

Zonificación de amenazas por avenidas torrenciales a partir del análisis geomorfológico de los depósitos asociados y su datación. Caso de estudio: Cuencas de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental Colombiana, Andes del Norte.

Ana María Pérez-Hincapié ^a, Marco Fidel Gamboa-Ramírez ^a, Juan David Franco-Velásquez^a Daniel Bedoya-Giraldo^a & Oscar Geovany Bedoya-Sanmiguel ^a

^aDepartamento de Ciencias de La Tierra, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. aperez@eafit.edu.co

Abstract

Understanding of debris flows and related hazards constitutes an essential ingredient in the planning and management of mountainous territories. In this work, we analyzed geomorphological, stratigraphic and hydraulic data from five watersheds located in the central zone of the Cordillera Occidental of Colombia in the Northern Andes, by estimating the flow with a return period of 100 years, increased by 40% in order to take into account the contribution of sediment and debris in the flow. Observations from the Tapartó and Farallones rivers, and La Arboleda, La Linda and Los Monos stream allowed the characterization of debris flow deposits under conditions of high slope, heavy rainfall, and an important development of soil profile. Geomorphological and stratigraphic analyses were complemented with ¹⁰Be ages Holocene ages between 6.22 ka and 8 ka (Unpublished) and 100 ± 30 and 2790 ± 30 ¹⁴C yr BP .

Our observations support the existence of three morphodynamic stages related to debris flow dynamics: (1) “old” stage with deposits older than 2000 ¹⁴C yr BP; (2) “sub-recent” stage represented by deposits of age between 1200 and 2000 ¹⁴C yr BP; and (3) “recent” stage, with lowly incised deposits and ages that do not exceed 1200 ¹⁴C yr BP. Although basins studied have evidenced debris flow events of relatively high magnitude, our analyses suggest a decrease in magnitude during the last 1000 years.

Keywords: Debris flow; Farallones del Citará; Tapartó River.

Resumen

El estudio de la amenaza por avenidas torrenciales constituye un elemento esencial para la planificación y el ordenamiento territorial en zonas montañosas. En este trabajo, se realizó un análisis geomorfológico y estratigráfico de los depósitos asociados a este tipo de eventos, además de análisis hidrológicos e hidráulicos en cinco cuencas ubicadas en la zona central de la Cordillera Occidental de Colombia en los Andes del Norte, mediante el estimativo del caudal con período de retorno de 100 años, incrementado un 40% con el objetivo de tener en cuenta el aporte de sedimentos y escombros en el flujo. Las observaciones realizadas en los ríos Tapartó y Farallones, además de las quebradas La Arboleda, La Linda y Los Monos permitieron la caracterización de los depósitos torrenciales en cada una de las cuencas estudiadas y observar notables diferencias entre las mismas. Los datos geomorfológicos y estratigráficos fueron complementados con edades del Holoceno medio y tardío a partir del análisis por medio isótopos cosmogénicos. Las muestras obtenidas por ¹⁰Be se encuentran entre los 6.22 ka y 8 ka (Sin publicar) mientras que las edades ¹⁴C presentan temporalidades entre 100 ± 30 y 2790 ± 30 ¹⁴C BP años.

Además, se propone la existencia de tres etapas principales dentro de la dinámica torrencial de las cuencas, relacionada con estos sistemas de depósitos: (1) “depósitos antiguos” con edades ¹⁴C y ¹⁰Be superiores a los 2000 BP años, (2) “depósitos sub-recientes” con edades ¹⁴C comprendidas entre 1200 y 2000 BP años; y (3) “depósitos recientes” cuyas edades ¹⁴C no exceden los 1200 BP años. Finalmente, aunque las cuencas exhiben depósitos torrenciales asociados a eventos de magnitudes importantes, los análisis realizados sugieren una disminución de la magnitud de los mismos en los últimos 1000 años.

Palabras clave: Avenidas torrenciales; Farallones del Citará; Río Tapartó.

1 Introducción

Los eventos torrenciales constituyen una importante amenaza para las poblaciones aledañas a los cauces con este tipo de comportamiento, debido a la rapidez con la que se presenta el fenómeno y a su carácter impredecible, además del potencial de daño y el alto nivel de fragilidad que presentan los asentamientos cercanos. Sin embargo, y a pesar de la magnitud de los eventos presentados en los últimos años en Colombia (p.e. municipios de Mocoa -2017 y Salgar-2015) todavía se encuentran limitados estudios en torno a la caracterización del fenómeno y su correlación con los modelos hidráulicos convencionales.

El análisis de depósitos sedimentarios recientes (Holocenos) producidos por avenidas torrenciales, provee un marco de referencia para la estimación de magnitudes y recurrencias de estos eventos (Caballero, 2011; Kaitna & Hübl, 2012) convirtiéndose en un insumo fundamental para la generación de medidas de planificación y administración de territorios ante la amenaza actual por avenidas torrenciales en cauces con contextos similares (Caballero & Coupe, 2009).

Las avenidas torrenciales en términos generales componen fenómenos que involucran corrientes de agua, lodo, fragmentos de roca y escombros en diferentes proporciones y tamaños (Bloom, 1991), los cuáles se encausan a lo largo de las quebradas y los ríos de montaña, agrupando una gran cantidad de flujos, como flujos de lodos y/o escombros, avalanchas, lahares, flujos hiperconcentrados y superconcentrados, entre otros (Costa, 1988; Medina, 1991; Coussot & Meunier, 1996; Lavigne & Suba, 2004; Díaz-Onofre, 2008) caracterizados por su corta duración, además de sus largos periodos de recurrencia y una distribución espacial y temporal errática (Durán et al., 1985; Parra, 1998; Parra et al., 1995; Piedrahíta, 1996; Castro, 2007) Se presentan según autores como Riedl & Zachar (1984) y Vásquez (1993) en cuencas de tamaños pequeños o moderados, que pueden ser afectadas por el mismo evento de lluvia en un tiempo determinado, con áreas entre 0.3 y 150 km² (Riedl & Zachar, 1984) o para el caso del Valle de Aburrá en la Cordillera Central colombiana, con áreas de hasta 300 km² según (González & Hermelin, 2004)

Sumado a la complejidad y heterogeneidad de los eventos torrenciales, se encuentra el carácter impredecible y la velocidad con la cual se presentan, constituyendo uno de los eventos naturales con menor desarrollo de estudios en el país, a pesar de su alto potencial destructivo y del gran número de comunidades asentadas a lo largo de cauces con este

comportamiento. Hidráulicamente, los flujos torrenciales poseen un alto porcentaje de material sólido de características heterogéneas, aumentando a su vez la viscosidad y densidad del mismo, además de recorrer cauces con altos porcentajes de rugosidad y pendientes variables, constituyendo según Rendón (1997) un problema hidráulico de carácter complejo.

La vertiente oriental de los Farallones del Citará, al suroccidente del departamento de Antioquia, en el noroccidente colombiano, se caracteriza por la presencia de unidades montañosas con pendientes escarpadas, las cuáles han presentado a nivel histórico eventos torrenciales de gran magnitud, no sólo por la pérdida de vidas, sino también por los daños causados; sin embargo, numerosas poblaciones siguen asentadas en las márgenes de estos afluentes, por lo cual constituye un importante referente para el estudio y caracterización de este tipo de depósitos. Teniendo en cuenta lo anterior, en este artículo se presentan los resultados de la zonificación de amenazas por avenidas torrenciales en cinco cuencas en este sector.

1.1 Metodología

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se utilizó un enfoque geomorfológico, con énfasis en la caracterización de los depósitos torrenciales a una escala variable entre 1:2000 y 1:10.000 teniendo en cuenta la base cartográfica disponible para cada cuenca de estudio. Estas observaciones se basan en las metodologías propuestas por Parra et al. (1995) y Piedrahíta (1996), donde parámetros como las condiciones de la superficie de los depósitos, la relación estratigráfica entre los mismos y la pendiente con respecto al canal principal brindan información sobre la temporalidad relativa de los depósitos y la magnitud de los mismos. De igual manera, las observaciones sedimentológicas de los depósitos, pueden dar cuenta de los distintos eventos presentados en las cuencas, además de su magnitud, a partir de parámetros como el grado de redondez de los clastos, su imbricación, tipo de selección y estructura interna de los materiales. Finalmente, estas observaciones permitieron la identificación de una temporalidad relativa de los depósitos, clasificados en: (1) depósitos antiguos, (2) depósitos subrecientes y (3) depósitos de carácter reciente.

Adicionalmente, a partir del levantamiento geomorfológico realizado, se ubicaron los distintos puntos para el análisis de recurrencia de los mismos por medio de dataciones con isótopos cosmogénicos (¹⁴C y ¹⁰Be) con el fin de realizar una correlación entre las observaciones geomorfológicas que permitieron la generación de una temporalidad relativa de los depósitos y las edades a partir de las muestras tomadas para la datación.

Los principios en los cuáles se basa el cálculo de la concentración de los isótopos en la superficie terrestre y sus aplicaciones en la geología se encuentran de manera general en los trabajos de (Lal, 1991). Estos se relacionan con la ocurrencia de dos tipos principales de rayos cósmicos: los rayos solares (de más baja energía y cientos de MeV) y los rayos galácticos (de mayor energía, con un orden entre MeV y TeV). Estas partículas cambian a menudo su trayectoria y energía al entrar en contacto con la atmósfera terrestre, muchas de ellas al encontrarse cargadas, son desviadas por el campo magnético del planeta; sin embargo, aquellas que logran entrar a la tierra pierden energía, y se transforman en partículas asociadas a los rayos cósmicos secundarios. Aquella fracción de rayos cósmicos secundarios que logra sobrepasar la atenuación de la atmósfera terrestre, interactúa con los materiales en la superficie terrestre produciendo nucleidos cosmogénicos terrestres (TCN, por sus siglas en inglés) (Phillips et al., 2001) Dicha producción ocurre por reacciones nucleares que involucran partículas como los neutrones rápidos secundarios, neutrones termales y los muones negativos (Yokoyama et al., 2004; Davis & Schaeffer, 1955; Kubik, et al., 1984)

Los TCN se pueden clasificar en estables (p.e. ^3He , ^{21}Ne , ^{22}Ne) y en isótopos inestables (p.e. ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl), los cuales pueden ser usados en distintos procesos geológicos, teniendo en cuenta que los isótopos inestables tienen una vida media entre los 5.73 Ka y los 1.5 Ma (Gosse & Phillips, 2001) La escogencia de los distintos sistemas de TCN depende en gran medida de la edad estimada del proceso de interés y de la litología (Phillips et al., 2001). En este caso y debido a las características de los depósitos torrenciales que componen la zona de estudio, se utilizó la datación por ^{10}Be para los materiales ricos en cuarzo (p.e. (Ivy-Ochs et al., 2007; Guzmán et al., 2013; Jomelli et al., 2014) encontrados en la cuenca del río Farallones (Sin publicar) y para el resto de los depósitos encontrados, se utilizaron dataciones por medio de ^{14}C , relacionadas con la incorporación de este isótopo en los materiales que contienen carbono en sus estructuras (Aitken, 1990) el cual es ampliamente utilizado en procesos aluviales y aluviotorrenciales (Chiverell & Jakob, 2012).

El estudio hidrológico e hidráulico de la zona se realizó a partir del análisis de parámetros hidrometeorológicos como la intensidad, la frecuencia y la duración, además del tiempo de concentración en cada una de las cuencas. Este último está en función de los parámetros morfométricos, con el fin de calcular la respuesta hidrológica de las cuencas. A partir de esta información se estiman las crecientes de diseño mediante hidrógrafas unitarias sintéticas de Williams & Hann (1973), SOIL CONSERVATION SERVICE - SCS, (1986) y Snyder (1938), además de la aplicación del método racional probabilístico. Se considera que una creciente es cualquier caudal que supere la media de los caudales históricos, y por ende, puede llevar a que en algunos casos se presenten desbordamientos en canales artificiales o naturales a lo largo de la corriente. Para este caso en particular, se determinaron

los caudales máximos para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en las corrientes analizadas, con el objetivo de estimar las crecientes de diseño, teniendo en cuenta las características físicas o morfológicas de las cuencas hidrográficas, la precipitación de la zona y la infiltración que se pueda presentar en el terreno. Debido a la falta de registros de caudales se pueden emplear métodos lluvia – escorrentía para determinar la escorrentía superficial o la creciente de diseño, considerando entonces la intensidad, frecuencia y duración de las lluvias.

Finalmente, la integración de la información levantada derivó en la caracterización de los niveles de depósitos, la estimación de caudales para los periodos de recurrencia mencionados y la estimación de las edades a lo largo del Holoceno de los principales eventos torrenciales observados, con el fin de brindar un aporte al entendimiento de la amenaza por avenidas torrenciales en los Andes del norte, por medio de la correlación de la magnitud y recurrencia de los mismos teniendo en cuenta principalmente su expresión geomorfológica.

2 Características generales de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental colombiana, entre los municipios de Andes y Ciudad Bolívar en el departamento de Antioquia, conformando un área de alrededor de 900 km² entre los cuáles se encuentran las cinco cuencas que hacen parte de este análisis. Estas cuencas a su vez, se encuentran dentro de la cuenca del río San Juan y en su mayoría están asociadas a las vertientes en sentido predominante oeste-este que descienden del referente fisiográfico conocido como Los Farallones del Citará, con alturas variables entre los 4020 y los 1400 m.s.n.m. Desde el punto de vista geológico, en la zona predominan las rocas de la Formación Penderisco-Miembro Urrao, del Cretácico Superior. Las cuáles conforman según (Calle et al., 1980) una secuencia de rocas sedimentarias con un grado bajo de metamorfismo, entre las cuáles es posible encontrar limolitas, shales, grauvacas y argilitas principalmente. Hacia las partes más altas en el límite occidental de la zona, predominan las rocas asociadas al Batolito de Farallones, del Mioceno según Calle & Salinas (1986) el cual conforma un cuerpo ígneo con facies variables entre Tonalita, Granodiorita, Monzonita y localmente Gábrica, de textura hipodiorítica compuesto principalmente por minerales de plagioclasa, cuarzo y hornblenda. Estos materiales descritos anteriormente, conforman el área fuente de los distintos depósitos de vertiente y depósitos aluviotorrenciales que se ubican a lo largo de las partes bajas y las cuencas que drenan el sector (Figura 1).

A nivel geomorfológico, en la zona según (CORANTIOQUIA et al., 2002) se ubican una serie de filos altos, medios y bajos, con un sentido predominante oeste-este, cuyas mayores alturas y relieve relativo se asocian a la margen occidental y decaen en altura hacia el río San Juan.

Los drenajes que componen la zona de estudio son las quebradas La Linda y Los Monos, ubicadas en cercanías a la cabecera municipal del municipio de Ciudad Bolívar, mientras que la quebrada La Arboleda y el río Farallones se encuentran en su área rural. Adicionalmente, en el municipio de Andes se analizó la cuenca del río Tapartó.

2.1 Información hidrometeorológica

A nivel regional, las variaciones climáticas actuales de esta porción del país se encuentran asociadas a la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la Oscilación del Sur El Niño (ENSO, por sus siglas en Inglés), quienes en conjunto con las variaciones del Chorro del Chocó reportadas por Stensrud (1996), Poveda & Mesa (2000) y Rueda & Poveda (2006) conforman una zona de importante precipitación media anual, y que para la vertiente Oriental de La Cordillera Occidental, se considera alrededor de los 2000 y 3000 mm/año según las estaciones meteorológicas reportadas en la zona (Muñoz et al., 2017), presentando importantes variaciones con respecto a la otra vertiente de la misma cordillera, debido a la alta incidencia de la topografía en el sector. Adicionalmente, estos autores reportan que los

meses más secos del año en la zona, corresponden a los periodos de enero – febrero y junio- julio; mientras que los meses con mayor precipitación ocurren en los meses de abril, mayo y octubre.

Las cuencas que conforman la zona de estudio no disponen de ningún tipo de información o registro de caudales a través de su cauce principal, por lo tanto, se implementó la información de precipitación disponible en la zona, asociada a la red de estaciones hidrometeorológicas operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, permitiendo la generación de polígonos de Thiessen con el objetivo de evaluar las estaciones que presentan influencia dentro del área de estudio.

Teniendo en cuenta lo anterior, se estableció que las cuencas de las quebradas La Arboleda, Los Monos, La Linda y el río Farallones, están influenciadas por la estación Betania - Las Guacas (26190090) y que la cuenca del río Tapartó está influenciada en un 62% por la estación Betania - Las Guacas (26190090) y en un 38% por la estación ITA Andes (26195020).

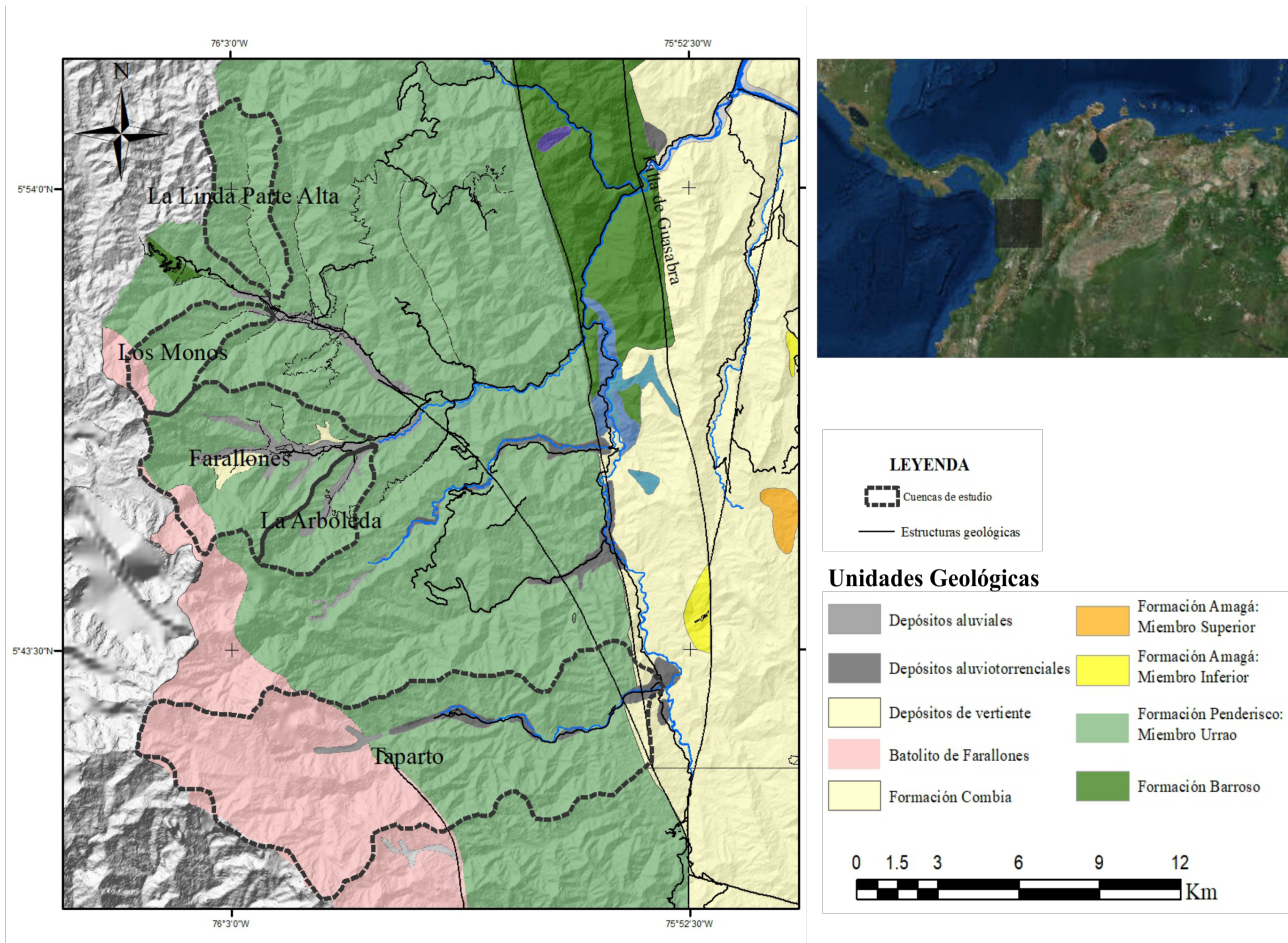


Figura 1 Características geológicas regionales de la zona de estudio. Modificado de Calle et al., (1980).

3 Resultados

3.1 Análisis morfométrico de las cuencas

Para las cuencas de interés se tuvieron en cuenta aquellos parámetros producto del procesamiento de los modelos digitales del terreno (MDT) de la zona, no sólo para la realización del análisis hidrológico, sino para la relación de dichos parámetros con la actividad torrencial encontrada en las cuencas de estudio (*Tabla 1*). Los parámetros de forma según Gómez-Villar (1995) permiten conocer de manera cuantitativa aquellos procesos geomorfológicos que influyen en la dinámica de estas unidades. El área de la cuenca se define según Kostaschuk et al., (1986) como la proyección horizontal de la superficie de la cuenca por medio de un polígono a lo largo de las divisorias de flujo de la misma. Este parámetro es de suma importancia desde el punto de vista hidrológico y geomorfológico, ya que según Calvache et al., (1977) está relacionado con el volumen de agua que entra al sistema por precipitación, la magnitud de los caudales, la producción de materiales, la depositación de los mismos y en este caso, la energía y magnitud de los eventos torrenciales de la cuenca. Teniendo en cuenta que para este caso de estudio las condiciones litológicas y geomorfológicas son similares, el parámetro de área estaría directamente relacionado (entre mayor sea su valor) con una mayor capacidad de generación y arrastre de sedimentos y por tanto con un mayor potencial de generación de eventos torrenciales de magnitudes importantes. Según lo anterior, las cuencas que presentan mayores áreas son las de los ríos Tapartó (121.6 km²) y Farallones (62.88 km²), seguidas por la cuenca de la quebrada La Linda (20.25 km²), y en menor medida las cuencas de las quebradas La Arboleda (13.58 km²) y Los Monos (14.01 km²).

La longitud del cauce principal y de esta hasta su divisoria es relevante en términos de torrencialidad ya que según Aguilar (2009) tiene relación con el tiempo de concentración y los tiempos promedios de las crecientes, por lo cual una longitud mayor indica mayores tiempos de desplazamientos y una duración mayor de los eventos. Teniendo en cuenta lo anterior los mayores cauces están relacionados con los ríos Tapartó (30.51 km) y Farallones (14.69 km); mientras que el cauce de menor longitud es el de la quebrada La Arboleda (5.68 km).

Las pendientes promedio de la cuenca y las principales diferencias de cotas en la zona, además de su relación con las longitudes de los cauces, permiten inferir las condiciones de energía potencial de las mismas, cuya incidencia se da no sólo en el favorecimiento de las condiciones torrenciales, ya sea en el comportamiento del material encausado sino también en la generación de movimientos en masa (Gómez-Villar, 1995). Teniendo en cuenta lo anterior, todas las cuencas analizadas presentan cotas máximas que oscilan

entre 2723 m.s.n.m. (quebrada La Linda) y los 3834 m.s.n.m. (río Farallones) y cotas mínimas entre 1024 m.s.n.m. (río Farallones) y 1266 (quebrada La Linda), mostrando que la cuenca con mayores diferencias de altura es la del río Farallones y la cuenca con una mayor diferencia de alturas y un cauce mucho más corto y por tanto con menor tiempo de respuesta hidrológico se da en la quebrada La Arboleda a raíz de los 5.68 km de su cauce principal, presentando en esa longitud diferencias altitudinales de 1968 m.

Finalmente, se calcularon índices morfométricos como el coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius (Kc) (Gravelius, 1914) que permite la comparación de la forma de la cuenca con una circunferencia. Presenta valores entre 1 y 3 donde los valores cercanos a 1 están relacionados con una mayor redondez de las cuencas y un menor tiempo de concentración; mientras que los valores cercanos a 3 se asocian a cuencas de morfología oval y mayores tiempos de concentración. En general las cuencas analizadas presentaron valores Kc entre 1.29 (quebrada La Arboleda) y 1.54 (río Tapartó) relacionadas con una morfología de tipo oval oblonga.

Se calculó además el índice de rugosidad de Melton (Melton, 1957), que relaciona el relieve y el área de la cuenca, donde según Marchi et al. (1993) aquellas cuencas con un índice de Melton superior a 0.5 están relacionadas con una actividad torrencial. Por lo cual, según este índice sólo la cuenca de la quebrada La Arboleda con un valor de 0.53 presentaría este tipo de comportamiento. Adicionalmente, este índice acompañado de los parámetros propuestos por Wilford et al. (2004) permiten relacionar los parámetros morfométricos con un tipo de torrencialidad específico (*Tabla 3*). La relación encontrada entre estos parámetros será discutida más adelante.

3.2 Isótopos cosmogénicos: ¹⁴C y ¹⁰Be

Los resultados de las dataciones por ¹⁴C se presentan en la siguiente tabla (*Tabla 2*). Estas fueron realizadas en distintos sistemas de depósitos considerados desde el análisis geomorfológico como de carácter antiguo, subreciente y reciente. En total se obtuvieron 15 muestras por AMS ¹⁴C calibradas en el programa BetaCal3.21 bajo el método INTCAL13 (Ramsey, 2009; Reimer et al., 2013) en el laboratorio Beta-Analytic (Florida, USA).

Las dataciones de TCN a partir de la concentración de ¹⁰Be se llevaron a cabo en 4 muestras asociadas a los depósitos de carácter antiguo del río Farallones (estimados a partir de dataciones relativas y relaciones de campo). Estos análisis se realizaron en el laboratorio ISterre de la Universidad Grenoble Alps (Grenoble, Francia) calibradas bajo el programa CREP, cuyos resultados se encuentran en proceso de publicación.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de las cuencas analizadas. *Magna Sirgas, origen Bogotá.

Parámetro	Unidad	Quebrada. La Arboleda	Río Farallones	Quebrada. Los Monos	Quebrada. La Linda	Río Tapartó
Área de drenaje	km ²	13,58	62,88	14,01	20,25	121,6
Longitud Cauce principal	km	5,68	14,69	6,81	9,79	30,51
Longitud del río hasta la divisoria	km	0,29	0,66	1,00	0,45	0,94
Pendiente cauce principal	%	13,96	11,33	14,65	10,37	6,24
Pendiente cuenca	%	28,77	21,05	25,51	16,39	11,59
Cota mayor cuenta	m	3180	3834	3116	2723	3816
Cota menor cuenca	m	1218	1024	1254	1266	1179
Cota mayor río	m	2011	2688	2252	2281	3082
Cota menor río	m	1218	1024	1254	1266	1179
Índice de Melton		0.53	0.35	0.32	0.23	0.49
Índice de Gravelius (Kc)		1.29	1.30	1.30	1.33	1.54

Tabla 2. Resultados ¹⁴C obtenidos.

No.	Muestra	Cuenca	Localización geográfica		Edad ¹⁴ C cal yr BP (INTCAL13) 2σ	Desviación (±)	δ ¹³ C (%)	¹⁴ C Laboratorio	Material datado
			Latitud (°N)	Longitud (°W)					
1	Tlm_01	Quebrada Los Monos	5°51'11.22"N	76° 2'36.79"O	170 pMC	0.44	-28.1	Beta-490280	Carbón vegetal
2	Tba_01	Quebrada La Linda	5°51'40.67"N	76° 2'6.99"O	140	30	-24.6	Beta-490279	Carbón vegetal
3	Tarb_01	Quebrada La Arboleda	5°47'27.77"N	76° 0'24.58"O	1840	30	-12.7	Beta-487802	Carbón vegetal
4	Tarb_02	Arboleda	5°47'41.56"N	76° 0'8.31"O	1220	30	-24.2	Beta-490281	Carbón vegetal
5	Tfar_01		5°47'36.20"N	76° 2'6.35"O	100.62 pMC	0.38	-22.5	Beta-487803	Suelo orgánico
6	Tfar_02	Río Farallones	5°47'55.56"N	76° 1'50.24"O	170	30	-27.1	Beta-490282	Carbón vegetal
7	Tfar_03		5°47'56.40"N	76° 2'55.25"O	2790	30	-27.9	Beta-490283	Carbón vegetal
8	Ttap_01		5°47'36.20"N	76° 2'6.35"O	100	30	-28.1	Beta-487804	Carbón vegetal
9	Ttap_02		5°41'7.52"N	75°59'32.0"O	2010	30	-25.1	Beta-487805	Carbón vegetal
10	Ttap_03		5°41'1.07"N	75°59'22.64"O	870	30	-25.8	Beta-487806	Carbón vegetal
11	Ttap_04	Río Tapartó	5°41'32.39"N	75°59'31.63"O	310	30	-25.2	Beta-487807	Carbón vegetal
12	Ttap_05		5°41'32.39"N	75°59'31.63"O	380	30	-23.4	Beta-487808	Sedimento orgánico
13	Ttap_06		5°42'0.24"N	75°57'34.36"O	610	30	-22.3	Beta-490285	Sedimento orgánico
14	Ttap_07		5°41'55.26"N	75°56'55.37"O	110.47 pMC	0.41	-25.9	Beta-490286	Carbón vegetal
15	Ttap_08		5°42'1.51"N	75°57'33.27"O	123.11 pMC	0.46	-26.7	Beta-490284	Carbón vegetal

3.3 Características de los depósitos torrenciales en las cuencas analizadas

3.3.1. Cuenca del río Tapartó

En la cuenca del río Tapartó, a nivel histórico, se han presentado eventos torrenciales de gran relevancia, entre los cuáles se destacan el del 27 de abril de 1943 y el del 25 de abril de 1993, dónde se reportaron importantes afectaciones en los sectores de La Rochela, La Selva, La Legía, La Camelia, El Bosque, entre otros según datos oficiales del DAPARD en (Naranjo, 1993). (Figura 4)

A nivel geomorfológico, la cuenca se caracteriza por presentar una dirección predominante en sentido oeste-este, la cual presenta importantes controles estructurales en distintas direcciones. Los lineamientos en sentido oeste-este, se evidencian en una profundización del cauce y una apariencia escalonada del mismo, donde predomina la roca en el lecho y pocos depósitos torrenciales, mientras que los controles estructurales en sentido N20°E muestran un aumento significativo en la concentración y desarrollo de sistemas de depósitos, con tamaños de bloques métricos y un cauce de pendientes constantes y alargadas con un lecho en depósito aluviotorrencial. Mostrando una importante incidencia tanto en la morfología del cauce y de la cuenca, como en la distribución de los depósitos torrenciales.

Los eventos torrenciales en la cuenca se caracterizan por presentar no sólo magnitudes relevantes a nivel histórico, sino también por mostrar complejos sistemas de depósitos, en los que es posible la identificación de hasta 12 eventos torrenciales (E1, E2...E12) a lo largo de 5 niveles diferentes con temporalidades características según los parámetros geomorfológicos analizados (Figura 2 y Figura 3).

Los depósitos más antiguos de la cuenca están asociados a los niveles 4 y 5 encontrados durante el trabajo de campo. Presentan alturas de hasta 30 m con respecto al cauce principal y una distancia que no supera los 100 m del mismo. Se encuentran distribuidos de manera aleatoria a lo largo de la cuenca, hacia la parte alta en los sectores de La Rochela y La Selva se encuentran intercalados con depósitos de vertiente y paleosuelos, además, presentan una morfología ondulada con pendientes de hasta 15°. De igual manera se encuentran de manera puntual hacia la entrada principal del corregimiento de Tapartó cubriendo una extensión inferior a los 200 m² sobre los cuáles se encuentra la vía. Finalmente, estos niveles antiguos adquieren mayor extensión hacia la desembocadura del río Tapartó con el río San Juan en el sector de El Bosque, dónde conforman una morfología de cono hacia la margen izquierda, con alturas de hasta 30 m con respecto al nivel del cauce y una morfología ondulada de pendientes inclinadas, evidenciando la acción de los procesos denudativos durante en los últimos miles de años.

Estos niveles antiguos muestran espesores variables,

debido a la interacción y superposición con otros depósitos, además de poca continuidad a lo largo de la cuenca. A nivel sedimentológico, los depósitos presentan una apariencia caótica y tamaños de grano promedio de 50 cm, sin embargo, se destacan bloques de hasta 5 m de diámetro encontrados a nivel puntual, dónde predominan hasta en un 98% la presencia de bloques asociados al Batolito de Farallones (apariciencia granítica) por encima de los bloques relacionados con la Formación Penderisco – Miembro Urrao (metasedimentos), además de una apariencia subredondeada a redondeada. Finalmente, debido a la distribución caótica de los depósitos asociados a esta temporalidad, no fue posible el reconocimiento de distintos eventos de depositación.

Los depósitos de carácter subreciente muestran una mayor presencia a lo largo de la cuenca, a nivel geomorfológico se asocian a franjas parcialmente continuas relacionadas con los niveles 3 y 4 identificados. Además, no presentan una ondulación definida en su superficie ni evidencias relacionadas con una marcada acción de los procesos denudativos sobre ellos. Sus pendientes se encuentran entre los 3° y 5° para el nivel 3 y entre 4° y 9° para los depósitos del nivel 4. Desde el punto de vista sedimentológico, fue posible la identificación de hasta 8 eventos asociados a distintas crecientes y son comunes las intercalaciones de estos con capas de ceniza volcánica y hasta 3 niveles de paleosuelos. Además, se observa que, de los eventos registrados, al menos 2 de ellos tuvieron magnitudes relevantes marcadas por la presencia de depósitos clasto-soportados con bloques de tamaños métricos y centimétricos y porcentajes de matriz inferiores al 20%, además de un aspecto principalmente subanguloso a subredondeado, los cuáles se encuentran intercalados con depósitos que exhiben un mayor nivel de selección y un mayor porcentaje de redondez de los clastos. Además, según el conteo de bloques realizado, los bloques arrastrados tienen un tamaño promedio de 50 cm y en un 95% están relacionados con una proveniencia del Batolito de Farallones. Finalmente, el análisis geomorfológico de estos depósitos sugiere que estos están relacionados con aquellos eventos de depositación de magnitudes muy superiores a las registradas con regularidad; pero con una recurrencia muy baja que incluso puede llegar a superar los límites de los eventos registrados con anterioridad. Una de las principales características de estos depósitos de carácter antiguo y subreciente, es la presencia de líquenes, los cuáles han colonizado en gran medida los bloques expuestos, complementando las evidencias geomorfológicas relacionadas con un mayor tiempo de exposición de estos materiales en superficie.

Los depósitos de carácter reciente están asociados a la dinámica actual del río y se encuentran cubiertos por las evidencias de la creciente del año 1993 debido a la magnitud de la misma y a su capacidad de retrabajamiento sobre eventos de menor magnitud. Se encuentran relacionados con los niveles 1 y 2 cartografiados con alturas inferiores a los 3m y contiguos al cauce principal, sobre estos niveles no se observan evidencias asociadas al crecimiento de suelo,

líquenes o a la intercalación con cenizas volcánicas; sin embargo, es común la presencia de restos de árboles y material vegetal producto de las crecientes de los últimos años. Desde el punto de vista sedimentológico presentan un bajo nivel de selección y es común la presencia de granulometrías variables desde arenas y gravas hasta bloques de hasta 6 m de diámetro, redondeados y subredondeados, con un porcentaje del 100% en los conteos realizados de bloques de naturaleza ígnea. Sobre estos niveles es común la formación de islas alargadas en el mismo sentido del cauce principal y la presencia de depósitos con una mayor continuidad a lo largo de la cuenca y pendientes relacionadas con el cauce actual del río, en un promedio de unos 5°.

3.3.1.1 *Edad y correlación de los depósitos*

A nivel geomorfológico es posible inferir que la cuenca del río Tapartó presenta una torrencialidad desarrollada y exhibe la presencia de niveles de depósitos con diferentes edades y actividad denudativa en su superficie. Autores como Velásquez & Mejía (1991) y Hermelin & Toro (1990) proponen una actividad torrencial en la cuenca asociada a los últimos 20.000 años teniendo en cuenta la correlación de los niveles de ceniza encontrados, en donde proponen la presencia de al menos 2 eventos torrenciales en los últimos 10.000 años de magnitudes similares a los eventos presentados por la cuenca en la primera parte de la década de los años 90, y al menos 3 eventos entre los 10.000 y 20.000 años. Adicionalmente, el estudio realizado por Piedrahíta (1996) llevó a cabo una datación por radiocarbono hacia la parte baja del sector de La Rochela en un sector considerado en este estudio sobre niveles de carácter subreciente, obteniendo una edad de radiocarbono de 2.210 ± 85 años antes del presente, la cual coincide a nivel estratigráfico con una datación realizada en este trabajo en el sector de La Selva y La Rochela (Parte alta de la cuenca) que arrojó una edad por radiocarbono de 2010 ± 30 años antes del presente.

En la cuenca se realizaron 8 dataciones por radiocarbono (Tabla 2), mostrando un registro de eventos de magnitud importante tomado en niveles 3 y 4, clasificados como de carácter subreciente; los cuáles muestran edades de radiocarbono comprendidas entre 310 ± 30 , 610 ± 30 y 870 ± 30 años antes del presente (muestras Ttap_04, Ttap_06 y Ttap_03 respectivamente), las cuáles están asociadas a eventos con períodos de recurrencia menores, pero dentro de los registros estratigráficos y con un potencial de daño relevante. Los cuáles según la información geomorfológica y las evidencias sedimentológicas, podrían correlacionarse con eventos similares o superiores en términos de magnitud al evento ocurrido en 1993. La muestra Ttap_06 con una edad de 610 ± 30 años antes del presente se encuentra sobre un nivel 3 en la vía principal hacia el corregimiento de Tapartó y corresponde a un suelo derivado de cenizas volcánicas. Teniendo en cuenta lo anterior, es posible correlacionar estas edades con la fase eruptiva Alfombrales del Holoceno Superior reportada por Thouret et al. (1990), y específicamente con un evento reportado con edades de

radiocarbono de 600 ± 130 años antes del presente; sin embargo, aún se hace necesaria la información cronoestratigráfica de estas cenizas a lo largo de la cuenca del río Tapartó para establecer una relación más detallada con las secuencias de depósitos torrenciales.

las edades más recientes corresponden a las muestras Ttap_07 y Ttap_08 tomadas en niveles 1 y 2, de carácter reciente, según los parámetros geomorfológicos analizados y afectados por la creciente de 1993, arrojando un alto contenido de carbono moderno, por lo cual se sitúan en cronologías más recientes que 1950 según los principios generales del método expuestos por autores como Libby (1970) Finalmente, hacia el tope de una secuencia muestreada en el sector de La Rochela y sobre una capa de cenizas volcánicas se encuentra una edad de 100 ± 30 años antes del presente (muestra Ttap_01), la cual podría correlacionarse con el evento eruptivo Lagunillas del volcán Nevado del Ruíz, comprendido entre 1828-1845 y reportado en los estudios de Thouret et al. (1990).

3.3.1.2 *Recurrencia de los eventos torrenciales en la cuenca del río Tapartó*

En el estudio realizado en la cuenca por Piedrahíta (1996) se estimó a partir de la correlación con los eventos eruptivos del Nevado del Ruíz y la datación por radiocarbono realizada, una recurrencia promedio de 280 años para eventos de magnitudes equivalentes al evento torrencial de 1993; teniendo en cuenta lo anterior, a partir del análisis geomorfológico y las dataciones realizadas en este estudio, se estima que los niveles 1 y 2, de carácter reciente según las condiciones geomorfológicas de la cuenca, están sujetos a eventos torrenciales a lo largo de las temporadas de lluvia en esta latitud con una recurrencia mayor y una magnitud inferior al evento ocurrido en 1993. Desde el punto de vista hidráulico se encontró que, para alcanzar los niveles de carácter reciente según el análisis geomorfológico, se deben alcanzar caudales de $7.000 \text{ m}^3/\text{s}$, asociados a períodos de retorno de 3.045 años, sólo teniendo en cuenta la fracción de agua de la creciente.

Los niveles 3 y 4, de tipo subreciente a nivel geomorfológico, están relacionados con eventos de menor recurrencia, pero de magnitudes importantes; mientras que los depósitos con edades superiores a los 2.000 años por las dataciones de radiocarbono, se encuentran asociados a eventos con dinámicas climáticas y geomorfológicas diferentes a las condiciones actuales, por lo cual es posible inferir que no tienen relación con los eventos registrados a nivel reciente y subreciente.

DEPÓSITOS TORRENCIALES RÍO TAPARTÓ

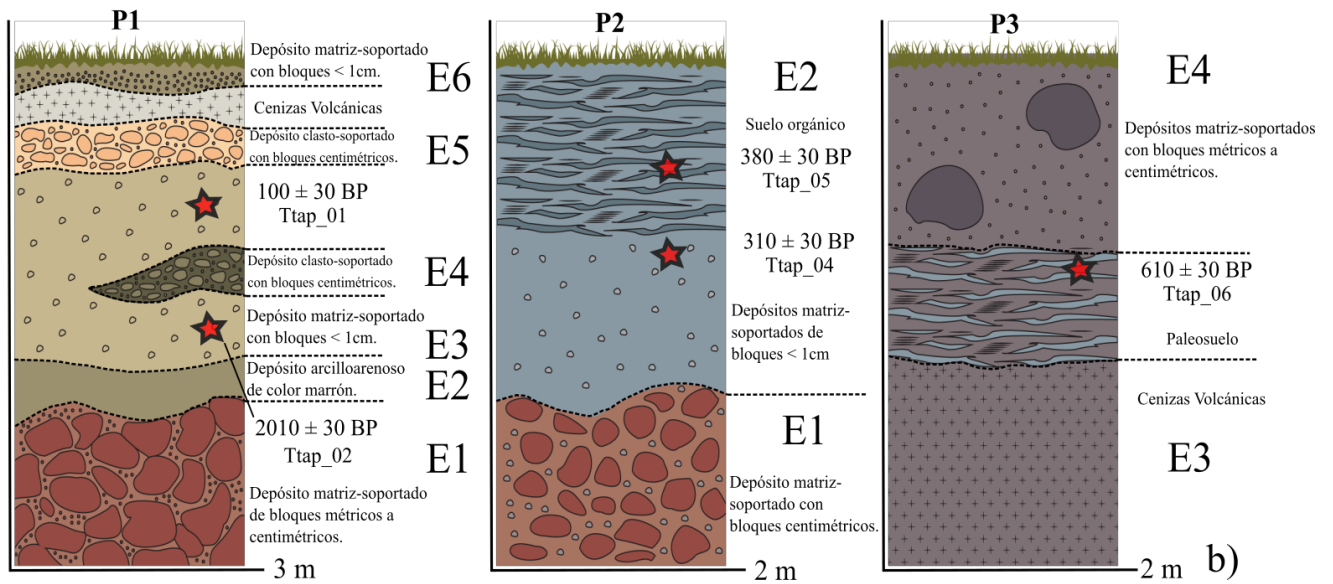
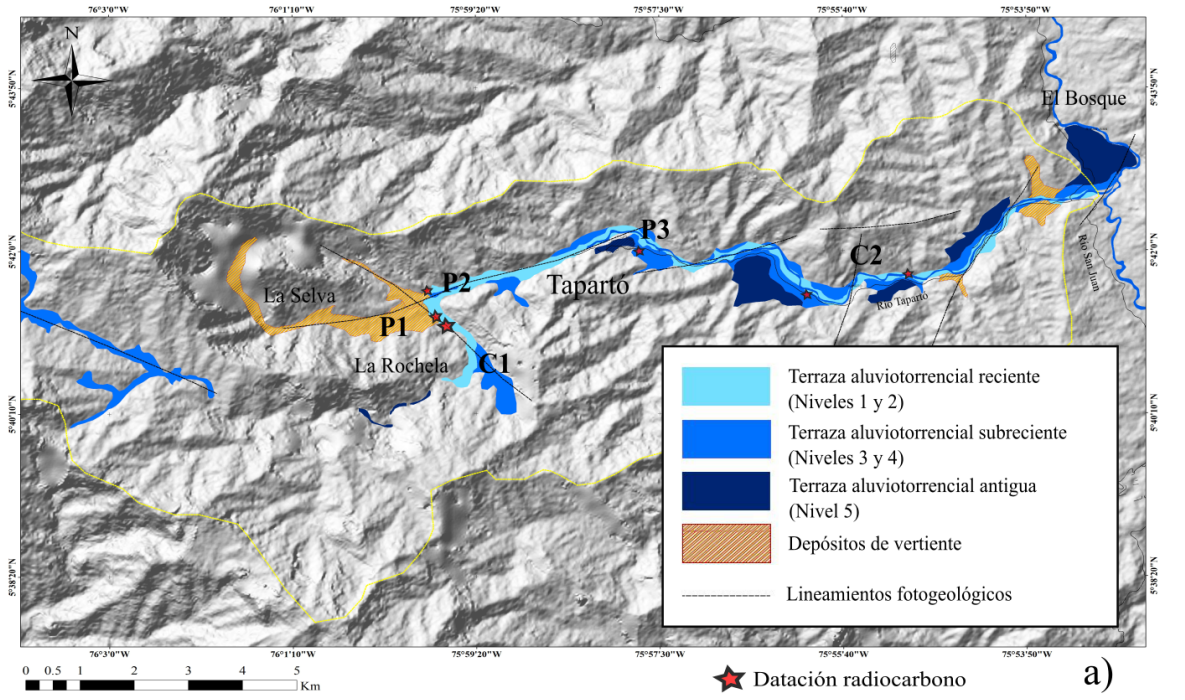


Figura 2. a) Mapa geomorfológico de los depósitos torrenciales del río Tapartó. b) Perfiles estratigráficos levantados en distintos puntos de la cuenca.

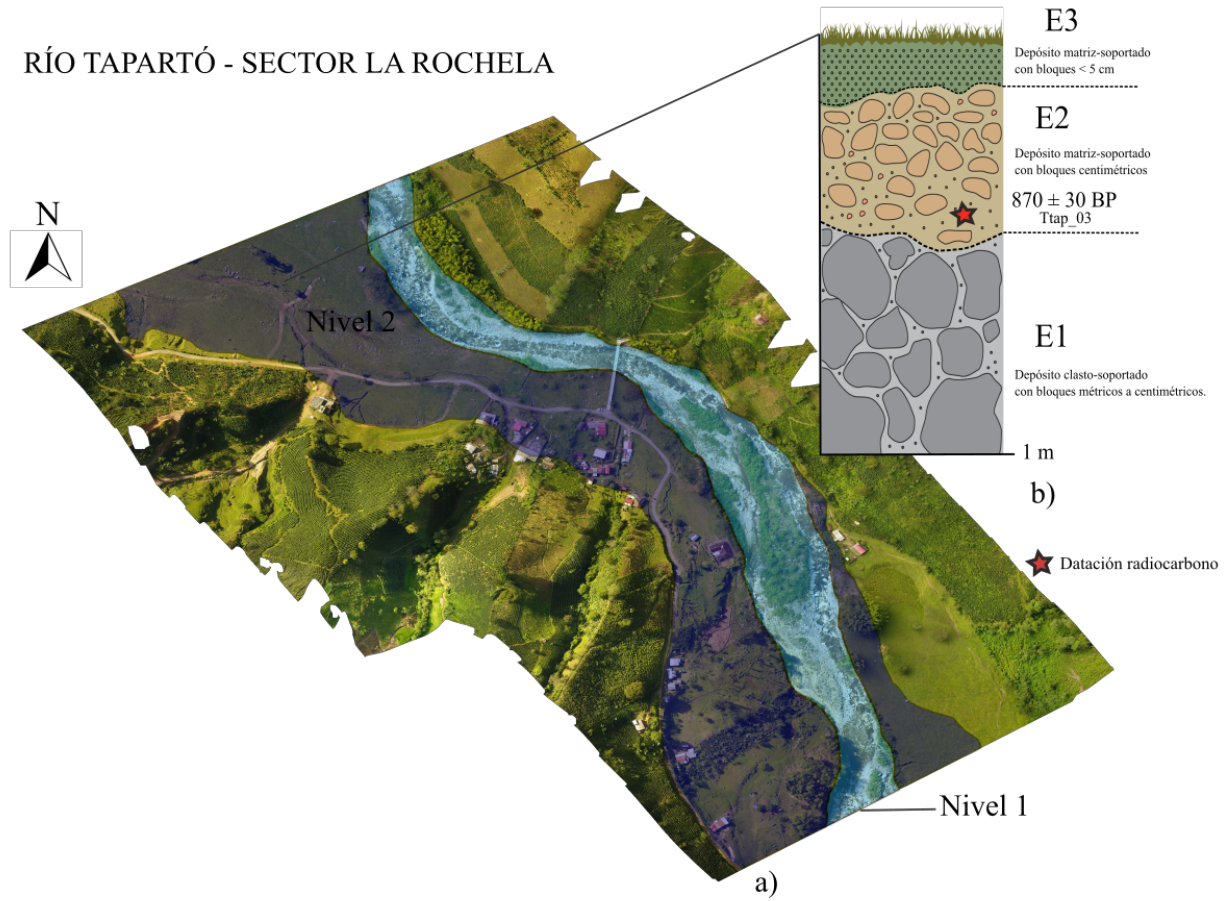


Figura 3. a) Niveles observados en el sobrevuelo con dron realizado en el sector de La Rochela, parte alta de la cuenca del río Tapartó. b) Perfil estratigráfico levantado.

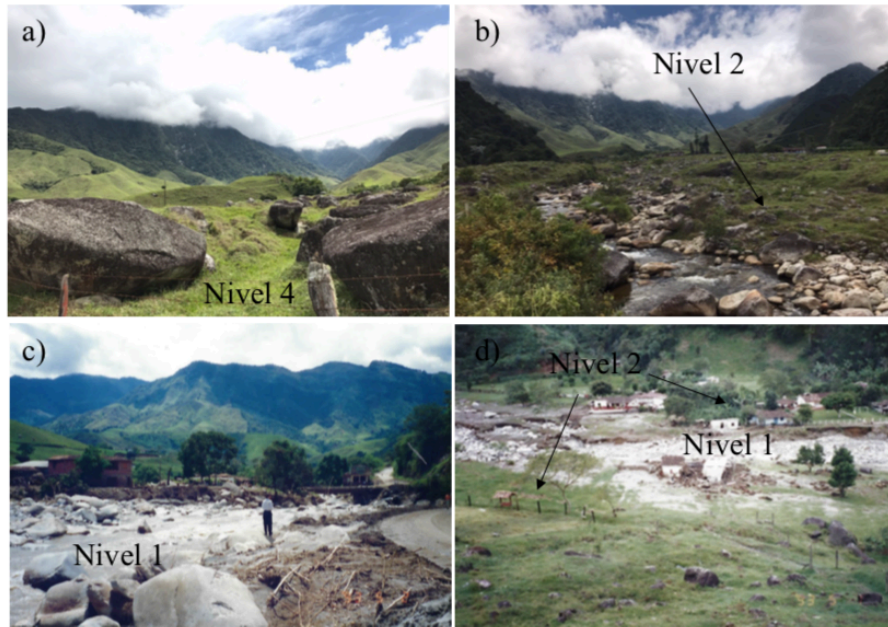


Figura 4. a) Características de los depósitos más antiguos en la parte alta de la cuenca del río Tapartó. b) Depósitos torrenciales recientes sector La Rochela. c) y d) Características de la avenida torrencial de 1993 en el sector de La Rochela. Fotografías: Ingeniero Geólogo Mario Augusto Fl

3.3.2. Cuenca del río Farallones

La cuenca del río Farallones ubicada en el municipio de Ciudad Bolívar en el departamento de Antioquia presenta una serie de depósitos de extensiones importantes en sentido oeste-este, alcanzando en algunos sectores hasta 1 km a lo largo de los 14.69 km de longitud del cauce principal. A nivel histórico no se reportan eventos torrenciales de magnitudes importantes, sin embargo, en la cuenca son comunes las crecientes torrenciales de menor magnitud durante las temporadas de lluvia en el país. A nivel local, no se identificaron controles estructurales sobre los depósitos, agrupados en 6 niveles principales, con evidencias de hasta 7 eventos de depositación (E1, E2...E7) (*Figura 5*) los cuáles ocupan importantes áreas en la vía y alrededores del corregimiento de San Bernardo de Los Farallones.

Una de las particularidades de esta cuenca se da en el desarrollo de niveles asociados a una temporalidad antigua (Niveles 5 y 6), la cual se encuentra evidenciada por el desarrollo de superficies onduladas y pérdida de la matriz de los depósitos en alrededor de un 25%, al igual que el desarrollo de líquenes en los bloques y unas alturas de hasta 42 m con respecto a la cota del nivel base del río Farallones, además de distancias variables entre los 50 y 150 m. Estos depósitos de carácter antiguo se encuentran distribuidos en la parte alta de la cuenca a lo largo de los sectores de El Ardedero y La Cascada, donde muestran pendientes de 25° y una intercalación con depósitos de vertiente, mientras que hacia la parte media de la cuenca conforman una franja continua en la zona central de los depósitos, a lo largo de la vía principal y el corregimiento, con pendientes que no superan los 5° (*Figura 5*).

Estos niveles antiguos muestran espesores importantes, los cuáles pueden ser inferidos a partir de la altura de estos en relación con los cauces principales y debido a que estos tienen su lecho sobre estas mismas unidades de depósitos, donde no afloran unidades de roca. A nivel sedimentológico, los depósitos presentan una apariencia caótica y tamaños de bloques promedio de 2 m, sin embargo, se destacan bloques de hasta 12 m de diámetro encontrados a nivel puntual, donde predominan hasta en un 80% la presencia de bloques asociados al Batolito de Farallones (apariencia granítica) por encima de los bloques relacionados con la Formación Penderisco – Miembro Urrao (metasedimentos), además de una forma subredondeada a subangulosa. Finalmente, debido a la distribución caótica de los depósitos asociados a esta temporalidad, no fue posible el reconocimiento de distintos eventos de depositación.

Los depósitos de carácter subreciente se encuentran distribuidos a lo largo de toda la cuenca mostrando una mayor continuidad (Niveles 3 y 4). No presentan una ondulación marcada en su superficie, conservando la dirección principal del flujo que los formó, con pendientes de hasta 8° hacia la parte alta de la cuenca. A nivel sedimentológico se identificaron hasta 3 eventos torrenciales

con bloques promedio de 1.5 m de diámetro, mostrando en general una relación bloques – matriz de 60-40% respectivamente y un área fuente entre materiales ígneos y metasedimentarios.

Los depósitos de carácter reciente están asociados a la dinámica actual del río Farallones y de afluentes como la quebrada Sucre, La Cascada y La Sucia principalmente. Presentan alturas de hasta 4 m con respecto a los cauces y anchos variables que pueden alcanzar los 80 m. Se encuentran relacionados con los niveles 1 y 2 cartografiados. Los bloques encontrados en estos niveles son de tamaños menores con un promedio de 45 cm de diámetro, además de un origen con porcentajes similares entre todas las unidades litológicas presentes en la cuenca.

3.3.2.1. Edad y correlación de los depósitos

La cuenca del río Farallones presenta una torrencialidad muy desarrollada, bajo temporalidades del Holoceno tardío, representadas no sólo por la extensión de los depósitos y la magnitud los bloques encontrados, sino también por la diferencia de alturas y el espesor inferido de los depósitos a partir de las evidencias geomorfológicas. Teniendo en cuenta las evidencias glaciares reportadas por CORANTIOQUIA (1997) se infiere un límite máximo de estos depósitos para 14.000 años y una influencia glaciario en los mismos; sin embargo, las dataciones realizadas en los depósitos más antiguos a nivel geomorfológico, por medio de la concentración de ^{10}Be , arrojaron edades de 8000 años, 6220 años y 6730 años (Sin publicar). Las edades obtenidas a partir de radiocarbono para un nivel de carácter subreciente, arrojó una edad de 2790 ± 30 años antes del presente (Tfar_03), mientras que para los niveles de carácter reciente se obtuvo una edad de 170 ± 30 años antes del presente (Tfar_02).

Finalmente, desde el punto de vista hidráulico según la modelación realizada, se encontró que, para alcanzar los niveles 1 y 2 de carácter reciente descritos anteriormente, se deben alcanzar caudales de $15000 \text{ m}^3/\text{s}$, asociados a períodos de retorno de 14800 años.

3.3.3. Cuenca de la Quebrada La Arboleda

En la quebrada La Arboleda se han presentado a nivel histórico eventos torrenciales de magnitudes importantes, entre los cuáles se destacan la avenida torrencial del 4 de junio de 1991 que, según los datos oficiales del archivo histórico del municipio de Ciudad Bolívar, derivó en el reasentamiento de 60 familias y la creación del corregimiento de Villa Alegría.

A nivel geomorfológico, la cuenca presenta un cauce recto en sentido SW-NE, donde en términos generales se registran 4 niveles de terrazas con temporalidades antiguas, subrecientes y recientes, entre los cuáles fue posible la identificación de al menos 4 eventos torrenciales (E1,

E2...E4), incluyendo el evento registrado en 1991. Los depósitos más antiguos de la cuenca están asociados al nivel 4 cartografiado, el cual presenta alturas variables inferiores a los 30 m con respecto al cauce principal de la quebrada La Arboleda y a una distancia de hasta 450 m del mismo. Se encuentra de manera puntual conformando franjas alargadas inferiores a los 30 m de longitud hacia la parte alta de la cuenca y hacia la parte baja en la margen izquierda de la misma a la altura del sector de La Susana, donde presenta una morfología ondulada de laderas cóncavas y topes amplios. (Figura 6)

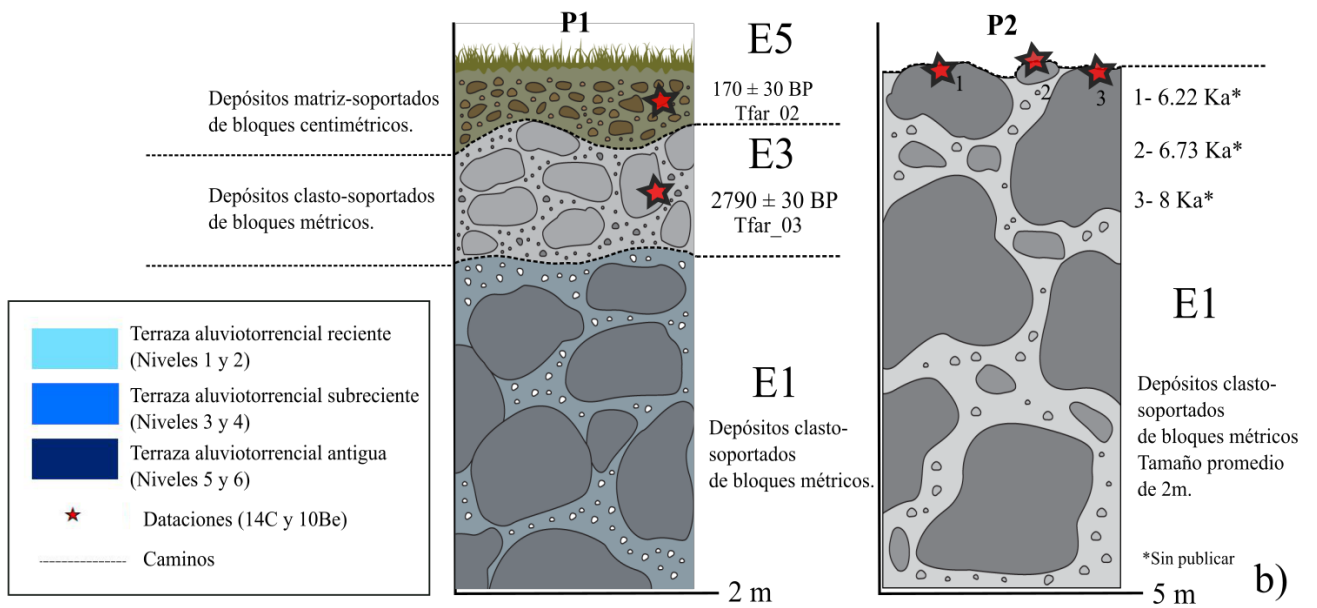
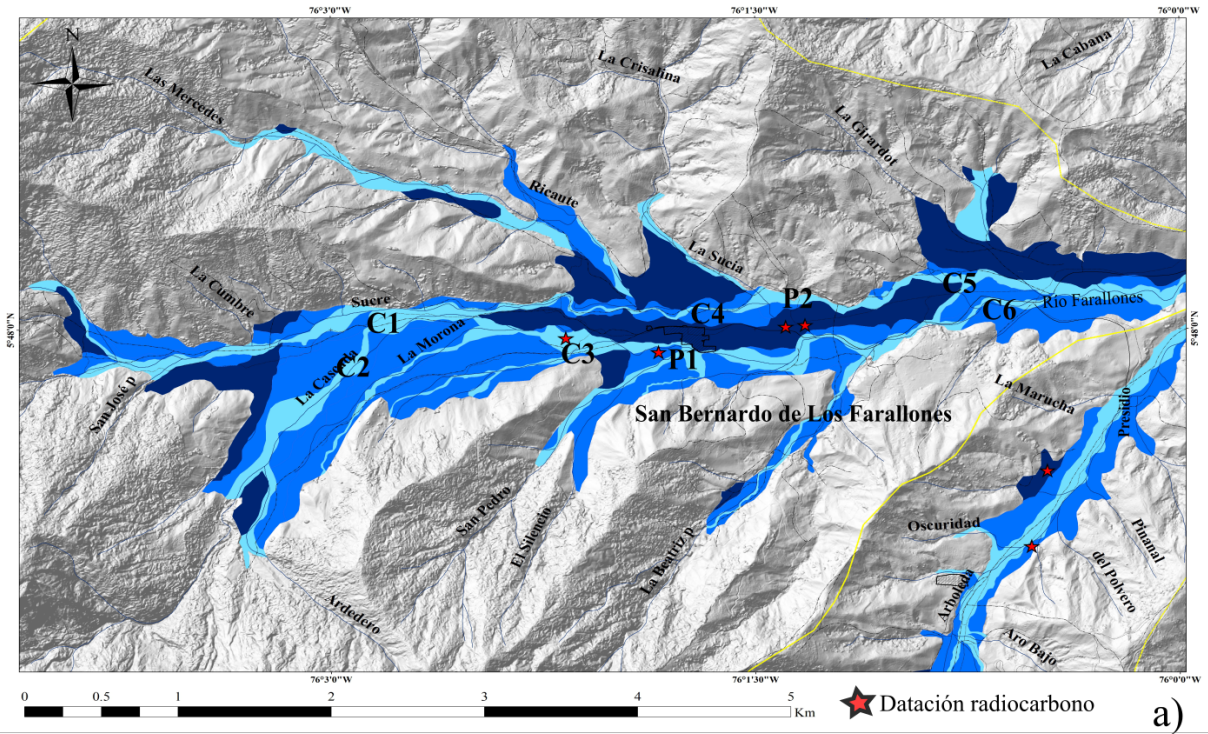
El ancho máximo de estos niveles es de 20 m según el trabajo de campo realizado. A nivel sedimentológico predominan los bloques de 65 cm de diámetro y de litologías tanto ígneas como metasedimentarias, donde sólo fue posible la identificación de un evento de depositación. Una de las principales características de este nivel, además de los tamaños encontrados y la presencia de líquenes en los bloques expuestos, fue la predominancia de matriz de hasta un 65% sobre los bloques encontrados y la preservación de la misma, dando una apariencia de superficie ondulada con presencia de bloques a nivel puntual.

Los depósitos de carácter subreciente se encuentran hacia los costados superiores de ambas márgenes de la cuenca, a lo largo del nivel 3, con alturas entre 5 y 8 m con respecto al nivel base principal y pendientes entre 5 y 15°. Algunos de ellos se encuentran intercalados con depósitos de vertiente o asociados al material de descarga de los afluentes menores de la quebrada La Arboleda. Sobre este nivel se

identificó un evento torrencial (E2), caracterizado por la presencia de materiales clastosoportados y subredondeados con tamaños promedio de 150 cm de longitud y una predominancia de hasta un 70% de bloques de litología metasedimentaria asociados a la Formación Penderisco – Miembro Urrao, sobre los cuáles es común la presencia de líquenes y pátinas de óxidos.

Los depósitos de carácter reciente están asociados a la dinámica actual de la quebrada y a los materiales retrabajados por la creciente de 1991, los cuáles muestran una distribución uniforme en franjas alargadas desde la parte media de la cuenca. Se relacionan con los niveles 1 y 2 cartografiados y con los eventos de depositación más recientes (E3 y E4). Una de las principales características de estos depósitos es su extensión y la conformación de un cauce amplio, donde es usual alcanzar los 100 m de ancho y una relación de sedimentos y bloques que conforman una apariencia trenzada y la división del cauce principal de la quebrada en varios cauces auxiliares a lo largo de todo el sistema de depósitos. Además, estos niveles presentan pendientes muy bajas (inferiores a los 5°) y una apariencia clastosoportada con porcentajes de matriz muy bajos. Los bloques presentan un origen mixto en relación a las unidades litológicas que afloran en la zona a nivel regional y hacia el estrato superior (E4) es usual la presencia de materiales antrópicos arrastrados por la creciente de 1991.

DEPÓSITOS TORRENCIALES RÍO FARALLONES



(Figura 5. a) Mapa geomorfológico de los depósitos torrenciales del río Farallones. b) Perfiles estratigráficos levantados en distintos puntos de la cuenca. (Los datos de ^{10}Be fueron obtenidos en el marco del proyecto de cooperación ECOS-NORD).

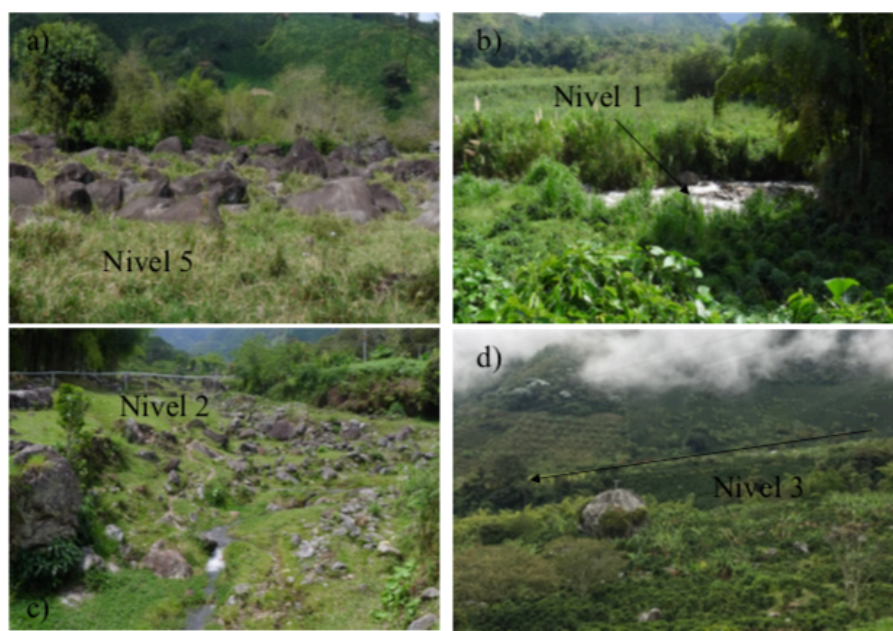


Figura 6. a) Características de los depósitos más antiguos hacia la parte media de la cuenca del río Farallones. b) Depósitos torrenciales recientes. c) Características de los niveles de carácter reciente y subreciente hacia la parte alta de la cuenca. d) Depósitos torrenciales subrecientes en el sector de La Cascada, parte alta de la cuenca.

3.3.3.1. Edad y correlación de los depósitos

Además de los registros históricos que sitúan al evento de 1991 dentro de los depósitos recientes; en la cuenca se realizaron dos dataciones por radiocarbono. Arrojando para el nivel de carácter subreciente (según el análisis geomorfológico) muestreado a la altura de la Finca Santa Isabel una edad de 1220 ± 30 años antes del presente (Tarb_02), mientras que para los niveles de carácter antiguo

se obtuvo una edad de 1840 ± 30 años antes del presente (Tarb_01). Finalmente, desde el punto de vista hidráulico según la modelación realizada, se encontró que, para alcanzar los niveles 1 y 2 de carácter reciente descritos anteriormente, se deben alcanzar caudales de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, asociados a periodos de retorno de 3780 años.

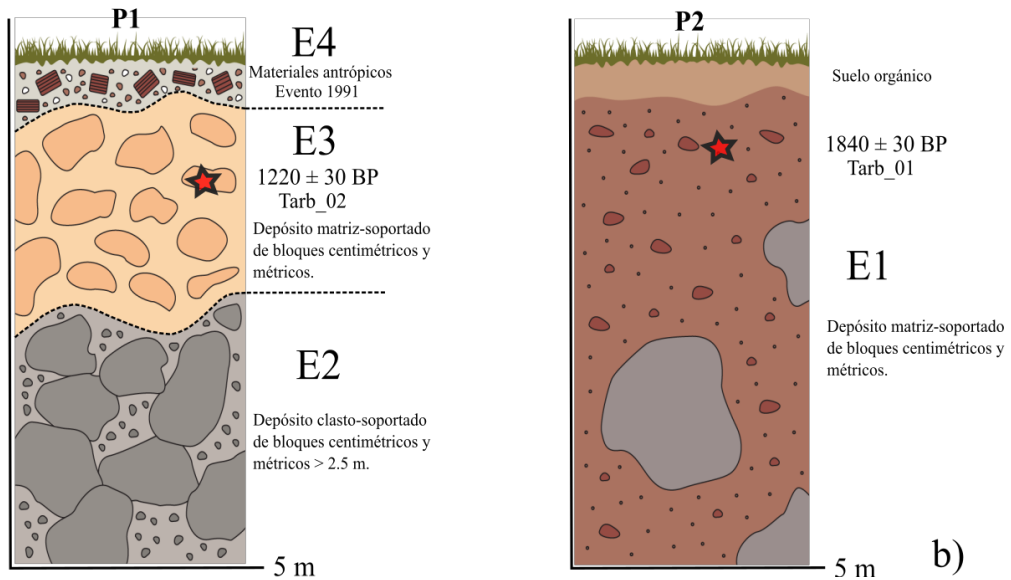
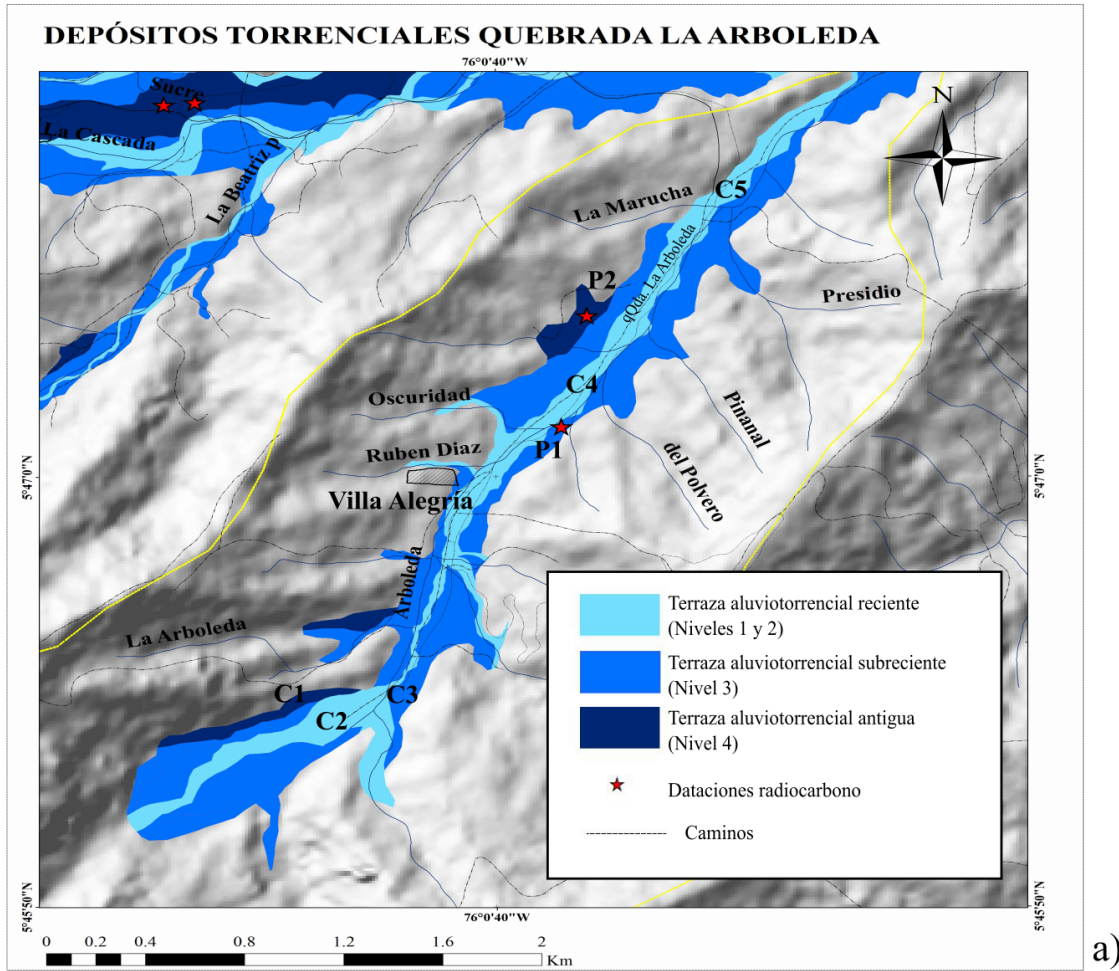


Figura 7. a) Mapa geomorfológico de los depósitos torrenciales de la quebrada La Arboleda.
 b) Perfiles estratigráficos levantados en distintos puntos de la cuenca.



Figura 8. a) y b) Depósitos torrenciales recientes asociados al evento torrencial de 1991 en la quebrada La Arboleda. c) y d) Características de los niveles de carácter reciente y subreciente hacia la parte media de la cuenca.

3.3.3.2. Edad y correlación de los depósitos

Además de los registros históricos que sitúan dos eventos torrenciales en los últimos 150 años, en la cuenca se realizó una datación por radiocarbono en el nivel 2, en una profundidad de 2 m, asociado desde el punto de vista estratigráfico con el E5 de la cuenca, arrojando una edad posterior a 1950 (muestra Tlm_01) debido a la presencia de carbono reciente en los materiales datados, por lo cual es posible inferir que la actividad torrencial de la cuenca es muy alta a nivel histórico.

3.3.4. Cuenca de la Quebrada Los Monos

La cuenca de la quebrada Los Monos ubicada en el municipio de Ciudad Bolívar ha presentado eventos históricos de magnitudes importantes. Según el registro oficial del municipio se presentó una avenida torrencial el 14 de abril de 1878, la cual afectó principalmente el sector de Chapinero en cercanías a la desembocadura de la quebrada Los Monos con el río Bolívar en el casco urbano del municipio. Adicionalmente, se presentó una avenida torrencial de magnitudes importantes el 20 de septiembre del 2018, la cual afectó en gran medida los sectores aledaños al cauce, con magnitudes superiores a las reportadas a nivel histórico (Figura 10).

A nivel geomorfológico, en la cuenca conforma una franja en sentido predominante oeste- este, con un leve giro hacia el sur hacia la desembocadura con el río Bolívar, asociado a nivel puntual con controles estructurales en sentido N35°W, evidenciados durante el trabajo de campo.

En la caracterización de los depósitos torrenciales se registran en términos generales 5 niveles de terrazas con temporalidades antiguas, subrecientes y recientes, estos últimos con una mayor incidencia a lo largo de la cuenca. De igual manera se identifican al menos 5 eventos torrenciales (E1, E2...E5), antes de la avenida torrencial del 2018, dónde a nivel estratigráfico este correspondería al evento 6 (E6); si bien este último evento coincide con la zonificación de amenazas de la cuenca realizada antes del mismo, generó una nueva configuración del terreno, tanto en las terrazas como en el cauce que no fue tomado en cuenta dentro del presente estudio, evidenciando el alto potencial erosivo y la dinámica cambiante de las llanuras aluviotorrenciales (Figura 9).

Los depósitos más antiguos de la cuenca están asociados al nivel 5 cartografiado, el cual presentan alturas variables de hasta 50 m con respecto al cauce principal de la quebrada Los Monos y a una distancia inferior a los 50 m del mismo. Se encuentra de manera puntual conformando franjas alargadas entre 100 m y 1.5 km hacia la margen izquierda de la quebrada. Mostrando morfologías más asociadas a lomas con laderas inclinadas y topes amplios, evidenciando la prolongada acción de procesos denudativos sobre ellos. A nivel sedimentológico predominan los bloques inferiores a 1 m embebidos en una matriz con un porcentaje de hasta 70% con respecto a la proporción de bloques, dónde predominan (especialmente para los bloques de tamaños mayores) las litologías relacionadas con el Batolito de Farallones.

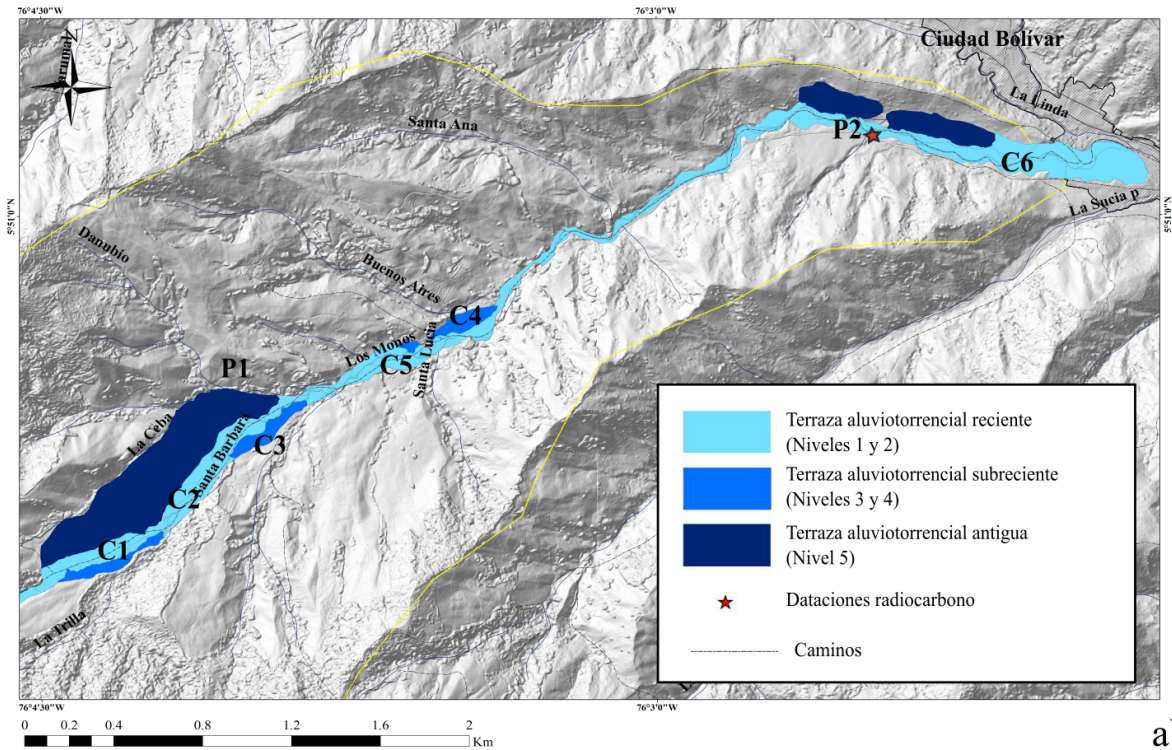
Los depósitos de carácter subreciente se encuentran en ambas márgenes de la cuenca, a lo largo de los niveles 3 y 4, con alturas inferiores a los 4 m con respecto al nivel base de la quebrada y con pendientes entre los 12 y 22°. Sobre este nivel se identificó un evento torrencial (E2), caracterizado

por la presencia de materiales clastosoportados y subredondeados con tamaños entre 100 y 300 m de longitud, sobre los cuáles es común la presencia de líquenes y pátinas de óxidos.

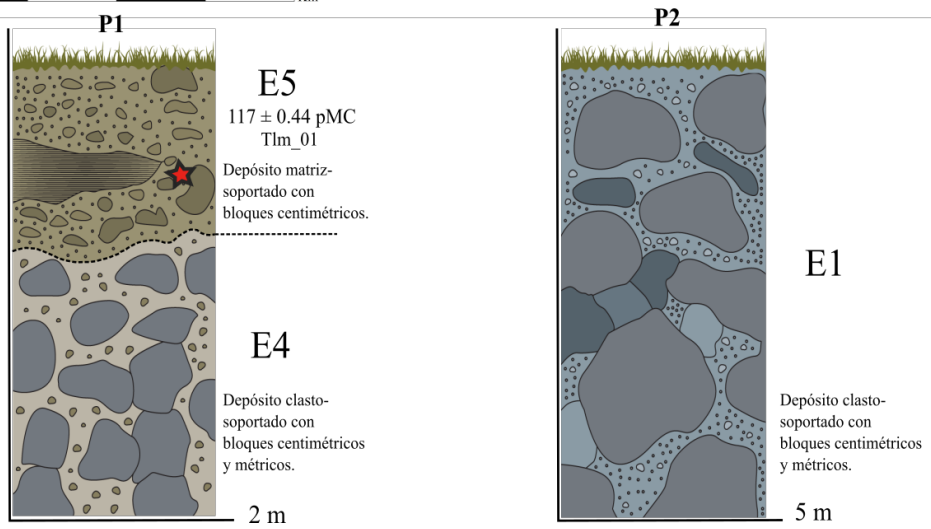
Los depósitos de carácter reciente están asociados a los niveles 1 y 2, además de los materiales de la creiente presentada en el 2018. Los cuáles muestran una continuidad importante a lo largo de la cuenca, y a nivel estratigráfico

están relacionados con los eventos de depositación más superficiales (E3, E4, E5 y E6). Aunque estos niveles pueden presentar líquenes y pátinas de óxidos sobre los bloques, muestran una morfología de pendientes continuas y suavizadas, con alturas menores a 2 m con respecto al cauce principal y tamaños promedio de 60 cm, por lo cual se asocian a los eventos bajo esta temporalidad.

DEPÓSITOS TORRENCIALES QUEBRADA LOS MONOS



a)



b)

Figura 9. a) Mapa geomorfológico de los depósitos torrenciales de la quebrada Los Monos. b) Perfiles estratigráficos levantados en distintos puntos de la cuenca.



Figura 10. a) y c) Características de los niveles de carácter reciente antes de la avenida torrencial del año 2018 en la quebrada Los Monos. b) y d) Efectos de la avenida torrencial (E6) en la cuenca, en los mismos puntos referenciados en las fotografías a) y b).

3.3.5 Cuenca de la Quebrada La Linda (Bolívar Arriba)

La cuenca de la quebrada Bolívar Arriba o La Linda, se encuentra en la vereda La Linda del municipio de Ciudad Bolívar. A nivel histórico se reportan crecientes menores asociados a los períodos de lluvia a lo largo del año. Desde el punto de vista geomorfológico, conforma una franja en sentido N10°W, dónde es posible la identificación de 4 niveles de terrazas y el mismo número de eventos torrenciales (E1, E2... E4) (Figura 11).

Los depósitos más antiguos de la cuenca están asociados al nivel 4 cartografiado, los cuáles se encuentran en la desembocadura de la quebrada con el río Bolívar hacia el casco urbano del municipio, dónde se presentan en una morfología de cono con una longitud máxima de 300 m. Presentan alturas de hasta 15 m y una distancia variable entre 20 y 150 m con respecto al cauce principal. A nivel sedimentológico muestran bloques de tamaños métricos a centimétricos con un área fuente asociada en su totalidad a las unidades metasedimentarias que afloran en el sector. Los depósitos de carácter subreciente se encuentran en ambas márgenes de la cuenca, hacia la parte alta y baja de la misma, presentan alturas de hasta 8 m con respecto al nivel base de la quebrada y pendientes promedio de 15°. Sobre este nivel se identificó un evento torrencial (E2), caracterizado por la presencia de materiales clastosoportados y subredondeados con tamaños entre 30 y 60 cm de diámetro, sobre los cuáles es común la presencia de líquenes y pátinas de óxidos.

Los depósitos de carácter reciente están asociados a los niveles 1 y 2, los cuáles conforman franjas estrechas (inferiores a los 20 m de ancho) hacia la parte media de la cuenca y se extienden hacia la parte baja de la misma, conformando terrazas de hasta 150 m de ancho. Estos materiales están asociados a los eventos de depositación más recientes (E3 y E4), dónde es común la intercalación de estos con al menos dos niveles de depósitos bien seleccionados y de materiales de granulometría más fina, por lo cual se infiere la intercalación de eventos torrenciales en la cuenca con fenómenos de menor magnitud y menor energía. Los depósitos torrenciales en este sector son de tipo clastosoportados, subredondeados a redondeados, con diámetros entre 30 y 60 cm (Figura 12).

3.3.3.3. Edad y correlación de los depósitos

A nivel histórico se reportan crecientes en la cuenca de menor magnitud asociadas en los registros consultados con fenómenos de inundación; sin embargo, en la cuenca se realizó una datación por radiocarbono en el nivel 2 en una profundidad de 1 m, asociado desde el punto de vista estratigráfico con el E3 de la cuenca, arrojando una edad de 140 ± 30 años antes del presente (Tba_01). Finalmente, según el análisis hidráulico realizado, se encontró que para alcanzar este nivel datado se deben presentar caudales de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, asociados a períodos de retorno de 110 años; mientras que para los depósitos cartografiados como subrecientes, se deben obtener caudales de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ y períodos de retorno de 415 años.

DEPÓSITOS TORRENCIALES QUEBRADA LA LINDA

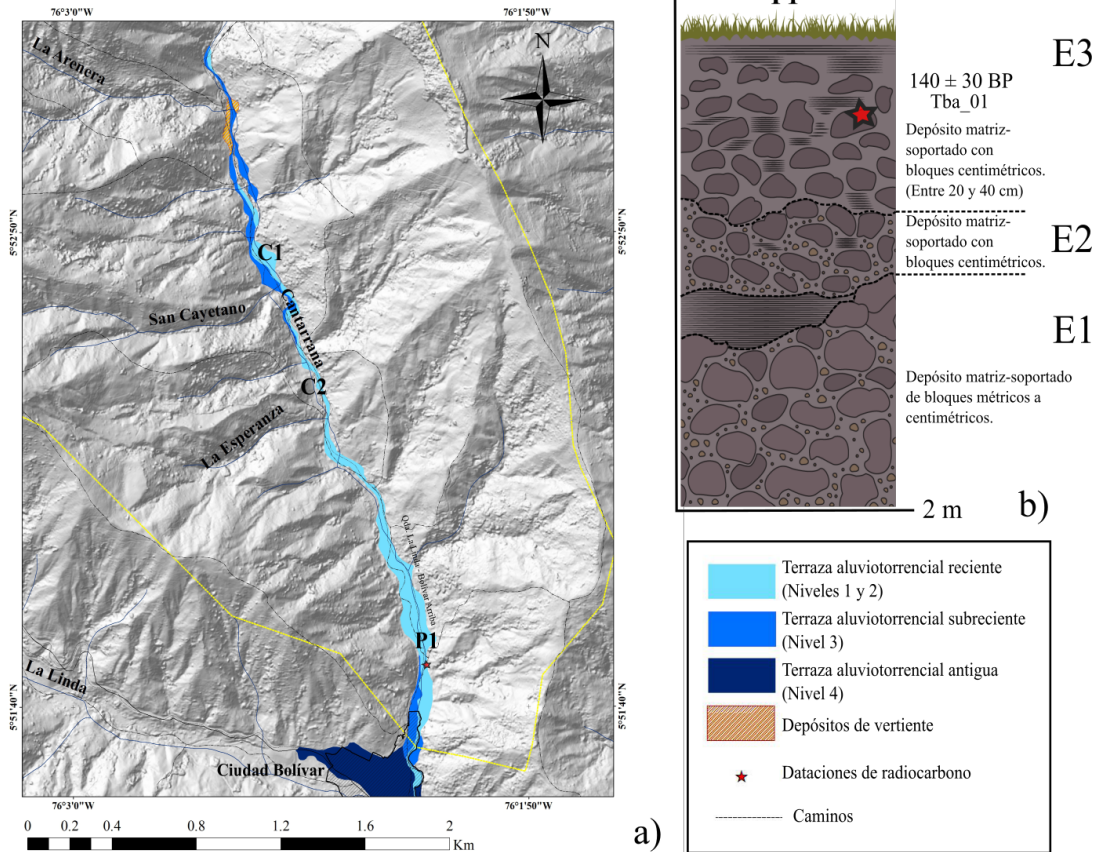


Figura 11. a) Mapa geomorfológico de los depósitos torrenciales de la quebrada La Linda. b) Perfil estratigráfico levantado en la parte baja de la cuenca.



Figura 12. a) y d) Características de los niveles de carácter reciente en la parte baja de la cuenca de la quebrada La Linda. b) y c) Terrazas torrenciales de menor extensión hacia la parte alta de la cuenca.

7 Discusión

Las cuencas analizadas presentan en general condiciones geológicas y geomorfológicas similares, además de un contexto hidrológico que permite asociarlas, toda vez que se encuentran separadas por menos de 50 km entre sí, sin embargo, presentan importantes diferencias entre su dinámica torrencial, por lo que es posible inferir que estas diferencias están marcadas en mayor medida por variables como la morfometría o las variaciones estructurales que se presentan en cada una de las cuencas, las cuáles pueden favorecer la depositación del flujo o el tránsito de este por determinados sectores de la cuenca y el canal.

Esta situación se evidencia de manera clara en la cuenca del Río Tapartó, dónde se muestra una estrecha relación entre las zonas con estructuras fotogeológicas y aquellas zonas con importantes procesos de depositación, los cuáles a su vez se relacionan con aquellas zonas en las cuáles a nivel histórico se han presentado mayores afectaciones. Es importante resaltar que esta cuenca presenta una mayor relación con las condiciones estructurales, dado que las direcciones de estas estructuras son casi perpendiculares al eje del cauce principal, mostrado una mayor incidencia en la distribución de los depósitos, a diferencia de lo encontrado en las quebradas Los Monos y La Arboleda, cuyos lineamientos se encuentran paralelos al eje del cauce principal y no exhiben una relación o afectación dentro de la distribución de los depósitos torrenciales en las cuencas, más allá de favorecer la morfología alineada de los mismos y mostrar una predominancia del flujo de los materiales por encima de los procesos de depositación.

Desde el punto de vista geomorfológico y sedimentológico, fue posible la determinación de una temporalidad relativa de los depósitos y la relación de estos con un nivel de susceptibilidad por avenidas torrenciales, mostrando que las cuencas de los Ríos Farallones, Tapartó y La Arboleda presentan un sistema torrencial más antiguo y desarrollado, marcado por la presencia de los tres estadios de depósitos y las edades más antiguas; mientras que las cuencas de las quebradas Los Monos y La Linda muestran un menor desarrollo de sistemas de depósitos torrenciales y una predominancia de depósitos de tipo reciente y subreciente, lo cual puede ser soportado por las dataciones realizadas, por lo cual, aún es necesario el reconocimiento de aquellas variables que pueden incidir en un mayor o menor desarrollo de estos sistemas de depósitos, dado que desde el punto morfométrico no presentan un patrón definido y la información hidrológica disponible no permite reconocer diferencias importantes entre los niveles de precipitación de las cuencas, no sólo en su distribución espacial sino también en sus variaciones en los últimos años.

Aquellos depósitos asociados a una temporalidad antigua, muestran en general un mayor nivel de incisión, además de alturas de hasta 20 m con respecto al cauce principal, como es el caso del río Tapartó en su desembocadura (Sector El Bosque) y hacia la parte alta de la cuenca (Sectores La Selva y La Rochela), mostrando (al

igual que los depósitos antiguos de la quebrada La Arboleda) poca continuidad a lo largo de la cuenca, dando una apariencia fragmentada. Los bloques de estos depósitos muestran una remoción de la matriz y la presencia de líquenes y coloraciones más oscuras, asociadas a una mayor exposición en superficie desde su depositación. En general estos materiales pueden pertenecer a uno o varios eventos torrenciales y a nivel superficial sus características suelen ser homogéneas, por lo cual la diferenciación de una estratigrafía de eventos es posible sólo a partir de la visualización de un corte o la exploración en profundidad de estos materiales. Una característica importante de los depósitos más antiguos de la cuenca del río Farallones es su ubicación hacia la parte media de la cuenca y una continuidad casi total a lo largo de la misma, además de la relación entre las edades encontradas en el mismo depósito, lo cual sugiere un mayor evento de depositación que generó no sólo un importante flujo de materiales sino también una preservación relevante de los mismos. Finalmente, desde el análisis de las litologías encontradas en estos bloques hay una predominancia de casi un 95% de litologías ígneas (Batolito de Farallones) con respecto a las unidades metasedimentarias encontradas.

Los depósitos asociados a una temporalidad reciente, están caracterizados no sólo por su cercanía al cauce principal, sino también por la presencia de una buena selección de los bloques y tamaños promedio de 40 cm, con una mezcla entre los materiales de origen ígneo y aquellos de origen metasedimentario. Estos depósitos se encuentran al interior de las manchas de inundación con un Tr de 100 años y del caudal Tr100 mayorado en un 40% como se expuso anteriormente. Estos materiales muestran un mayor predominio en las cuencas de las quebradas Los Monos, La Linda y La Arboleda, cuyas edades por ^{14}C no sobrepasan los 1200 años BP, además de presentar en algunos casos edades posteriores a 1950, relacionadas con la presencia de carbono moderno (pMC). Si bien la temporalidad obtenida es importante para la estimación de aquellos depósitos recientes, es necesaria la comparación de estos con las observaciones geomorfológicas realizadas, ya que tomando como ejemplo la cuenca del río Tapartó, no todos los depósitos encontrados en esta temporalidad presentan las mismas condiciones geomorfológicas y por tanto la susceptibilidad por avenidas torrenciales suele variar. Hacia la vereda La Rochela en la parte alta de esta cuenca es posible reconocer depósitos torrenciales recientes con edades ^{14}C entre 100 y 870 años BP, pasando por edades de 380 y 310 años BP, además del reporte de eventos a nivel histórico; estas edades se enmarcan desde el análisis geomorfológico realizado en sistemas recientes teniendo en cuenta su relación con los demás depósitos; mientras que hacia la parte media de la cuenca es posible reconocer un depósito de ^{14}C cal de 610 años BP, el cual debido a su posición estratigráfica se puede asociar en mayor medida a un sistema de tipo subreciente; por lo cual se sugiere que estas dataciones deben ser analizadas a la luz de las condiciones particulares en cada una de las cuencas de estudio, sin que estos márgenes de temporalidad (antigua, subreciente y reciente) puedan

establecerse como únicos para otras cuencas del país.

Aunque desde el punto de vista de la determinación de la susceptibilidad y la amenaza por avenidas torrenciales, a partir de los análisis geomorfológicos y las dataciones realizadas, es posible realizar una asociación entre aquellas categorías de amenaza alta con aquellos depósitos considerados recientes y de amenaza baja con depósitos considerados antiguos, aún se hace necesaria una discusión frente a la descripción y la categorización de los depósitos considerados de carácter subreciente, ya que conforman una ventana de tiempo importante dentro de los depósitos datados (entre 1200 y 2000 BP años) y se encuentran asociados con aquellos eventos extremos que aún no han sido registrados a nivel histórico pero que pueden dar cuenta del potencial de la cuenca con mayores magnitudes y menores períodos de recurrencia. Estos depósitos desde el punto de vista geomorfológico presentan numerosas variaciones, no sólo en el tamaño de los bloques encontrados sino también en sus características superficiales, lo cual permite inferir que esta categoría requiere una mayor diferenciación o que dentro de este margen de tiempo se presentaron cambios drásticos que permiten el reconocimiento de depósitos subrecientes más antiguos y aquellos que dentro de esta misma categoría están asociados a dinámicas más recientes pero menos recurrentes.

Es importante considerar las limitaciones de las dataciones, especialmente en su aplicación en materiales torrenciales, debido no sólo a la incidencia de los procesos erosivos, sino también a la presencia de edades heredadas en los depósitos (p.e. Dunai, 2000). La herencia se relaciona con aquellas concentraciones de un TCN específico en la superficie de la roca, asociada a procesos geológicos anteriores a la ocurrencia del proceso de interés (p.e. Heyman et al., 2010; Ciner et al., 2017), en este caso, se relaciona con aquellas edades anteriores a la ocurrencia de la avenida torrencial, procedentes del retrabajamiento de las terrazas anteriores o procedentes de las vertientes que conforman las cuencas, generando una sobreestimación de las edades en el caso de los isótopos cosmogénicos como el ^{10}Be . El caso contrario ocurre cuando los procesos de erosión actúan sobre las superficies a datar, generando una estimación de las edades por debajo de la ocurrencia real del proceso. Finalmente, el retrabajamiento de estos materiales puede evidenciarse en la estimación de edades por radiocarbono más jóvenes, debido a la mezcla de sedimentos orgánicos u organismos más jóvenes que alteren la proporción de carbono del material muestreado.

Uno de los aspectos analizados además de las edades y los elementos morfológicos de los depósitos, está asociado con el análisis hidráulico de los cauces. Este análisis tuvo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio hidrológico y el estimativo de caudal por metodología POMCA (Caudal con periodo de retorno de 100 mayorado un 40% para tener en cuenta crecientes con empalizadas y aporte excesivo de sedimentos) y la simulación hidráulica de los cauces de interés. Se realizó un comparativo con las zonas determinadas en la geomorfología como amenaza por inundación alta y media, correspondientes a la formación llanuras de

inundación y terrazas con material aluvial. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una comparación con el objetivo de verificar el caudal para el cual el modelo hidráulico logra inundar las zonas de amenaza media y alta, y asociarlo a un periodo de retorno a partir de una ecuación de regresión para los caudales estimados de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. De esta forma se evidenció que, para inundar las terrazas categorizadas como zonas de amenaza Alta y media, se requieren de caudales, que en el mejor de los casos corresponden a periodo de retorno de 3000 años (río Tapartó).

Para estos análisis se tuvo en cuenta los parámetros morfométricos de las cuencas, donde se encontró que hay una importante variación entre las áreas de las mismas, con rangos entre 13.58 y 121.6 km², mostrando que al menos para este sector de la Cordillera Occidental colombiana, las cuencas con áreas superiores a los 120 km² presentan importantes evidencias de torrencialidad, coincidiendo con el rango propuesto por autores como (Riedl y Zachar, 1984) que va hasta los 150 km², por lo cual aún es importante definir para las cuencas bajo condiciones tropicales este límite que marca el comportamiento torrencial de aquel de tipo aluvial basado en el área de la cuenca, teniendo en cuenta además, que la cuenca del río San Juan, de la cual son tributarios todos estos cauces, supera los 200 km².

Los parámetros morfológicos obtenidos permiten reconocer que las cuencas de las quebradas Los Monos, La Linda y La Arboleda están relacionadas con una dinámica similar en términos de pendientes, conforman una microcuenca muy pequeña, con una morfología de tipo oval redonda según IDEAM (2010) y Olivas et al., (2007-2008) cuya diferencia estaría en la energía potencial levemente mayor que presenta la quebrada La Arboleda debido a mayores diferencias de pendiente.

La cuenca del río Farallones presenta un comportamiento similar a las cuencas descritas anteriormente, cuya diferencia radica en la longitud del cauce principal y una mayor extensión de depósitos que las demás cuencas estudiadas en este trabajo; por lo cual es importante ahondar en trabajos futuros sobre los elementos que promueven o promovieron una mayor depositación y cantidad de materiales torrenciales en una cuenca con una morfología muy similar a las cuencas descritas anteriormente que presentan un porcentaje mucho menor de depósitos torrenciales. Estos depósitos se encontraban asociados de manera preliminar a una influencia de tipo glacial debido a las evidencias geomorfológicas de glacial heredado reportadas en este sector de los Farallones del Citará por CORANTIOQUIA (1997), sin embargo, estas no pudieron ser corroboradas durante el trabajo de campo realizado en la parte alta del Cerro San Nicolás con una altura de 4021 m.s.n.m. Además, las edades promedio de 6.04 Ka obtenidas para distintos bloques dentro del depósito más antiguo, descartan una influencia glacial marcada para los depósitos con estas edades encontrados en la cuenca. Por lo cual aún se debe establecer la relación de la misma con los procesos glaciares reportados, la temporalidad de los eventos glaciares y la posibilidad de un retrabajamiento o superposición de

procesos torrenciales relacionados con una dinámica altamente erosiva y más reciente, por encima de los depósitos con influencia glaciár de carácter más antiguo.

Además, se considera que dentro de los resultados obtenidos, la cuenca del río Tapartó presenta un comportamiento diferente a las cuencas descritas anteriormente, no sólo por presentar mayores extensiones y una morfología más alargada, sino también por las evidencias que indican un mayor control litológico y estructural de su cauce especialmente en la parte alta, conformando una serie de descansos que coinciden con una depositación no sólo mayor sino de mayor energía, la cual se debe tener en cuenta dentro del análisis de la amenaza en este sector, mostrando que el control estructural no sólo afecta el equilibrio del perfil del río como tal, sino que puede modificar de manera drástica las condiciones hidráulicas del flujo torrencial, aumentando la complejidad de su comportamiento a lo largo de todo el cauce.

Finalmente, un aspecto relevante desde el punto de vista morfométrico, se relaciona con la aplicación del índice de rugosidad de Melton, que relaciona la mayor y la menor altura de la cuenca con su área, dónde según Marchi et al., (1993) aquellas cuencas con un índice de Melton superior a 0.5 están relacionadas con una actividad torrencial; mostrando que según lo anterior las cuencas de los ríos Tapartó (con valores de 0.49), La Linda (0.23), Los Monos (0.32) y Farallones (0.35) no presentan un comportamiento torrencial; el cuál sólo estaría, bajo este criterio, restringido a la cuenca de la quebrada La Arboleda (0.53). Teniendo en cuenta lo anterior, se aplicaron los parámetros propuestos por Wildford et al., (2004) para la clasificación de los distintos flujos torrenciales a partir de parámetros morfométricos (*Tabla 4*), obteniendo los resultados para las cuencas que conforman la zona de estudio (*Figura 2*).

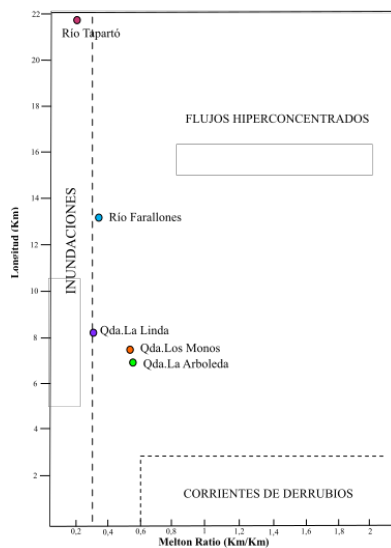


Figura 13. Representación de las diferentes clases de flujos torrenciales propuestas por Wilford et al., (2004) y su relación con las cuencas que componen la zona de estudio.

Estos parámetros difieren con las consideraciones

asociadas a las cuencas torrenciales a partir del índice de rugosidad de Melton, mostrando que las cuencas de las quebradas Los Monos y La Arboleda están relacionadas con la ocurrencia de flujos hiperconcentrados y las cuencas de la quebrada La Linda y el río Farallones se encuentran en el límite de flujos asociados a inundaciones, al cual, según esta clasificación pertenecería el río Tapartó, por lo cual aún se deben estimar si las variaciones de estos índices (que no fueron diseñados bajo comportamientos torrenciales en estas latitudes) obedecen a factores relacionados con la escala de la información o a la necesidad del análisis de los mismos bajo la modificación de estos parámetros preestablecidos.

8 Conclusiones

Nuestras observaciones geomorfológicas y geocronológicas apoyan la existencia de tres etapas dentro de la dinámica torrencial de las cuencas relacionada con estos sistemas de depósitos: (1) “depósitos antiguos” con edades ^{14}C superiores a los 2000 BP años y edades de ^{10}Be entre 6.22 Ka y 8 Ka. (Sin publicar), asociadas a un nivel de amenaza bajo; (2) “depósitos sub-recientes” con edades ^{14}C comprendidas entre 1200 y 2000 BP años, relacionadas con una zonificación de amenaza media por avenidas torrenciales y (3) “depósitos recientes” cuyas edades ^{14}C no exceden los 1200 BP años y se encuentran asociados al nivel de amenaza más alto por este fenómeno. Finalmente, aunque las cuencas exhiben depósitos torrenciales asociados a eventos de magnitudes importantes, los análisis realizados sugieren una disminución de la magnitud de los mismos en los últimos 1000 años.

Si bien estos rangos permiten hacer una correlación y una diferenciación importante dentro de las dinámicas de las cuencas analizadas, es posible encontrar diferencias en los límites de los mismos en cada cuenca, debido a las relaciones geomorfológicas y de trabajo de campo. La cuenca del río Tapartó muestra una dinámica de flujos de escombros realmente compleja y presenta varios eventos peligrosos históricos y relevantes, sin embargo, en relación con la cuenca de Farallones, tiene menos extensión y desarrollo. Sugiriendo que la cuenca de Farallones es más vieja o tiene una dinámica de flujo de escombros con un agente externo importante que favorece la ocurrencia de estos depósitos más antiguos; mientras que las cuencas de las quebradas La Arboleda, Los Monos y La Linda muestran la intercalación de episodios de inundaciones rápidas con eventos torrenciales de carácter reciente. Las edades permitieron establecer la calibración entre las características geomorfológicas de los depósitos con una temporalidad relativa, conformando la base de una zonificación de amenaza de tipo geomorfológico por este fenómeno, la cual puede ser aplicada en distintas regiones del país.

Desde el punto de vista morfológico, las cuencas de las quebradas La Linda, La Arboleda y Los Monos conforman cauces cortos y microcuencas muy pequeñas, dónde sólo la quebrada La Arboleda presentaría un comportamiento torrencial según el índice de rugosidad de Melton y junto con la quebrada Los Monos presentaría un comportamiento de

flujos hiperconcentrados según los parámetros expuestos por Wilford et al.,(2004); sin embargo, los reportes históricos y las evidencias geomorfológicas permiten concluir que en estas cuenca con algunos episodios de lluvias extremos, se puede generar un potencial de arrastre importante que puede ser catalogado como un peligro latente para las poblaciones aledañas a estos cauces, por lo cual se deben hacer análisis futuros y comparar con los datos de lluvia a nivel histórico aquellos umbrales que detonarían estos procesos en cuencas con áreas menores a 20 km² de cauces cortos, formas ovaladas y por tanto un tiempo de concentración mucho menor, lo que se traduce en una mayor capacidad de respuesta de las poblaciones en términos de gestión del riesgo.

Desde el punto de vista hidráulico, se estableció que para las cuencas analizadas se debe mayorar el caudal en un el mejor de los casos 1500%, para alcanzar los niveles de las terrazas de amenaza media y alta. y la comparación general

de estos con otras cuencas de características torrenciales en el sector, se puede concluir que la dinámica torrencial de esta zona del departamento tiene un potencial de daño mucho mayor en relación con la magnitud de los eventos registrados a nivel histórico, ya que estos se registran en cuencas muy pequeñas con evidencias de depósitos menores en relación con los presentados en otras zonas, por lo cual se debe analizar el fenómeno torrencial a la luz de una ventana de tiempo desde el Holoceno tardío y de un alcance que incluya toda la cuenca con este fenómeno. La comparación de las edades y las condiciones estratigráficas y geomorfológicas de las cuencas estudiadas, permite inferir la presencia de sistemas altamente erosivos, dónde son usuales los fenómenos de retrabajamiento y superposición de los sistemas de depósitos.

Tabla 3. Parámetros propuestos para la clasificación de flujos torrenciales a partir de parámetros morfométricos (Wildford et al., 2004).

Variables	Límites de clase		
	Inundaciones (I)	Flujos hiperconcentrados (FH)	Corrientes de derrubios (CD)
R. Melton vs Longitud	R. Melton < 0,3	R. Melton 0,3 – 0,6	Relación de Melton > 0,6 y Longitud < 2,7
		R. Melton > 0,6 y Longitud > 2,7	
R. Melton vs R. Relieve	R. Melton < 0,3	R. Melton 0,3 - 0,77	Relación de Melton > 0,77 y Relación de Relieve > 0,42
		R. Melton > 0,77 y R. Relieve < 0,42	
R. Relieve vs Longitud	R. Relieve < 0,15	R. Relieve 0,15 – 0,35	Relación de Relieve > 0,35 y Longitud < 2,7
		R. Relieve > 0,35 y Longitud > 2,7	

9. Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto fue posible gracias al apoyo del Departamento de Ciencia Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS en el marco del contrato 19628 de la Convocatoria para proyectos de investigación en geociencias 710-2015 y al apoyo de la Universidad EAFIT por medio del grupo de Investigación en Geología Ambiental e Ingeniería Sísmica y al programa de Maestría en Ciencias de La Tierra.

Agradecemos profundamente a todas las personas y colegas que han mostrado su interés en el proyecto y han brindado importantes aportes para la consecución del mismo. Adicionalmente, extendemos nuestra gratitud a los habitantes de las cuencas visitadas, por su hospitalidad y su apoyo durante el trabajo de campo. Finalmente agradecemos a los investigadores y jurados externos que le han aportado desde su experiencia a la discusión de los resultados y alcances del proyecto, además de la elaboración del manuscrito.

10 Bibliografía

- Aitken, M. (1990). Radiocarbon dating: Alluvial fan/debris cone evolution and hazards, in *Dating Torrential Processes on Fans and Cones—Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment*, Adv. in Global Change Res. In M. S.-M. M. Schneuwly-Bollschweiler (Ed.), *Science-Based Dating in Archaeology*. Dordrecht: Springer.
- Bloom, A. (1991). *Geomorphology: A systematic analysis of late Cenozoic landforms*. New Jersey: Prentice Hall.
- Caballero, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales: Una amenaza potencial en el Valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 6.
- Caballero, J. H., & Coupe, F. (2009). *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión*. Universidad Nacional de Colombia, Municipio de Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Municipio de Envigado y CORANTIOQUIA, Medellín.
- Calvache, M., Viseras, C., & Fernández, J. (1997). Controls on fan development evidence from fan morphometry and sedimentology; Sierra Nevada, SE Spain. *Geomorphology*, 21(1), 69-84.
- Calle, B., & Salinas, R. (1986). *Geología y Geoquímica de la Plancha 165 Carmen de Atrato. Escala 1:100.000*. Informe 1967, INGEOMINAS, Bogotá.
- Calle, B., González, H., De La Peña, R., Escorce, B., & Durango, J. (1980). *Mapa geológico de la Plancha 186 Riosucio. Escala 1:100.000*. INGEOMINAS, Bogotá.
- Castro, J. A. (2007, Agosto). Deslizamientos y Avenidas Torrenciales. *Cosmos*, 41, 3.

- Ciner, A., Sarıkaya, M., & Yıldırım, C. (2017). Misleading old age on a young landform? The dilemma of cosmogenic inheritance in surface exposure dating: Moraines vs. rock glaciers. *Quaternary Geochronology*(42).
- CORANTIOQUIA; Universidad Nacional de Colombia; Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química INGEOMINAS . (2002). *Mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000*. Informe Final, Medellín.
- CORANTIOQUIA; UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. (1997). *Reserva natural "Farallones del Citará" - estudios biofísicos y socioeconómicos preliminares- (Suroeste Antioqueño)*. Informe Técnico, Tomo II.
- Costa, J. (1988). Rheologic, Geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flow . (V. R. Baker, Ed.) *Flood Geomorphology*, 113-122.
- Cousot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40, 209-227.
- Chiverell, R., & Jakob, M. (2012). Dating past events on fans and cones - AnIntroduction. In S. M.-M. Schneuwly-Bollschweiler M (Ed.), *Dating torrential processes on fans and cones – methods and their application for hazard and risk assessment. Advances in Global Change Research*. Dordrecht/Heidelberg/London/New York: Springer.
- Davis, R., & Schaeffer, O. A. (1955). Chlorine-36 in Nature. *Annals of the New York Academy of Science*, 62, 107-121.
- Díaz-Onofre, O. (2008, Enero 01). *Fundamentos de la Hidráulica de Huaycos*. Retrieved from es.geocities.com/donpedro10/huayco/huaycosi.pdf
- Dunai, T. J. (2000). Scaling factors for production rates of in situ produced cosmogenic nuclides: a critical reevaluation. *Earth and Planetary Science Letters*, 176(1), 157-169.
- Durán, J., Elízaga, E., Garzón, G., Lamas, J., Lendínez, A., & Prieto, C. (1985). *Geología y prevención de daños por inundaciones*. Instituto Geológico Minero de España.
- Gómez-Villar, A. (1995). *Dinámica geomorfológica y conos aluviales en pequeñas cuencas torrenciales de montaña*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Zaragoza.
- González, J., & Hermelin, M. (2004). *Aspectos Geomorfológicos de la Avenida Torrencial del 31 de Enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados*. Universidad EAFIT, Medellín.
- Gosse, J., & Phillips, F. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1475- 1560.
- Gravelius, H. (1914). Morphometry of Drainage Bassins. *Elsevier*.
- Guzmán, R., Vassallo, F., Audemard, J., Mugnier, J., Oropeza, S., Yépez, J., . . . S, C. J. (2013). ¹⁰Be dating of river terraces of Santo Domingo river, on Southeastern flank of the Mérida Andes, Venezuela: tectonic and climatic implications. *Earth Sciences*, 85-96 .
- Hermelin, M., & Toro, G. (1990). Stratigraphic of volcanic ashes from Southern Antioquia, Colombia: Possible climatic implications. *International Symposium on Quaternary Climates of South America, International Correlation Program UNESCO*, 8, pp. 201-217. Rotterdam.
- Heyman, J., Stroeven, A., Harbor, J., & Caffee, M. (2010). Boulder cosmogenic exposure ages as constraints for glacial chronologies.
- Ivy-Ochs, S., Kober, F., Alfimov, V., Kubik, P., & Synal, H. (2007). Cosmogenic ¹⁰Be, ²¹Ne, and ³⁶Cl in sanidine and quartz from Chilean ignimbrites. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 588-594.
- Jomelli, V., Favier, V., Vuille, M., Braucher, R., Martin, L., Blard, P.-H., . . . Otto-Bliesner, B. (2014). A major advance of tropical Andean glaciers during the Antarctic coldreversal. *Nature*.
- Kaitna, R., & Hübl, J. (2012). *Dating Torrential Processes on Fans and Cones: Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment (Advances in Global Change Research) ER - (Vol. 47)*. Vienna: Springer.
- Kostaschuk, R., MacDonald, M., & Putnam, P. (1986). Depositional process and alluvial fan-drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11(5), 471-484.
- Kubik, P., Korschinek, G., & Nolte, E. (1984). Accelerator mass-spectrometry with completely stripped ³⁶Cl Ions at the Munich postaccelerator. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 51-59.
- Lal, D. (1991). Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in-situ nuclide production rates and erosion models. In *Earth and Planetary Science Letters* (pp. 424-439).
- Lavigne, F., & Suba, H. (2004). Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 61, 41–58.
- Libby, W. (1970). Ruminations on radiocarbon dating. In I. Olsson (Ed.), *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology* (pp. 629–640). New York: Stockholm: Almqvist & Wiksell.
- Marchi, L., Pasuto, A., & R, T. P. (1993). Flowprocesses on alluvial fans in the EasternItalian Alps. *Z für Geomorphologie*(37), 447–458.
- Medina, J. (1991). Fenómenos Geodinámicos: estudio y medidas de tratamiento. *Tecnología Intermedia*, 87.
- Melton, M. A. (1957). *An analysis of the relation among elements of climate, surface properties and geomorphology*. Columbia University, Department of Geology. New York: Tech.
- Muñoz, P., Gorin, G., Parra, L., Velásquez, C., Lemus, D., Monsalve-M, C., & Jojoa, M. (2017). Holocene climatic variations in the Western Cordillera of Colombia: A multiproxy high-resolution record unravels the dual influence of ENSO and ITCZ. *Quaternary Science Reviews*, 155, 159-178.
- Naranjo, J. (1993). *Informe técnico río Tapartó*. FOPREVE, Medellín.
- Parra, E. (1998). *Manual Avenidas Torrenciales*. Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. Bogotá: INGEOMINAS.
- Parra, E., Viana, R., & González, M. (1995). *Metodología para la evaluación de la torrencialidad caso oriente antioqueño*. Medellín.
- Phillips, F., Stone, W., & Fabryka-Martin, J. (2001). An improved approach to calculating low-energy cosmic-ray neutron fluxes near the land/atmosphere interface. *Chemical Geology*, 689-701.
- Piedrahíta, I. (1996). Estudio preliminar por eventos torrenciales en la vertiente occidental del Río San Juan, suroeste antioqueño. Trabajo de grado para el título de Geólogo . 127. Medellín: Universidad EAFIT.
- Poveda, G., & Mesa, O. (2000). *Geo-phys. Lett.* 27, 1675-1678.

- Ramsey, B. (2009). Dealing with Outliers and Offsets in Radiocarbon Dating. *Radiocarbon*(51), 1023-1045.
- Reimer, P., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J., Blackwell, P., Ramsey, C., & Van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*(55(4)), 1869-1887.
- Rendón, G. (1997). La Hidráulica Torrencial. *DYNA*, 22, 23-31.
- Riedl, O., & Zachar, D. (1984). Forest amelioration. *Elsevier*, 623.
- Rueda, O., & Poveda, G. (2006). Variabilidad espacial y temporal del chorro del Chocó y su efecto en la hidroclimatología del Pacífico Colombiano. *Meteorología Colombiana*, 10, 132-145.
- Snyder, F. (1938). Syntethic Unit Graphs. *Transaction of the American Geophysical Union*.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, SCS. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55, Departamento de Agricultura de EEUUA, Washington D.C.
- Stensrud, D. (1996). Importance of low-level jets to climate: A review. *Climate*, 9, 1698-1711.
- Thouret, J., Cantagrel, J., Salinas, R., & Murcia, A. (1990). Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 225-251.
- Vásquez, G. (1993). El problema constante de las cuencas torrenciales, a propósito del desastre del río Tapartó (Ant.), 26/4/1993. *Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 5.
- Velásquez, E., & Mejía, O. (1991). *Procesos y depósitos asociados al aguacero de septiembre de 21 de 1990 en el área de San Carlos - Antioquia*. . Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Facultad de Minas, Medellín.
- Wilford, D., Sakals, M., Innes, J., Sidle, R., & Bergerud, W. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and floodhazard through watershed morphometrics. *Landslides*(1), 61–66.
- Williams, J., & Hann, R. (1973). HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resources*, 8, 79-85.
- Yokoyama, Y., Caffee, M., Southon, J., & Nishiizumi, K. (2004). Measurements of in situ produced C-14 in terrestrial rocks. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 253-258.