de 52,38 y 60,09). Los procesos de erosión remontante que operan en la actualidad se presentan en el intervalo entre los 3.630 m.s.n.m. y 3.790 m.s.n.m. La etapa actual de evolución, presenta valores de *IH* de 0,37, lo que sugiere un relieve maduro que permite relacionar esta cuenca a un estado de clasificación de “moderna”. El volumen total desplazado, durante las etapas evolutivas corresponde a 124.9 km³ (TABLA 1) y está relacionado esencialmente con la actividad tectónica y el proceso de erosión remontante evaluado en el área.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo manifiestan sus más sinceros agradecimientos al Servicio Geológico Colombiano (proyecto AME 09-41 “Evaluación y Zonificación de Amenazas por Movimientos en Masa”), por el apoyo económico y logístico del mismo. En especial a la Doctora Marta Lucia Calvache, a las ingenieras Gloria Ruiz y Yolanda Calderón, así como al Ingeniero Carlos Alvarado Flores, por la confianza depositada para la elaboración de este proyecto. De igual manera, expresamos nuestro agradecimiento a la Doctora Natalia Hoyos Botero y a un evaluador anónimo por los comentarios realizados, que permitieron el fortalecimiento de las ideas planteadas en esta investigación.

REFERENCIAS

- Angelier, J., et Mechler, P. 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des diédres droits. Bulletin de la Societe Geologique de France. VII (19): 1309-1318.
- Barrero, D., y Vesga, C. 1976. Mapa geológico del Cuadrángulo K-9 Armero y parte del J-9 La Dorada. Escala 1: 100.000. INGEOMINAS.
- Bishop, P. 2007. Long-term landscape evolution: linking tectonics and surface processes. Earth Surface Processes and Landforms, 32: 329–365.

- Brookfield, M.E. 1998. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India – Asia collision: rivers draining southwards. *Geomorphology*, 22: 285–312.
- Bull, W.B. 2007. *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology*. Wiley-Blackwell. Oxford, 328p.
- Burbank, D.W., and Anderson, R.A. 2001. *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science. Malden, MA, 274p.
- Chen, L.K., and Chen, S.C. 2006. Retrogressive erosion and longitudinal profile evolution in noncohesive material. *International Journal of Sediment Research*, 21 (2): 113-122.
- Chen, Y.C., Sung, Q., and Cheng, K.Y. 2003. Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis. *Geomorphology*, 56: 109-137.
- Duran, L.G. 1964. Geomorfología analítica de los perfiles fluviales longitudinales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, XII (46): 219-229.
- Hatcher, R.D. 1995. *Structural Geology: Principles, Concepts and Problems* 2nd Ed. Prentice-Hall. New Jersey, 525p.
- INGEOMINAS. 1997. *Atlas Geológico Digital de Colombia*. Versión 1.0. Memoria Explicativa. Bogotá.
- Keller, E.A., and Pinter, N. 1996. *Active Tectonics: Earthquakes Uplift and Landscape*. Prentice Hall. New Jersey, 338p.
- Lifton, N.A., and Chase, C.G. 1992. Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California. *Geomorphology*, 5: 77–114.
- Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M., Azor, A., Tuccimei, P., Della Seta, M., and Soligo, M. 2009. Quaternary landscape evolution and erosion rates for an intramontane Neogene basin (Guadix–Baza basin, SE Spain). *Geomorphology*, 106: 206–218.
- Pérez-Peña, J.V., Azor, A., Azañón, J.M., and Keller, E.A. 2010. Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, 119: 74-87.
- Phillip, H. 1987. Plio-Quaternary evolution of the stress field in Mediterranean zones of subduction and collision. *Annales Geophysics*, 5B (3): 301 - 320.
- Pike, R.J., and Wilson, S.E. 1971. Elevation - Relief Ratio, Hypsometric Integral and Geomorphic Area - Altitude Analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82 (4): 1079-1083.
- Reiter, F., and Acs, P. 2000. *Tectonics FP. Software for Structural Geology*. Version 2.0, PR Microsoft Windows.
- Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63: 1117–1142.
- Toro, R.A., y Osorio, J.A. 2005. Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de Los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. *Boletín de Geología*, 27 (1): 13-24.
- Vergara, H., y Moreno, M. 1992. Estudio geológico geotécnico de la cuenca del río Combeima. INGEOMINAS. Gobernación del Tolima-CRET. Ibagué. Colombia.
- Verstappen, H.T., and Van Zuidam, R.A. 1992. El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. Publicación ITC No. 10. Villanueva de Huelva. Holanda.

Trabajo recibido: julio 23 de 2013
Trabajo aceptado: febrero 02 de 2014