

**CARACTERIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LA QUEBRADA MINITAS EN EL SECTOR
COMPRENDIDO ENTRE LA CONSTRUCCIÓN TIERRA VIVA Y EL BARRIO LA FINCA Y SU
PROBABLE RELACIÓN CON AVENIDAS TORRENCIALES.**

JENNY ALEJANDRA ALZATE MURILLO

DANIELA CUARTAS ARISTIZÁBAL

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES

2021

**CARACTERIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LA QUEBRADA MINITAS EN EL SECTOR COMPENDIDO
ENTRE LA CONSTRUCCIÓN TIERRA VIVA Y EL BARRIO LA FINCA Y SU PROBABLE RELACIÓN CON
LAS
AVENIDAS TORRENCIALES.**

JENNY ALEJANDRA ALZATE MURILLO

DANIELA CUARTAS ARISTIZÁBAL

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GEÓLOGO

DIRECTOR:

Ph. D CARLOS ALBERTO GUZMÁN LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES

**2021
ACEPTACIÓN**

Carlos Alberto Guzmán López, profesor del Departamento de Ciencias Geológicas adscrito a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Caldas.

CERTIFICA:

Que JENNY ALEJANDRA ALZATE MURILLO y DANIELA CUARTAS ARISTIZÁBAL,

han realizado en el Departamento de Ciencias Geológicas adscrito a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Caldas y bajo su supervisión, el trabajo denominado:

CARACTERIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LA QUEBRADA MINITAS EN EL SECTOR COMPRENDIDO ENTRE LA CONSTRUCCIÓN TIERRA VIVA - BARRIO LA FINCA Y SU PROBABLE RELACIÓN CON LAS AVENIDAS TORRENCIALES.



Carlos Alberto Guzmán López

Manizales, junio 2021

Daniela Cuartas Aristizábal.

Dedicatoria

Jenny Alejandra

*A mi familia por el apoyo permanente, comprensión
y amor en todo momento.*

Daniela

*A mis padres por siempre estar ahí
en cada momento difícil y
ayudarme a superarlo.*

Agradecimientos

Principalmente a Dios que nos ha permitido llegar hasta donde estamos, que nos ha llenado de bendiciones para culminar esta ardua carrera.

A nuestras familias por siempre estar con nosotras apoyándonos y brindándonos los mejores consejos para llegar así, a ser unas grandes profesionales.

Al profesor Carlos Alberto Guzmán, por su gran apoyo en esta etapa final de nuestra carrera, por su paciencia y disponibilidad durante este proceso.

A mis compañeros que durante toda la carrera estuvieron apoyándome y dándome fuerzas para seguir y nunca desfallecer.

A Rubiel y Alba por ser el motor en toda la carrera y por estar siempre ahí; a Manuela por ser mi inspiración para ser mejor, porque sé que soy su ejemplo.

A Mateo por enseñarme y abrir mis ojos al futuro, con su aporte en mi vida seré una gran profesional.

Manuela, Camila y Tatiana sin ustedes no habría tenido la fuerza para culminar.

A mis padres por su paciencia, motivación y dedicación.

A mis amigos, Alejandro y Daniela por siempre estar dispuestos ayudarme y acompañarme. A mi esposo por su acompañamiento permanente y siempre darme el valor para seguir.

Tabla de contenido

1.	Resumen	12
2.	Introducción.....	15
3.	Justificación	16
4.	Objetivos	17
4.1.	Objetivo general	17
4.2.	Objetivos específicos	17
5.	Localización	14
6.	Metodología	15
6.1.	Revisión bibliográfica.....	15
6.2.	Trabajo de campo.....	15
6.3.	Trabajo de laboratorio.....	16
6.4.	Trabajo de oficina	18
	21
7.	Meteorología.....	21
8.	Marco Geológico	24
8.1.	Unidades litoestratigráficas.....	24
8.1.1	Complejo Cajamarca.....	24
8.1.2	Complejo Quebradagrande	25
8.1.3	Formación Manizales.....	25
8.1.4	Formación Casabianca.....	26
8.1.5	Lavas de Lusitania.....	26
8.1.6	Depósitos de caída piroclástica (Qcp)	26
8.2.	Geología estructural.....	26
9.	Avenidas torrenciales	28
10.	Estratigrafía general de la zona.....	33
10.1.	Unidad A	36
10.2.	Unidad B	37

10.3. Unidad C	38
11. Análisis Facial.....	40
11.1. Facies Gmm1, gravas masivas matriz-soportadas con tamaño guijo a guijarro	40
11.2. Facies Gmm2, Gravas masivas matriz-soportadas de tamaño guijo a guijarro con imbricación.....	41
11.3. Facies Gcm1, Gravas masivas clasto soportadas de tamaño guijos a guijarros.....	42
11.4. Facies Gcm2, Gravas masivas clasto-soportadas con tamaño de guijos a bloques (tamaño máximo).	44
11.1. Facies Gcm3, Gravas masivas clasto-soportadas con tamaño bloque.....	45
11.1. Facies Gt, Gravas con Estratificación inclinada festoneada	46
11.1. Facies Sh, Arena con laminación paralela	47
12. Análisis granulométrico.....	49
12.1. Conteo de clastos en afloramiento	49
12.2. Tamizado por vía seca	50
12.3. Histograma de frecuencias.....	51
12.4. Curva de frecuencia acumulada en escala de semiprobabilidades.....	52
12.5. Parámetros estadísticos granulométricos.....	54
13. Edad relativa.....	57
14. Discusión y evaluación de la torrencialidad	66
15. Conclusiones.....	69
Bibliografía.....	71
Anexos	76

10

10

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio. A. Localización de Colombia y departamento de Caldas. B. Departamento de Caldas, resaltando el municipio de Manizales. C. Municipio de Manizales delimitando la zona urbana. D. Área de estudio donde se resaltan las estaciones de campo. Tomada de SAS Planet.	
Figura 2 Malla de puntos empleada en el conteo de clastos tamaño grava en el campo.	
Figura 3 Ro-Tap, herramienta donde que agitan los tamices y se separan los granos de la muestra de acuerdo a su tamaño.	17
Figura 4 Balanza, utilizada para pesar la muestra tomada de cada una de las estaciones.	
Figura 5 Lupa binocular en la que se realiza el conteo de granos para definir composición, redondez y	

esfericidad de los granos.	18
Figura 6 Precipitación mensual de la cuenca quebrada Olivares en el año 2017 (Sánchez et al., 2018).	22
Figura 7 Resumen de la precipitación diaria anual de la estación hidrometeorológica Quebrada Olivares- El Popal, (SIMAC, 2013).	23
Figura 8 Mapa geológico de Manizales. Tomado de González (1990).	24
Figura 9 Vistas de antes y después de la avenida torrencial que afectó a Mocoa, en 2017. La parte superior de la fotografía muestra cómo era la ciudad antes del evento; en la parte inferior imagen inferior, se puede apreciar la pérdida de la cubierta vegetal y la destrucción de algunas viviendas, que se tradujo en la muerte de algunos de los habitantes. Fuente: Portal <i>Las2orillas</i>	29
Figura 10 A. Partes de una cuenca para formar un evento torrencial (Suarez, 2001). B. Esquema general del proceso de una avenida torrencial (Alarcón et al., 2017).	33
Figura 11 Columna representativa de las Unidades encontradas en la zona de estudio, quebrada Olivares. De 0 a 3 metros se encuentra la unidad A que corresponde a conglomerados clasto soportados y matriz soportados, con variaciones en la composición, encontrados en todas las estaciones de la zona de estudio; la unidad B, de 3 metros a 7 metros compuesta de conglomerados y la unidad C, de 7 metros a 8 metros, compuesta de areniscas, con incertidumbre en cuanto al contacto.	36
Figura 12 Fotografía tomada en la estación 4, Unidad A, depósitos de gravas masivas, matriz soportadas, compuestos por clastos sin orientación de tamaño variable entre guijos y guijarros, con mala selección. Espesor de 2.5 m aproximadamente.	37
Figura 13 . Fotografía de la estación Unidad B ubicada en la parte superior de la zona de estudio, conglomerados con clastos de tamaño variable, composición polimictica y geometría irregular. No presenta deformación. Espesor de 3 a 5 metros, es variable.	38
Figura 14 A. Unidad C aflorante en la parte central de la zona de estudio, rocas vulcano- sedimentarias con tamaño de grano de arena fina y muy fina con laminación paralela. B. Detalle de la laminación paralela definida por cambios composicionales	40
Figura 15 A. Gravas masivas matriz soportadas en la (estación 1). Gmm1 gravas masivas matriz soportadas y gravas masivas matriz soportadas con imbricación. B. Esquema correspondiente a las facies.	42
Figura 16 A. Facies Gmm1, gravas masivas matriz soportadas tamaño guijo a guijarro y Gcm1 gravas masivas clasto soportada tamaño guijo a guijarro, observadas en estación 3. B. Esquema obtenido de la foto.	43
Figura 17 . Fotografía de las facies Gcm2 gravas masivas clasto soportadas, correspondientes a la estación 4. B. Esquema de la fotografía que permite observar mejor la diferencia entre el porcentaje de clastos y matriz en las facies Gcm2 y Gmm1.	44
Figura 18 Fotografía de las facies Gcm3, gravas masivas clasto soportadas de tamaño bloque, donde puede	

observarse los contactos entre los clastos y el tamaño.	
46 Figura 19 Fotografía de la facies Gt, gravas con estratificación inclinada, el recuadro rojo muestra la zona de la facies Gt y las líneas amarillas dibujan la facies.	
47 Figura 20 Fotografía de la facies Sh, corresponde a la Unidad C de la zona de estudio.	48
Figura 21 Diagramas tipo pastel que presentan la redondez según tamaño encontrado y general.	
50 Figura 22 Histograma de frecuencias de la estación 4, ilustrando la distribución según intervalo de tamaño de grano.	de 10
52	
Figura 23 Curva de frecuencia acumulada con escala de semiprobabilidades correspondientes a la estación 4, el diámetro se expresa en unidades Φ	
53	
Figura 24 Criterios de campo para evaluar la edad relativa de los depósitos encontrados. Adaptado de Parra et. al (1995).	
58	
Figura 25 Deposito estación 1, con edad relativa madura por grado de meteorización moderado, 15 centímetros de suelo aproximadamente y cubierta de líquenes negros (los círculos amarillos resaltan esta característica).	
62	
Figura 26 Fotografías de las estaciones 2 y 3 (los números en la imagen indican la estación). Se puede observar que en los depósitos se presenta disección nula, meteorización baja, no hay presencia de líquenes y los clastos están preservados (como lo resalta los)	
63	
Figura 27 Estaciones 4, 5 Y 6. Los números en la imagen indican que la fotografía fue tomada en la estación de campo, muestra depósitos con disección nula, meteorización baja, sin presencia de líquenes y con los clastos preservados (como lo resalta los círculos amarillos), edad relativa reciente.	
64 Figura 28 Mapa de pendientes de la zona de estudio, las franjas rojas representan la pendiente en porcentaje mayor al 100%, indicando que el ángulo de pendiente es de 45°. Los demás porcentajes indican que la pendiente es menor a 45°, lo cual una baja pendiente es menor a 45°, lo cual una baja pendiente es en los porcentajes 0- 25%.	
67	

Lista de tablas

Tabla 1. Datos de análisis granulométrico de matriz de la estación 4, resultado de datos de tamizado por vía	
.....	50
Tabla 2. Resultados del análisis granulométrico de la estación 4, teniendo en cuenta los tamaños de la técnica de la malla y la técnica de tamizado por vía seca.	
51	
Tabla 3. Parámetros estadísticos obtenidos de la curva de frecuencia acumulada de cada una de las estaciones.	
54	
Tabla 4. Interpretación de los parámetros estadísticos obtenidos de la curva de frecuencia acumulada de cada una de las estaciones.	
54	

Lista de anexos

Anexo A. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 1	77
Anexo B. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 2	81
Anexo C. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 3	84
Anexo D. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 5	87
Anexo E. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 6	90

1. Resumen

Se puede decir que una avenida torrencial es un tipo de movimiento en masa caracterizado por un flujo rápido, de una mezcla caótica de sólidos y agua que se desplaza a grandes velocidades; a pesar de las pérdidas de vidas y daños materiales que producen, en Colombia pocos estudios se han realizado referidos a este tipo de procesos.

Frecuentemente el enfoque se centra en la parte geomorfológica y meteorológica, incorporando sistemas de información geográfica, dejando a un lado los aspectos sedimentológicos.

En Manizales, se han presentado algunos eventos de avenidas torrenciales, por lo cual es importante proponer una nueva metodología, teniendo presente la Sedimentología. Con este propósito, se hizo un estudio en la quebrada Minitas (entre los barrios Minitas, La Cumbre y La Sultana).

Inicialmente se realizó un trabajo de campo, consignando espesores, tamaño de grano y estructuras sedimentarias, con el fin de establecer facies; simultáneamente se efectuó una toma de muestras para análisis granulométrico y se registraron aspectos relacionados con la meteorización, estado de los clastos, presencia de líquenes entre otros, con el objetivo de establecer una edad relativa para los depósitos. Esto se complementó con estudios de granulometría en el laboratorio, se elaboró un mapa de pendientes y la recopilación de datos meteorológicos.

En el área de estudio se identificaron tres unidades, la Unidad A conformada por conglomerados clasto-soportados y matriz-soportados, con clastos de tamaño variable entre guijos y guijarros, geometría irregular y polimícticos, la matriz es de tamaño arena media a fina; el espesor promedio es 2.0 metros. La Unidad B, compuesta por clastos de hasta de tamaño bloque, corresponde a conglomerados clasto-soportados y matriz soportados con geometría irregular y composición polimíctica, la matriz es de tamaño arena media, con espesor promedio de 3.0 metros.

La Unidad C cuya posición estratigráfica es difícil de precisar, está conformada por arenitas volcánicas con un espesor de 1.0 metro. El basamento corresponde al Complejo Quebradagrande (unidad metasedimentaria y metavolcánica de edad cretácica media); las relaciones entre las unidades, excepto para la unidad C, corresponden a disconformidades entre las mismas.

Las facies encontradas fueron: Gmm1 (gravas masivas matriz soportadas con tamaño guijo a guijarro) y Gmm2 (gravas masivas matriz soportadas con tamaño guijo a guijarro, con imbricación), interpretadas como asociadas a una alta concentración de sedimentos y alta viscosidad, con un comportamiento plástico, en ocasiones posiblemente representan un flujo hiperconcentrado; las facies Gcm1 (gravas masivas clastos soportadas de tamaño guijos a guijarros) y Gcm2 (gravas masivas clastos soportadas de tamaño guijos a bloques) originados por flujos con alta concentración de sedimentos y alta descarga; la facies Gt (gravas con estratificación inclinada festoneada) registra migración de barras de grava en un canal bajo condiciones de régimen de flujo intermedio a inferior y la facies Sh (arenas con laminación paralela) producida en un régimen de flujo superior.

En general, las facies estudiadas se presentan principalmente asociadas a flujos de escombros y flujos de lodo con comportamientos plásticos a pseudoplástico, sólo en una ocasión para la Unidad A, se encontró evidencias de posible asociación a un depósito de avenida torrencial.

Lo anterior, se confirmó con los resultados de los análisis granulométricos; la selección está entre 2.9 a 5.3 Φ , correspondiendo a sedimentos mal seleccionados a muy mal seleccionados; la Skewness va de 0.13 a 0.35, indicando sedimentos positivamente asimétricos a muy positivamente asimétricos y, por último, la Kurtosis con un rango de 0.5 a 1.4, variando entre depósitos leptokúrticos a platikúrticos.

Meteorológicamente la zona no presenta registros históricos de lluvias fuertes que hayan desencadenado procesos de avenida torrencial.

Teniendo presente las características encontradas, se puede decir que los depósitos de la Unidad A y B son de edad relativa reciente, para la Unidad C, no se puede concluir por el momento.

Considerando todos estos aspectos, se puede decir que la torrencialidad establecida para la zona de estudio es de mínima a baja, ya que sólo se registra un probable evento de características asociadas a avenidas torrenciales.

En conclusión, en la zona de estudio se presentan evidencias de flujos de lodo y flujos de escombros que son importantes de analizar con el fin de establecer la probable existencia de estos eventos, que también pueden ser de características catastróficas; la acción de avenidas torrenciales, probablemente es muy baja.

La implementación de la sedimentología permitió caracterizar de una manera más clara los depósitos y establecer, conjuntamente con los factores meteorológicos y geomorfológicos, una conclusión más definitiva.

2. Introducción

Las avenidas torrenciales son fenómenos naturales que, aunque tienen una ocurrencia relativamente baja, son de particular interés para evaluar los riesgos naturales debido a su gran potencial destructivo, cuando afecta una determinada cuenca. Entre las razones que existen para que este tipo de evento sea tan dañino están su naturaleza casi impredecible, la rapidez a la cual ocurre, su corta duración y su largo período de retorno, así como su distribución poco uniforme en el espacio y el tiempo (Montoya et al., 2009).

Colombia es probablemente uno de los países que más eventos de avenidas torrenciales ha tenido y, sin duda cada uno de ellos ha traído consecuencias, tanto en pérdidas humanas como en infraestructura. Entre 1985 y 1995, más de 40 avenidas torrenciales altamente destructivas ocurrieron en el país, con más de 200 muertes y cuantiosos daños a viviendas, sistemas de generación de energía, carreteras y tierras cultivables (Montoya et al., 2009); aun así, Colombia es uno de los países que menos estudios tiene sobre el tema.

En la ciudad de Manizales se han observado a lo largo del tiempo eventos de avenidas torrenciales, por ejemplo, la ocurrida en la quebrada El Perro en el año 2008, que afectó el sector de Expoferias, los barrios Chachafrutos y Sierra Bonita. Sin embargo, se han realizado pocos estudios caracterizando los depósitos de dichos procesos. Con la finalidad de tener una mejor información se realizó un estudio sedimentológico en la quebrada Minitas, cerca de los barrios Minitas, la Cumbre y La Sultana (Figura 1), estudiando los depósitos, analizando tanto las facies como la granulometría, con el propósito de establecer la probable existencia de este tipo de procesos.

3. Justificación

Como se mencionó anteriormente, el estudio sedimentológico de los depósitos asociados a avenidas torrenciales es de gran importancia no sólo desde el punto de vista de la génesis de los depósitos, sino también con el fin de identificar si algunas áreas de la ciudad pueden estar afectadas por este tipo de fenómenos.

Además, si se conocen los procesos presentes, se puede realizar una identificación, análisis y evaluación del riesgo para generar estrategias con decisiones informadas y reducir el impacto.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Establecer la relación entre las características de los depósitos y probables procesos de avenidas torrenciales.

4.2. Objetivos específicos

- Interpretar los procesos sedimentarios que han generado los depósitos.
- Definir la probable torrencialidad en el área estudiada.

5. Localización

El estudio se realizó en la quebrada Olivares, cerca de los barrios Minitas, la Cumbre y La Sultana (Figura 1), en el área urbana del municipio de Manizales; perteneciente al sistema hídrico de la subcuenca del río Chinchiná, afluente del río Cauca.

La quebrada Olivares (también denominada Minitas) nace a 2700 m.s.n.m., en inmediaciones del Alto del Zancudo y el Alto de La Coca; recibe antes de entrar a la cabecera municipal, gran cantidad de pequeños afluentes; se desplaza por el norte la ciudad y se encuentra con el río Guacaica a los 1350 m.s.n.m.

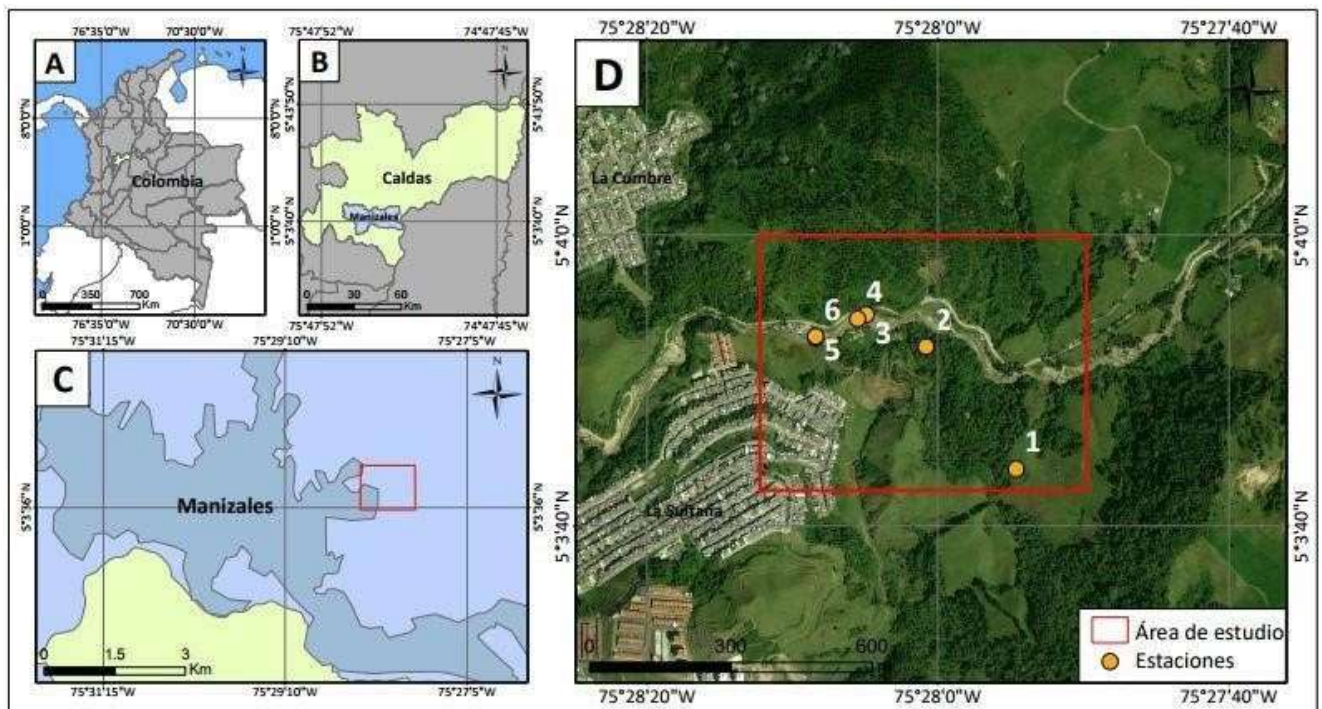


Figura 1. Ubicación del área de estudio. A. Localización de Colombia y departamento de Caldas. B. Departamento de Caldas, resaltando el municipio de Manizales. C. Municipio de Manizales delimitando la zona urbana. D. Área de estudio donde se resaltan las estaciones de campo. Tomada de SAS Planet.

6. Metodología

Se llevaron a cabo cuatro etapas de estudio: revisión bibliográfica, trabajo de campo, trabajo de laboratorio y finalmente el trabajo de oficina.

6.1. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica basada en libros, artículos, datos meteorológicos, noticias de la región y trabajos que tratan sobre avenidas torrenciales. De esta manera, se tuvo conocimiento previo de la zona de estudio en relación con el marco geológico y los registros históricos de eventos catastróficos en la quebrada Minitas. Así mismo, se analizaron las metodologías seguidas para el análisis de las avenidas torrenciales en cuanto a los aspectos sedimentológicos y geomorfológicos.

6.2. Trabajo de campo

Se realizaron levantamientos de secciones transversales de los depósitos encontrados. En cada afloramiento se registraron espesores, tamaño de grano, selección, redondez, porcentaje de matriz, composición y estructuras sedimentarias con el fin de definir facies. Así mismo, se tomó información sobre el grado de meteorización, el grado de disección, el espesor del suelo, el estado de los clastos, la presencia de bloques y la cubierta de líquenes, para la evaluación de la edad relativa de los depósitos encontrados según la metodología de Parra et. al (1995).

De igual manera se hizo un análisis granulométrico por medio de mallas de 100 puntos de 1.0 m x 1.0 m para sedimentos tamaño guijarros a bloques. (Figura 2); de las matrices se tomaron muestras de 50 gramos para posteriormente realizar la técnica granulométrica por medio de tamizado por vía seca en la etapa de laboratorio.



Figura 2 Malla de puntos empleada en el conteo de clastos tamaño grava en el campo.

6.3. Trabajo de laboratorio

Se efectuó un tamizado por vía seca, que consiste en tomar 50 gramos de las muestras recolectadas de la matriz de los depósitos y pasarlas a través de una serie de tamices. Los tamices son agitados por un Ro-Tap (Figura 3), en un periodo de tiempo de 15 minutos. Con una balanza (Figura 4) se mide el peso de cada sedimento retenido en cada tamiz y se realiza trabajo de oficina.



Figura 3 Ro-Tap, herramienta donde que agitan los tamices y se separan los granos de la muestra de acuerdo a su tamaño.

Al tener cada muestra de la matriz separada en pesos por los tamices, se realiza un conteo de 100 granos donde se determina composición, redondez y esfericidad, para poder definir la fuente. Esto se realiza empleando una lupa binocular (Figura 5).



Figura 4 Balanza, utilizada para pesar la muestra tomada de cada una de las estaciones.



Figura 5 Lupa binocular en la que se realiza el conteo de granos para definir composición, redondez y esfericidad de los granos.

6.4. Trabajo de oficina

En esta etapa se realizó toda la interpretación de los datos obtenidos en el trabajo de laboratorio, como lo son las tablas de parámetros estadísticos donde se obtuvieron las medidas de tamaño promedio, medidas de uniformidad, medidas de asimetría y medidas de angulosidad o kurtosis. De tales parámetros se realiza la interpretación de los depósitos asociados a procesos de avenidas torrenciales.

Además, con las facies que se definieron en el trabajo de campo se realiza una interpretación sobre los depósitos encontrados y los asociados a avenidas torrenciales, teniendo en cuenta las propuestas de Alexander & Cooker (2016), González et al., 2005, Caballero (2011), Popes (1997, en Montoya, 2009), Archer & Fowler (2018), Rivas et al., 2009, Iverson (1997) y Nettleton et al. (2005), entre otros.

7. Meteorología

La cuenca de la quebrada Olivares se encuentra en la región sur del departamento de Caldas en el municipio de Manizales y es una subcuenca de la cuenca del río Guacaica, afluente del río Chinchiná, que limita con los municipios de Neira y Marulanda; dentro de esta se encuentra la reserva forestal Río Blanco, barrios como Minitas y La Cumbre. En la cuenca hay varias estaciones de monitoreo, dos de ellas son estaciones meteorológicas denominadas Alto de La Coca a 2930 m.s.n.m y El Mirador a 2570 m.s.n.m (Figura 6).

Del registro de precipitación de dichas estaciones se puede concluir información importante:

- La estación meteorológica Alto de la Coca ha registrado temperaturas máximas de hasta 23.06 °C en agosto y diciembre de 2015 y mínimas de 7.33 °C en octubre de 2017, y un máximo de precipitación mensual de 182.6 mm en marzo de 2017.
- La estación El Mirador registró una precipitación máxima mensual de 251 mm en el mes de mayo del 2017, una temperatura máxima de 23 °C en octubre de 2015 y una mínima de 10.28 °C en octubre de 2017.

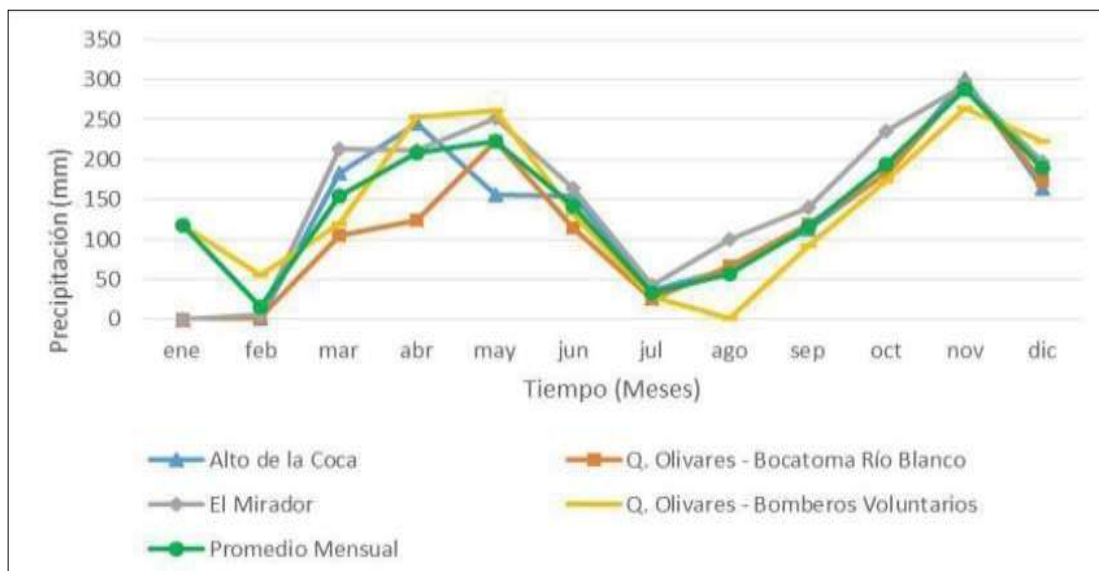


Figura 6 Precipitación mensual de la cuenca quebrada Olivares en el año 2017 (Sánchez et al., 2018).

Los datos de precipitación diaria anual de años anteriores al 2017 de la quebrada Olivares son muy

importantes para tener en cuenta. En la Figura 7 se muestran precipitación diaria anual de la estación hidrometeorológica Quebrada Olivares- El Popal entre los años 2010-2013 (SIMAC, 2013), tomadas en dichos años, en los cuales se puede observar que en los meses de septiembre (159.8 mm), octubre (166.4 mm), noviembre (300 mm) y diciembre (268.8 mm) del año 2.010 tienen una alta precipitación en comparación con los otros años. En el año 2.011 el mes que tuvo mayor precipitación fue noviembre (417.6 mm), en el 2.012 el mes de abril (246.6 mm) fue el de mayor precipitación y en el año 2.013 mayo (227.6) fue el mes con mayor precipitación.

Si bien la información de precipitaciones obtenida en la estación hidrometeorológica Quebrada Olivares-El Popal es relevante, se realizó una revisión bibliográfica y no se encontró registro histórico de algún evento de torrencialidades, que pudiera ser asociado con los datos de precipitación descritos anteriormente.

La toma de datos en campo del presente estudio se realizó en el año 2018, entre los meses de octubre y noviembre de dicho año.

Año	2010												2011												2012												2013											
Día/Mes	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL													
1	0.0	14.0	7.8	0.0	1.2	30.2	5.2	4.8	22.0	1.8	0.2	0.0	13.6	0.0	16.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	42.0	0.0	0.4	1.2	0.0	0.8	0.8	2.4	0.6	2.8	2.8	6.2	8.4	8.0	1.6													
2	0.0	1.4	19.4	2.4	0.0	57.4	1.6	1.6	40.4	1.0	13.4	0.2	2.4	0.2	3.6	1.6	2.6	1.6	1.6	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	12.0	0.4	60.2	0.2	0.0	10.0	7.2	0.0													
3	36.6	10.6	10.2	0.0	0.0	40.0	0.2	5.4	9.0	0.2	9.4	2.2	3.2	0.0	9.4	0.0	0.2	0.0	0.0	11.4	0.0	1.0	0.6	0.4	0.0	0.0	9.0	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	1.6	2.6	0.0													
4	31.2	11.6	18.6	33.0	0.0	5.6	10.4	1.8	25.0	0.4	0.2	1.2	6.2	16.4	16.2	1.2	0.0	1.0	0.0	3.6	3.0	1.1	1.2	0.0	0.0	0.0	5.2	28.6	0.0	24.0	0.0	2.8	21.0	0.6	0.0													
5	1.0	2.2	0.2	13.6	0.0	1.8	9.8	0.6	0.2	0.2	0.4	0.2	0.0	2.4	42.2	10.8	0.6	0.0	14.0	6.6	0.2	2.2	12.2	0.0	0.0	0.0	10.6	2.8	0.2	1.4	0.8	1.2	32.2	0.0	2.6													
6	14.8	18.2	0.4	0.4	61.6	31.0	3.2	0.6	0.2	10.2	0.0	0.2	24.0	0.2	9.2	8.2	2.2	8.0	5.2	21.6	0.0	0.2	4.4	0.0	0.0	0.0	12.8	0.0	0.0	3.6	2.4	0.6	0.6	0.8	0.0													
7	3.4	0.4	5.0	6.2	0.8	14.4	3.8	5.6	0.8	0.0	0.0	0.0	2.6	0.4	22.6	14.2	0.8	0.2	30.8	7.0	0.2	6.0	0.0	12.1	0.8	0.4	0.2	0.0	0.0	2.8	0.8	4.2	0.4	1.4	0.0													
8	9.2	26.8	6.8	2.4	0.2	24.6	37.0	4.6	1.4	0.2	0.0	0.0	22.2	8.0	19.2	1.8	0.0	8.2	0.0	23.6	6.4	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4	0.8	0.2	0.0	26.2	0.2	0.2	1.4	0.0	0.4													
9	0.2	6.6	1.6	0.2	0.2	23.4	42.0	13.8	3.4	0.0	0.0	0.0	21.2	2.8	2.6	0.0	0.0	0.0	2.0	4.0	2.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4	1.2	0.2	0.0	13.6	6.2	1.6	9.0	0.0	0.0													
10	0.0	0.0	6.6	9.2	0.0	1.4	3.6	10.2	2.4	0.0	0.0	0.0	32.8	19.2	29.6	1.8	0.0	4.6	1.2	31.6	1.6	0.0	0.0	1.2	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	24.0	0.2	13.0	4.0	0.0	6.2													
11	0.0	0.0	4.6	0.2	0.2	2.0	0.2	5.0	12.0	0.0	0.0	0.0	3.4	10.0	11.0	0.2	0.0	2.0	0.4	17.6	0.4	6.4	14.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	12.6	3.2	7.4	4.4	5.6	0.0													
12	5.2	0.0	5.0	9.6	0.0	0.2	20.8	8.8	0.0	1.0	5.0	1.2	28.6	56.4	1.4	0.4	9.4	0.0	22.4	0.8	1.6	4.4	0.8	0.0	0.4	18.4	0.6	0.2	21.4	0.0	0.0	0.6	19.8	0.0	0.0													
13	7.2	0.0	9.2	49.0	0.6	19.8	0.0	2.0	50.4	0.4	8.8	3.8	0.2	1.2	1.8	1.8	0.2	0.0	2.4	4.6	0.2	6.0	6.4	7.4	2.0	0.4	4.6	4.6	5.0	0.6	0.2	0.0	4.0	1.2	0.0													
14	0.0	0.2	10.8	5.4	4.4	4.8	0.0	16.4	8.2	0.0	3.2	0.4	6.6	42.0	0.2	11.0	0.2	0.2	0.2	3.0	0.2	1.2	0.6	1.6	0.2	0.4	0.2	23.2	9.4	6.4	1.2	26.8	0.6	19.8	0.0													
15	0.8	17.8	9.2	36.8	0.0	9.6	12.4	35.2	0.0	0.2	36.8	1.4	0.0	25.4	1.8	26.0	3.6	0.0	1.4	0.6	0.2	7.8	0.0	0.2	0.0	0.0	0.6	21.6	20.6	20.2	10.8	36.4	1.0	2.4	0.2	1.0												
16	19.8	0.4	23.2	3.4	2.6	8.4	18.0	8.2	12.6	0.0	2.4	1.0	3.0	39.8	3.0	37.6	0.0	0.0	3.6	2.8	0.2	11.2	5.8	0.4	0.0	0.4	5.0	3.2	0.2	1.0	0.4	0.6	3.0	0.0	0.0													
17	7.4	12.8	36.4	3.8	0.6	15.2	0.8	7.0	19.8	0.0	0.4	1.0	3.0	32.6	25.0	4.2	6.6	0.0	2.4	0.2	0.2	0.6	1.2	5.6	6.8	0.4	15.6	3.8	1.6	6.0	16.6	32.6	13.8	0.8	0.0													
18	0.0	12.0	8.8	11.4	3.6	28.0	8.4	21.8	8.0	0.0	1.8	9.6	12.6	13.2	40.2	6.2	11.2	1.4	15.2	0.0	0.0	1.8	0.2	1.8	1.2	0.2	4.4	13.2	0.2	1.8	7.0	3.0	1.6	1.2	0.0													
19	14.0	5.0	23.2	31.6	0.0	0.4	10.4	18.4	10.2	0.6	0.4	6.0	1.8	1.0	29.0	18.0	31.6	0.4	11.6	32.4	0.2	1.6	2.8	0.0	0.0	0.4	4.2	13.0	0.0	0.2	27.0	0.0	3.6	0.0	0.0													
20	36.6	2.6	12.0	1.0	0.0	4.6	2.0	53.4	21.6	2.0	0.2	11.8	10.0	0.0	13.8	0.2	8.8	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	0.0	0.8	3.8	0.8	0.2	0.2	0.2	18.4	3.0	28.4	0.0	0.0														
21	4.0	8.2	2.6	0.0	0.0	1.6	6.4	19.6	17.4	1.8	0.0	2.2	0.6	0.6	11.6	0.0	8.4	0.0	2.6	3.6	0.2	2.4	0.0	0.4	0.0	0.4	1.8	3.8	0.0	0.6	16.8	23.8	16.0	0.2	8.2													
22	3.2	0.4	4.4	11.0	0.0	0.6	3.6	20.4	14.2	0.0	0.0	1.0	0.2	0.0	17.2	0.2	3.2	0.0	17.0	3.8	4.4	0.0	0.0	0.2	4.4	0.2	3.6	0.0	0.2	1.8	2.4	4.4	11.6	0.0	3.0													
23	5.6	8.6	9.6	0.0	0.0	15.4	22.4	2.8	0.2	1.6	0.0	1.4	12.6	0.6	4.0	0.8	0.2	0.0	1.6	1.4	0.0	0.0	0.4	8.8	0.4	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	6.4	5.0	0.0	3.8														
24	4.4	25.0	35.8	5.6	0.0	18.4	1.8	14.2	1.6	5.4	0.0	2.8	22.4	0.2	8.2	0.2	4.2	0.0	2.0	6.8	1.8	0.0	0.0	10.8	4.8	8.0	0.0	0.2	0.0	1.0	0.0	0.2	4.6	19.0	0.0													
25	6.8	4.0	14.4	8.0	0.0	19.4	1.0	25.0	4.8	3.8	0.0	9.0	9.6	4.2	0.6	0.0	0.2	20.6	6.2	15.6	0.8	2.4	0.0	4.2	2.4	3.4	0.4	0.6	7.0	0.0	3.6	12.8	0.0	10.2	0.0													
26	5.0	2.0	1.0	5.0	5.0	0.2	0.4	0.0	15.6	0.2	0.0	0.6	0.0	1.2	2.0	0.8	0.4	0.2	4.4	0.8	0.4	0.0	0.0	0.2	1.6	0.0	0.2	0.8	7.6	0.4	2.8	11.6	1.0	0.0	3.6													
27	15.6	38.6	9.4	3.0	0.0	2.2	10.0	10.0	1.8	0.0	0.0	1.6	0.2	1.2	10.4	0.2	8.4	0.0	0.0	2.2	0.0	0.6	0.2	0.0	1.4	0.0	0.6	0.2	0.0	2.4	0.2	6.8	0.4	0.4	0.0													
28	2.4	83.8	2.2	0.2	0.0	25.4	12.4	2.8	1.0	0.0	11.4	3.6	0.0	8.8	8.8	0.0	0.2	18.8	3.2	13.0	1.0	0.4	0.4	0.2	0.8	0.0	0.0	19.2	0.0	0.0	1.2	0.2	3.8	5.2	12.8	0.0												
29	6.8	22.8	0.2	0.0	0.0	0.4	3.2	6.6	3.2	28.2	0.0	3.4	13.0	14.8	1.6	1.8	17.0	0.2	5.8	0.2	2.8	1.6	0.0	1.2	3.4	29.2	0.0	0.0	2.6	6.6	4.2	0.6	0.0	0.0														
30	3.2	12.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	4.4	12.0	0.2	0.0	13.2	24.6	2.6	3.2	0.0	0.0	0.2	0.0	3.8	3.0	0.4	0.6	2.0	31.8	2.2	0.0	0.4	0.6	9.8	1.4	0.0	0.0														
31	12.8	0.0	0.2	0.0	0.0	24.8	21.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.6	0.2	0.2	0.2	0.2	17.2	0.0	0.0														
Resumen mensual	159.8	166.4	300.0	268.8	89.2	302.4	288.2	250.8	259.8	129.4	121.6	86.8	173.6	117.6	417.6	218.4	125.0	89.0	87.2	246.6	125.6	52.6	51.6	57.8	52.4	39.4	192.4	141.2	73.6	217.2	124.6	106.8	227.4	116.4	38.0													

Nota: Los datos en rojo están incompletos.

Figura 7 Resumen de la precipitación diaria anual de la estación hidrometeorológica Quebrada Olivares- El Popal, (SIMAC, 2013).

8. Marco Geológico

En este capítulo se describen las unidades litológicas (Figura 8) y las estructuras de importancia regional.

8.1. Unidades litoestratigráficas.

Se tienen unidades que van del Paleozoico hasta el Reciente.

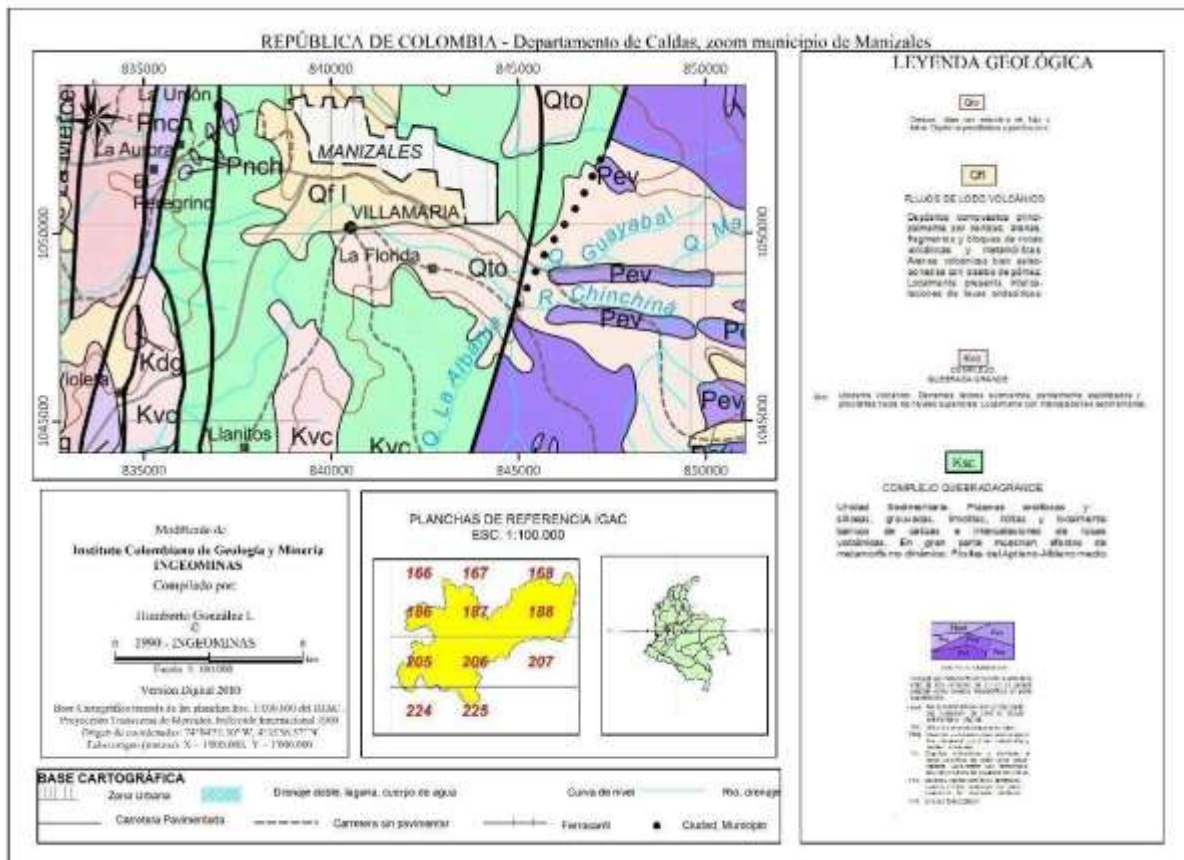


Figura 8 Mapa geológico de Manizales. Tomado de González (1990).

8.1.1 Complejo Cajamarca

Maya y González (1995) definen el Complejo Cajamarca como un conjunto metamórfico paleozoico, compuesto por pizarras, filitas, esquistos cuarzo-sericiticos, esquistos verdes, cuarcitas, gneises, granulitas,

anfíbolitas y fajas de mármol que afloran en el sector Cajamarca-Alto de La Línea. Este complejo no presenta un espesor preciso debido al plegamiento y ausencia de capas guía. El Complejo Cajamarca aflora a lo largo del borde Occidental, Oriental y hacia las partes más altas de la Cordillera Central. Predominan dos tipos de esquistos de bajo grado intercalados con cuarcitas y localmente con mármoles: esquistos verdes y esquistos grafiticos o negros (Nelson, 1957).

8.1.2 Complejo Quebradagrande

González (2001) define el Complejo Quebradagrande como la agrupación de rocas metavolcánicas y metasedimentarias que afloran en el flanco Oeste de la Cordillera Central al occidente de la falla san Jerónimo y al este de la falla Silvia-Pijao. Está compuesto por arenitas, conglomerados, chart, lutitas y pizarras de bajo grado de metamorfismo. De acuerdo a su complejidad estructural es dividida en un “miembro volcánico” y “miembro sedimentario”. Se le asigna una edad de berriasiano-Albiano (140-100Ma) con base en amonites y bivalvos (González, 1980; Botero y González, 1983; Etayo-Serna, 1985; Gómez et al., 1995).

8.1.3 Formación Manizales

Nombre propuesto por Flórez (1986) para referirse a una acumulación detrítica de piedemonte observable en el escarpe de Chipre, en Manizales y el flanco oriental de la Cordillera Central. Posteriormente Naranjo y Ríos (1989) retoman ese nombre y proponen que corresponde a rocas volcanoclásticas, derivadas del complejo volcánico Ruiz-Tolima que se encuentran reposando discordante sobre el Complejo Quebradagrande y suprayacidas por la Formación Casabianca. Por su posición estratigráfica, la asignan al Mioceno superior- Plioceno Medio, superior y el espesor es aproximadamente 260 metros.

Posteriormente, Herrera y López (2003) la subdividen en dos miembros: Miembro La Linda constituido por flujos de escombros, flujos de corriente y flujos piroclásticos, aflorando con una diferencia

de altura de 400 metros y Miembro La Estampilla, conformado por flujos piroclásticos separados por flujos de escombros y barras de grava, con un espesor de 200 m.

8.1.4 Formación Casabianca

Corresponde a un conjunto de sedimentos volcánicos derivados del eje volcánico Ruiz-Cerro Bravo (Borrero & Naranjo, 1990). Según Herrera y López (2003) esta formación está constituida por una sucesión de lahares y flujos de corriente. Reposa discordantemente sobre la Formación Manizales y está suprayacida por depósitos de caída piroclástica. En el área de Manizales el espesor máximo encontrado es de 50 m (Naranjo & Ríos, 1989). Su edad se ubica en el rango Plioceno-Pleistoceno (Borrero & Naranjo, 1990).

8.1.5 Lavas de Lusitania

Corresponde a un flujo de lava que aflora en la vía Panamericana al paso por el barrio Lusitania hasta la quebrada Manizales, presentando forma irregular, color gris oscuro y textura afanítica (Naranjo & Ríos, 1989). Se le asigna una edad de <38.000 años de acuerdo a estudios paleomagnéticos y relaciones estratigráficas (Mejía et al., 2011).

8.1.6 Depósitos de caída piroclástica (Qcp).

Materiales recientes que forman una secuencia estratigráfica inconsolidada que cubren la topografía, constituida por cenizas, arenas volcánicas y pómez de tamaño lapilli, generalmente de color gris hasta café, provenientes de la actividad eruptiva del complejo volcánico Ruiz-Tolima (Méndez y Patiño, 2003).

8.2. Geología estructural

El sector de Manizales ubicado en el occidente de la Cordillera Central, se encuentra delimitado al occidente por el sistema de falla Silvia-Pijao y al oriente la falla San Jerónimo. La Falla Silvia Pijao definida

por Maya y González (1995) pertenece al sistema de Fallas de Romeral y pone en contacto rocas del Complejo Quebradagrande (al este) y Arquía (al oeste); en las cercanías de Manizales presenta una dirección NE con variación hacia el norte con un cambio al N-NW poniendo en contacto las llamadas Migmatitas de Manizales con el Complejo Quebradagrande y la Formación Manizales con el Stock Metagabroico de Chinchiná –Santa Rosa.

La falla San Jerónimo con límite oriental del sistema de fallas Romeral y marca el contacto entre las rocas metamórficas continentales del complejo Cajamarca al este y las rocas cretácicas del Complejo Quebradagrande al Occidente (Maya y González, 1995). Está compuesta por fallas inversas paralelas a subparalelas con una tendencia NNE-SSW.

9. Avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales son fenómenos naturales, con ocurrencia baja, naturaleza casi impredecible, rapidez en su ocurrencia, corta duración, largos periodos de retorno y distribución poco uniforme en el espacio y tiempo; adicionalmente, tienen un gran poder destructivo (González et al., 2005).

El término “flash flood” traduce inundación repentina, pero es más conocido en nuestro idioma como avenida torrencial. Según Alexander & Cooker (2016), no existe una definición universal para este término; sin embargo, lo definen como cualquier flujo de agua en el continente (bien sea dentro o fuera del canal de un río) que llega súbitamente a un punto fijo, cambia rápidamente y dura un corto tiempo; en consecuencia, las avenidas torrenciales son inestables (la velocidad en un punto fijo varía con el tiempo) y no uniformes (la velocidad varía en el espacio en un tiempo determinado). De igual manera, la profundidad del agua es dependiente del tiempo. El flujo se desarrolla y fluctúa a varias escalas de tiempo, pasando de salpicaduras (splash) superficiales en menos de 1 segundo, al movimiento de la parte frontal del flujo en términos de segundos o minutos y finalizando con paso completo de la avenida en minutos u horas.

Un ejemplo cercano es el evento de avenida torrencial que ocurrió en Mocoa Putumayo el año 2017, donde fue tan repentino y de gran magnitud que se evidencio el gran poder destructivo que puede llegar a tener dicho fenómeno, como se evidencia en la Figura 9, donde se perdió gran parte de la cubierta vegetal y destruyo la mayoría de las casas. “A las 10:00 pm del 31 de marzo y la 1:00 am del 1 abril de 2017, se registró una precipitación de 129.3 mm en el municipio de Mocoa, y una precipitación mensual de 491.5 mm siendo la más alta del semestre. Esta precipitación diaria equivale a la lluvia que caería normalmente durante 10 días en esta zona del piedemonte amazónico, y ocasionó el colapso de la capacidad hidráulica e hidrológica de la microcuenca” (Ramírez, 2019).

El tamaño de los materiales es de gravas, arenas y limos; la Formación Pepino juega un papel muy importante en la formación de los flujos torrenciales del río Mulato y se evidencia por su aporte muy recurrente en cada evento torrencial. La parte inferior de esta formación consta de un conglomerado polimíctico, mientras que la parte superior está constituida por un conglomerado con intercalaciones de arcillolitas. Destruyo barrios completos y la mayoría de la ciudad. (Ramirez, 2019).



Figura 9 Vistas de antes y después de la avenida torrencial que afectó a Mocoa, en 2017. La parte superior de la fotografía muestra cómo era la ciudad antes del evento; en la imagen inferior, se puede apreciar la pérdida de la cubierta vegetal y la destrucción de viviendas, que se tradujo en la muerte de algunos de los habitantes. Fuente: Portal *Las2orillas*.

Desde el punto de vista geomorfológico una avenida torrencial es un tipo de movimiento en masa caracterizado por el flujo rápido de una mezcla caótica de sólidos y agua que pueden desplazarse a grandes velocidades; dependiendo de los materiales involucrados y de los tipos de flujo que se dan, es posible definir una amplia variedad de fenómenos, todos con posibilidades de presentarse en cuencas de

montaña (Caballero, 2011).

“Las avenidas torrenciales se generan por causas hidrometeorológicas (lluvias concentradas), sísmicas (enjambres de deslizamientos cosísmicos), de inestabilidad de vertientes (bloqueo de un cauce por un deslizamiento y posterior ruptura del dique), o por erupciones volcánicas y deshielo o por acumulación de capas gruesas de cenizas sueltas” (Popes, 1997 citado en Montoya, 2009).

Archer y Fowler (2018) concluyeron, al estudiar varios eventos registrados en Gran Bretaña las siguientes características:

1. Las avenidas torrenciales pueden ser localizadas o generalizadas.
2. Las crecidas repentinas de los ríos se caracterizan por un rápido aumento de agua que puede tomar la forma de una "wall of water" visible.
3. Tasas tan rápidas de aumento del nivel del agua no requieren de la falla de una estructura aguas arriba, pueden ser generados por lluvias intensas de período extremadamente corto en las cabeceras.
4. Los tiempos de respuesta a las inundaciones (retraso desde la precipitación hasta el pico de inundación) que surgen de lluvias intensas de corta duración parecen reducirse considerablemente con respecto a las inundaciones "normales".
5. La iniciación de frentes de ondas asociadas a un ascenso fuerte es más común en áreas de captura hacia el continente con pendiente fuerte, sin embargo, donde la intensidad de la lluvia corta es suficiente, tales frentes de ondas se pueden también presentar en zonas de captura de baja pendiente.
6. El riesgo para la vida es mayor en las inundaciones repentinas que en las inundaciones "normales".

Es importante también tener en cuenta los siguientes parámetros que son de fácil observación en campo, que pueden ser indicadores de eventos de avenida torrencial:

30

campo, que pueden ser indicadores de eventos de avenida torrencial:

Precipitación: Es muy importante tener los datos de precipitación de la cuenca ya que este parámetro es un agente detonante de un evento de avenida torrencial (Rivas et al., 2009).

Morfometría: Es un conjunto de varios índices, como la densidad de drenaje, la pendiente media de la cuenca y el coeficiente de compacidad, en conjunto definen la facilidad para concentrar la escorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos, la eficiencia o rapidez de la escorrentía y así saber cuál podría ser el nivel de susceptibilidad a las crecidas (Rivas et al., 2009).

Índice de protección del suelo: Este parámetro puede llegar a ser útil ya que, si la vegetación arbórea es densa, la protección es más eficaz (Rivas et al., 2009).

Desde el punto geomorfológico, una avenida torrencial debe de tener una zona con fuerte gradiente seguido de zonas de acumulación de material, por lo tanto, hay zonas con más probabilidad de sufrir eventos de avenida torrencial (Caballero, 2011)

- Zonas de montaña: Amenaza alta por avenidas torrenciales según la pendiente, longitud de la cuenca y material aportante.
- Zonas de transición (Conos de deyección): Es la zona de mayor peligro, ya que incluye las zonas más extensas de inundación rápida, generadas en la desembocadura debido al cambio de pendiente.
- Llanura aluvial: Gran parte de los afluentes que pueden presentar avenidas torrenciales han perdido velocidad, altura de flujo y capacidad de carga, ya sea por condiciones naturales o por obras de mitigación.

En cuanto a la sedimentología, las facies anunciadas principalmente a avenida torrenciales, según la nomenclatura de Miall (1996), son las facies Gmm y Gcm, asociadas a flujos gravitacionales, las cuales se interpretan como depósitos asociados a una corriente con alta concentración de sedimentos y alta descarga (Gao et al., 2020). En estos flujos existen cambios en las tasas del transporte y velocidad, por lo tanto, se ve reflejada la turbulencia en la corriente. Además, están asociadas a crecidas repentinas confinadas dentro de canales profundos (Gao et al., 2020). Con los cambios en las tasas del transporte y velocidad, en un momento de baja velocidad, cuando la corriente pierde fuerza, los clastos se depositan en su posición más estable, generando la imbricación. La alta concentración de los clastos más gruesos en esta facies refleja la alta capacidad de transporte de sedimentos de las inundaciones (Gao et al., 2020). Estas facies se forman como producto de flujos de lodo de alta viscosidad, no presentan estructuras sedimentarias ni estratificación (Lindsay, 1968 y Collinson, 1979 citados en Reading, 1996), son los responsables de la mala selección y la apariencia masiva de esta facies (Allen, 1981; Rhee et al., 1997).

En este caso en particular también se observan evidencias con flujos de corrientes de alta energía tales como laminación paralela. Frecuentemente las avenidas torrenciales tienen la capacidad de transportar clastos tamaño bloque, siendo esta la característica más comúnmente encontrada, por lo general carecen de un canal y no se presentan como flujos confinados.

En general, la falta de estructuras internas (carácter masivo) la mala selección y, en menor medida, la baja redondez de los materiales sugiere según Castelltort et al. (2018), descargas acuosas efímeras de alta energía y densidad, intensas y de corta duración correspondientes a episodios de avenidas torrenciales generados por lluvias fuertes.

No hay facies diagnósticas para este tipo de procesos, pero la asociación de flujos gravitacionales y flujos de corriente generan una serie de depósitos que reflejan la interacción de ambos mecanismos.

Según Caballero (2011) las zonas con más probabilidad de sufrir eventos de avenidas torrenciales se dan cuando se mezclan los siguientes factores:

- Cuencas con gradientes altos y áreas medias, lo que implica tiempos rápidos de concentración y altas velocidades de las corrientes.
- Precipitaciones de gran intensidad.
- Disponibilidad de material fino tipo limos y arcillas; la fuente de estos sedimentos pueden ser movimientos en masas generados durante el mismo evento climático.
- Cambios bruscos en el gradiente de la quebrada, lo que facilita la acumulación de los sedimentos.

De forma general, los flujos se definen como un fenómeno de transporte de sedimentos compuesto por una mezcla de material fino y grueso con una cantidad variable de agua, en el que tanto las fuerzas sólidas como las fluidas influyen fuertemente (Iverson 1997; Nettleton et ál. 2005). Según el tipo de proceso dominante y la relación sedimentos-agua, esta mezcla se considera desde procesos gravitacionales tipo flujo (Cruden y Varnes 1996) hasta procesos hidrológicos tipo inundaciones súbitas, en muchos casos, el término flujo hiperconcentrado se emplea para describir flujos intermedios entre estos dos fenómenos.

La Figura 10 muestra un esquema general del proceso y partes de la cuenca de una avenida torrencial causada por lluvias extremas. En la parte alta de la cuenta, hay alta precipitación, se genera un movimiento en masa y un arrastre de material, que depende la litología del lugar; este material se transporta aguas abajo y en la parte inferior o baja de la cuenca, se empieza a depositar, generando una zonificación de depósitos con características específicas del proceso, llamados avenida torrencial (Alarcón et al., 2017, Suarez, 2001).

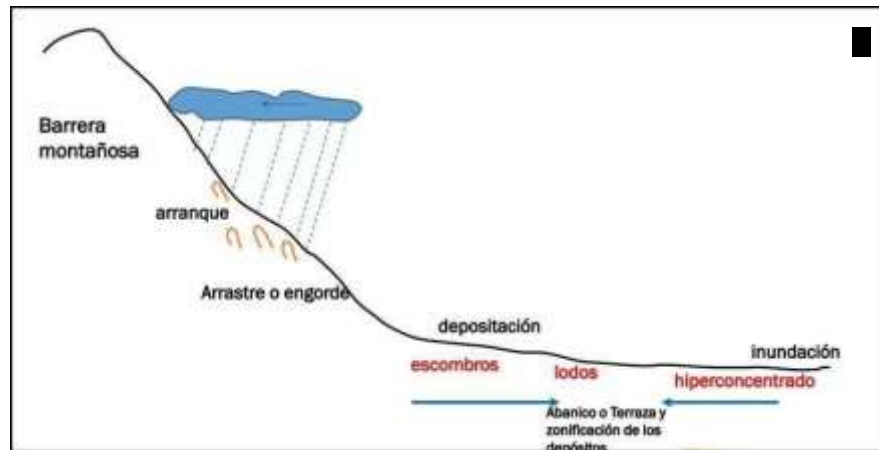
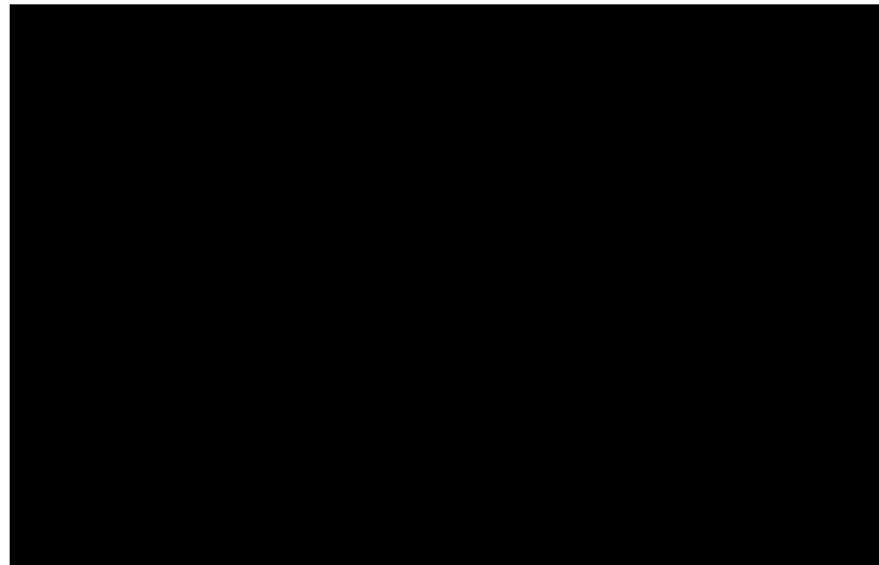


Figura 10 A. Partes de una cuenca para formar un evento torrencial (Suarez, 2001). B. Esquema general del proceso de una avenida torrencial (Alarcón et al., 2017).

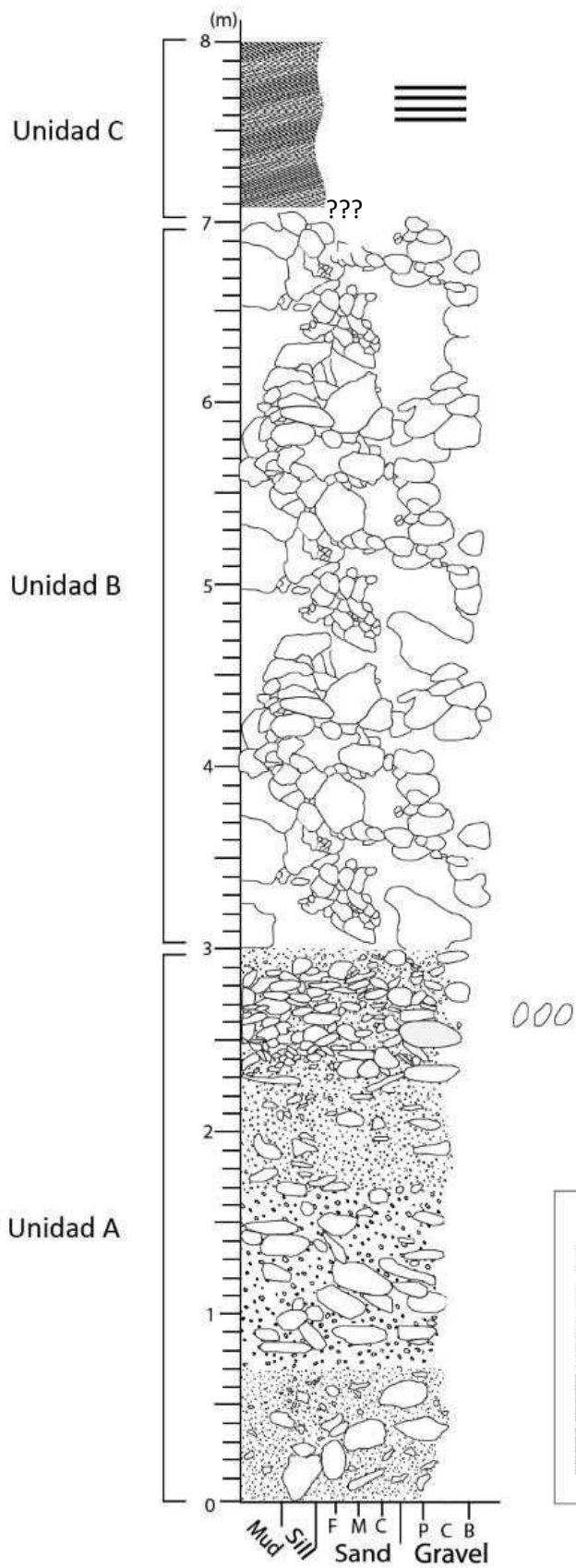
10. Estratigrafía general de la zona

A partir de la información obtenida en campo, se levantó una columna estratigráfica generalizada (Figura 11); en ella se muestran las tres unidades encontradas denominadas informalmente Unidad A, Unidad B y Unidad C.

Es de anotar, que las unidades presentan gran variación lateral.

La unidad A corresponde a conglomerados clasto soportados y matriz soportados, con variaciones en la composición, encontrados en todas las estaciones de la zona de estudio; la unidad B, también

compuesta de conglomerados, pero solo se encontró al inicio del recorrido en la zona de estudio, y la unidad C, compuesta de areniscas aflorando en la estación 2 de la zona de estudio (Figura 1).








Convenciones	
	Estratificación plana paralela
	Imbricación
	Unidad A, corresponde a conglomerados clasto soportados y matriz soportados
	Unidad B, compuesta de conglomerados
	Unidad C, compuesta de areniscas.

Figura 11 Columna representativa de las Unidades encontradas en la zona de estudio, quebrada Olivares. De 0 a 3 metros se encuentra la unidad A que corresponde a conglomerados clasto soportados y matriz soportados, con variaciones en la composición, encontrados en todas las estaciones de la zona de estudio; la unidad B, de 3 metros a 7 metros compuesta de conglomerados y la unidad C, de 7 metros a 8 metros, compuesta de areniscas, con incertidumbre en cuanto al contacto.

10.1. Unidad A

Espesor: El espesor promedio de la unidad es de 2.0 metros aproximadamente, con geometría irregular.

Contactos: La Unidad A se encuentra en contacto con el basamento, que corresponde al Complejo Quebradagrande y la Unidad B; el contacto inferior es discordante con el basamento y el contacto superior con la Unidad B es disconforme.

Litología: Corresponde a depósitos compuestos por clastos de tamaño variable entre guijos y guijarros sin orientación preferencial Figura 12, geometría irregular y polimícticos, compuestos por cuarzo, fragmentos de granitoides, esquistos, biotita y minerales máficos como anfiboles.

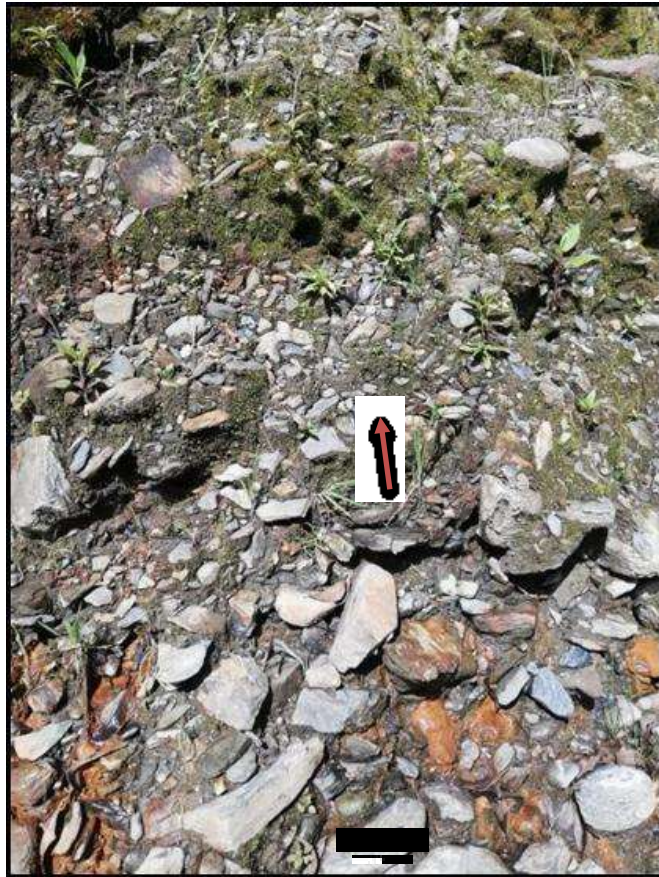


Figura 12 Fotografía tomada en la estación 4, Unidad A, depósitos de gravas masivas, matriz soportadas, compuestos por clastos sin orientación de tamaño variable entre guijos y guijarros, con mala selección. Espesor de 2.5 m aproximadamente.

Esta unidad es la más antigua en la zona de estudio ya que se encuentra sobre el basamento y las demás unidades se encuentran sobre ella, como puede observarse en la Figura 11.

10.2. Unidad B

La Unidad B (Figura 13), se encuentra ubicada entre las alturas 2.191 msnm y 2.130 msnm.

Espesor: El espesor de la unidad es de 3.0 m.

Contactos: La unidad está en contacto con la Unidad A y Unidad C, siendo el contacto inferior

concordante con la Unidad A y el contacto superior es inferido con la Unidad C; con este último, hay una gran incertidumbre ya que en campo no es claro la posición estratigráfica.

Litología: Compuesta por clastos de tamaño bloque, corresponde a conglomerados clasto-soportados con clastos de baja esfericidad y redondeados a subredondeados, con geometría irregular y composición polimíctica.



Figura 13 . Fotografía de la estación Unidad B ubicada en la parte superior de la zona de estudio, conglomerados con clastos de tamaño variable, composición polimíctica y geometría irregular. No presenta deformación. Espesor de 3 a 5 metros, es variable.

10.3. Unidad C

La unidad C es observada en un solo afloramiento (Figura 14), se presenta una incertidumbre con respecto a la posición estratigráfica, como se discute al final de este aparte.

Espesor: Se encuentra en un solo afloramiento durante todo el trayecto de estudio, el espesor registrado en campo de la unidad es de 70 centímetros y de largo 1 metro.

Contactos: Con la Unidad B no se observa ningún contacto por lo tanto es inferido, se presenta demasiada confusión, ya que en campo la Unidad C está consolidada y es poco probable que sea la

más reciente, por lo tanto, no tendría que estar estratigráficamente por encima de las otras unidades como aparentemente se observa en campo, aun así, no se puede concluir ya que hay incertidumbre en cuanto al contacto.

Litología: Está compuesta por arenitas masivas y arenitas con laminación paralela con aporte volcánico, hay ausencia de conglomerados (Figura 14), se diferencia por su cambio de color entre la laminación. Los estratos se encuentran intercalándose, unos de color gris los cuales tienen tamaño de grano arena fina, compuesta por minerales máficos, moscovita y cuarzo, y los estratos de color marrón, de tamaño de grano arena muy fina, donde no se puede diferenciar composición.

Correlación: No se puede establecer con certeza la posición estratigráfica de esta unidad, se sugiere estudiarla con más detalle ya que puede ser de gran importancia; cabe aclarar que esta unidad no tiene incidencia con respecto a avenidas torrenciales.

Se plantean dos opciones para explicar la posición estratigráfica de la Unidad C.

Un movimiento en masa llevó a la unidad hasta donde se encuentra actualmente. Es algo confuso ya que en la zona aledaña no se encuentra evidencia geomorfológica de un área a partir de la cual se pueda haber iniciado ese proceso.

Otra explicación podría ser por fallamiento, pero no se encontraron evidencias en campo del mismo, tales como planos de falla o de estrías de falla en la unidad; sin embargo, es de tener presente que esos rasgos pueden no ser notorios debido a procesos de meteorización o de erosión.

Para poder aclarar la posición estratigráfica de esta unidad se sugiere realizar un estudio detallado en otras áreas con el fin de encontrar probablemente la misma unidad; igualmente analizar factores estructurales y geomorfológicos empleando sensores remotos.



Figura 14 A. Unidad C aflorante en la parte central de la zona de estudio, rocas vulcano- sedimentarias con tamaño de grano de arena fina y muy fina con laminación paralela. B. Detalle de la laminación paralela definida por cambios composicionales

11. Análisis Facial

Según Miall (1996), las litofacies están definidas por la granulometría, fábrica y estructuras sedimentarias. A partir de su propuesta, se hicieron modificaciones y se encontraron las facies que se describen seguidamente.

11.1. Facies Gmm1, gravas masivas matriz-soportadas con tamaño guijo a guijarro.

La facies Gmm1 se encuentra en la Unidad A y Unidad B. Se trata de gravas matriz soportadas, con selección moderada a mala, con un porcentaje de clastos de 30%, con tamaño entre guijo y guijarro, predominante subangulares (60%), angulares (20%) y redondeados (20%). El porcentaje de matriz es de 70%

y está compuesta por arena de tamaño medio a grueso. La facies se encuentra masiva, sin estructuras de ordenamiento interno, cuenta con un espesor de 35 cm y generalmente son de forma irregular (Figura 15).

Interpretación. Se asocia a una alta concentración de sedimentos y viscosidad (Miall 1996). En este caso el flujo es de carácter plástico, ya que hay abundante matriz arenosa, selección mala y una fábrica matriz-soportada. La facies generalmente no estratificadas, mal seleccionadas, caóticas, indican la naturaleza no selectiva de los procesos depositacionales (Gao et al., 2020) fueron causados por la combinación de la flotabilidad y presión dispersante (DeCelles et al., 1991; Blair & McPherson, 2009). Probablemente representa un flujo hiperconcentrado cercano a la fuente (Pierson y Scott, 1985).

11.2. Facies Gmm2, Gravas masivas matriz-soportadas de tamaño guijo a guijarro con imbricación.

La facies Gmm2 se encuentra en la Unidad A, presenta un espesor de 25 a 30cm y una geometría irregular, Se trata de una grava matriz soportada que presenta mala selección, el porcentaje de clastos es de 40% con tamaños entre guijo y guijarro, principalmente subangulares (60%) y angulares (30%); el porcentaje de matriz es de 40%, compuesta de arena media a gruesa. En ocasiones, se presenta imbricación (Figura 15).

Interpretación. Se interpreta como un depósito asociado a crecidas repentinas confinadas dentro de canales profundos (Gao et al., 2020). Es probable que esta facies este indicando un flujo hiperconcentrado (Pierson y Scott, 1985). En estos flujos existen cambios en las tasas del transporte y velocidad, en un momento de baja velocidad, cuando la corriente pierde fuerza, los clastos se depositan en su posición más estable, generando la imbricación. En este caso el flujo es de carácter plástico, ya que hay abundante matriz arenosa, selección mala y una fábrica matriz- soportada (Miall, 1996). La característica

más importante de la facies Gmm es la ausencia de clastos organizados, originados por flujos de sedimentos de alta densidad (Collinson y Thompson, 1989; Leeder 1999 citados en Reading 1996). Cuando se presentan grandes clastos imbricados embebidos en una matriz arenosa, se sugieren procesos de alta energía con intervención de agua, posiblemente asociados a algo de turbulencia (Laming, 1966; Nemeč & Steel, 1984).

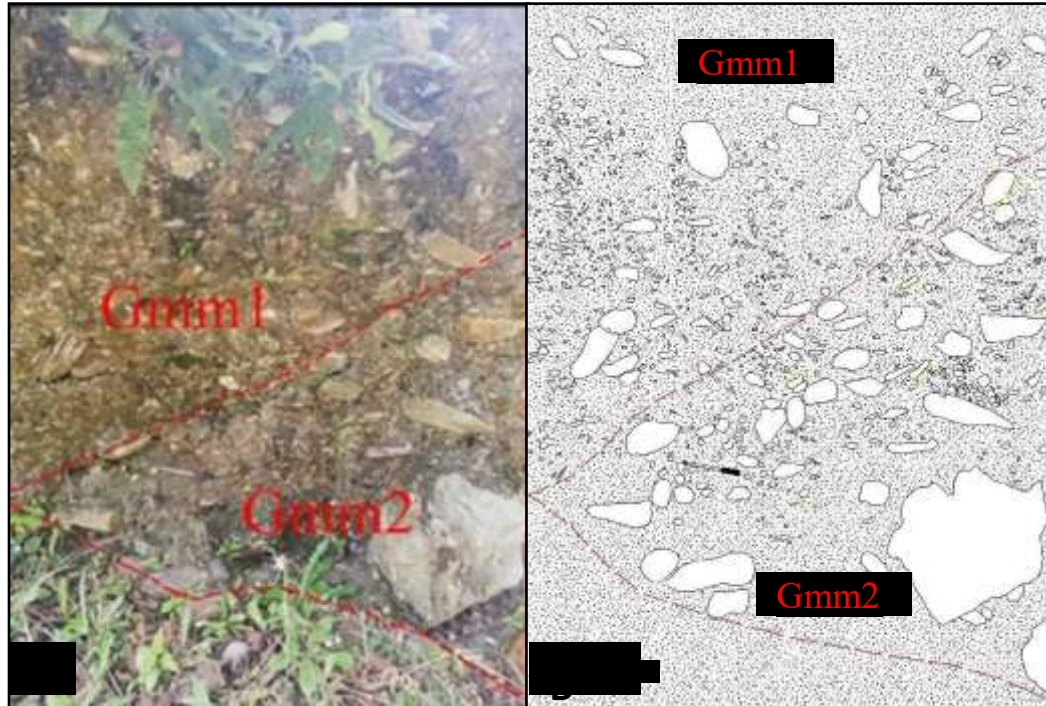


Figura 15 A. Gravos masivas matriz soportadas en la (estación 1). Gmm1 gravas masivas matriz soportadas y gravas masivas matriz soportadas con imbricación. B. Esquema correspondiente a las facies.

11.3. Facies Gcm1, Gravos masivas clasto soportadas de tamaño guijos a guijarros.

La facies Gcm1 hace parte de la unidad A. Corresponde a gravas clasto-soportadas irregulares, con espesor de 30 a 35cm, con selección moderada, un porcentaje de clastos del 70% con tamaños entre guijos y guijarros, subredondeados (40%), subangulares (30%) y angulares (30%); el porcentaje de matriz es del 30% y está compuesta de arena media a gruesa (Figura 16). Es común encontrar varias facies de este tipo amalgamadas y separadas por superficies erosivas; la geometría es irregular.

Interpretación. Se interpretan como depósitos asociados a una corriente con alta concentración de sedimentos y alta descarga (Gao et al., 2020). En estos flujos existen cambios en las tasas del transporte y velocidad, por lo tanto, se ve reflejada la turbulencia en la corriente. Es probable que esta facies se haya originado a partir de inundaciones repentinas que no fueron confinadas (Olsen, 1987; Abdullatif, 1989).

Registran eventos de flujos de escombros y flujos de corriente pseudoplásticos, unas de sus características son su geometría tabular y en ocasiones lenticulares, la cual no se evidenció en campo, ya que se encuentran superficies erosivas y que no presenta estructuras sedimentarias (Miall, 1996).

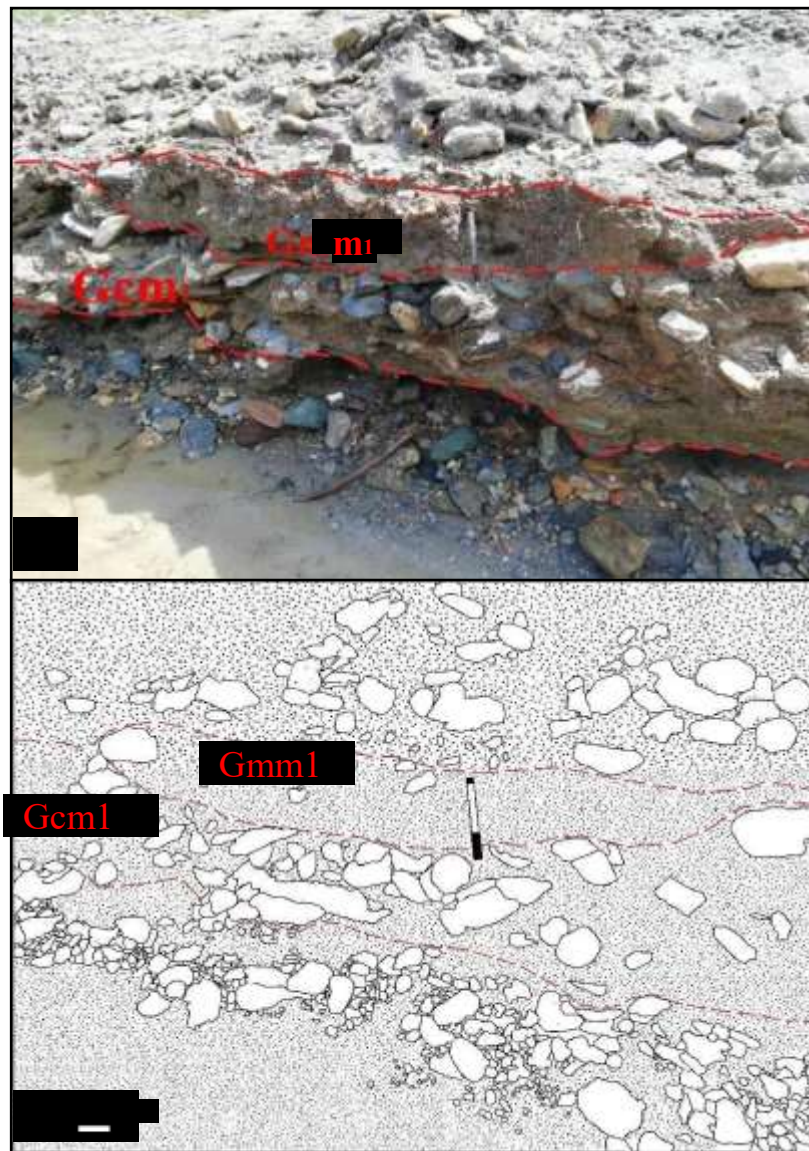


Figura 16 A. Facies Gmm1, gravas masivas matriz soportadas tamaño guijo a guijarro y Gcm1 gravas masivas clasto soportada tamaño guijo a guijarro, observadas en estación 3. B. Esquema obtenido de la foto.

11.4. Facies Gcm2, Gravas masivas clasto-soportadas con tamaño de guijos a bloques (tamaño máximo).

La facies Gcm2 se encuentra en la estación 5 y hace parte de la unidad A. se trata de gravas clasto-soportadas con espesor de 60 a 80 cm, con selección moderada, con un porcentaje de clastos del 70%, con tamaños de guijos a guijarros y bloques en menor proporción, subredondeados (40%), subangulares (30%) y angulares (30%); el porcentaje de matriz es del 30% y se compone de arenas de grano medio a grueso.

El depósito es masivo, generalmente irregular sin estructuras de ordenamiento interno (Figura 17).

Interpretación. Se forman como producto de flujos de lodo de alta viscosidad, no presentan estructuras sedimentarias ni estratificación (Lindsay, 1968 y Collinson, 1979 citados en Reading, 1996).

Los rápidos cambios en la descarga, los flujos prolongados de inundaciones de gran magnitud y la rápida depositación causada por la dispersión de los flujos de alta concentración de sedimentos pueden ser responsables de la mala selección y la apariencia masiva de esta facies (Allen, 1981; Rhee et al., 1997).

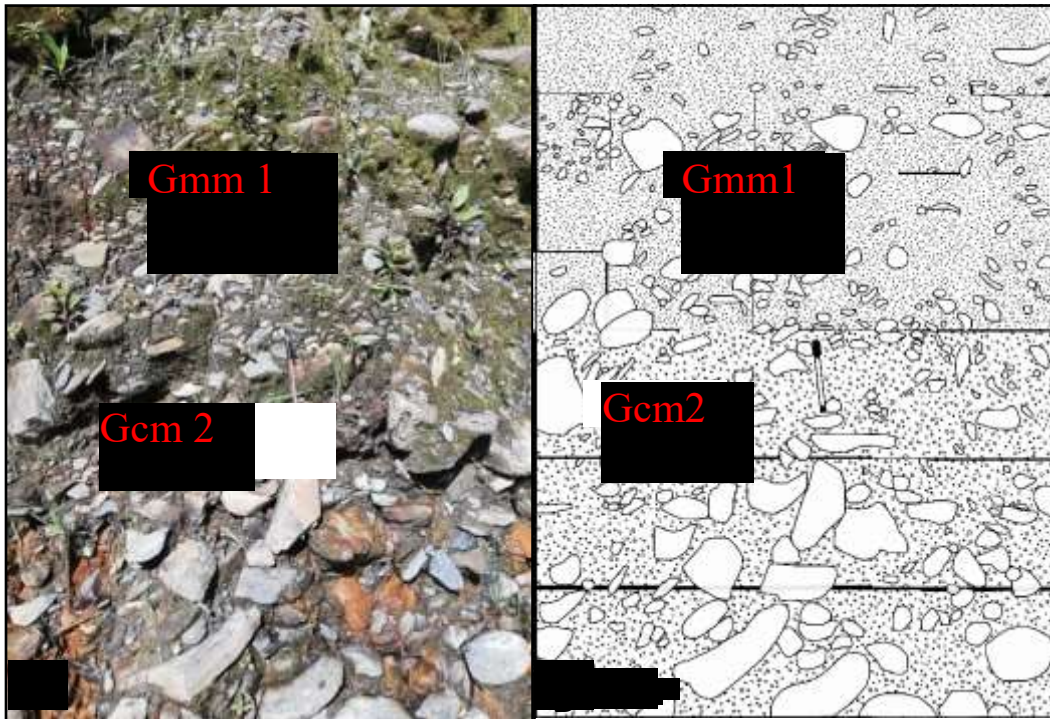


Figura 17 . Fotografía de las facies Gcm2 gravas masivas clasto soportadas, correspondientes a la estación 4. B. Esquema de la fotografía que permite observar mejor la diferencia entre el porcentaje de clastos y matriz en las facies Gcm2 y Gmm1.

11.1. Facies Gcm3, Gravitas masivas clasto-soportadas con tamaño bloque.

La facies se encuentra ubicada en la parte inicial de la zona de estudio, antes de la estación 1, y corresponde a la unidad B, cuenta con 1,5 m de espesor. Se trata de gravas clasto-soportadas irregulares, selección moderada, el porcentaje de clastos es del 80% con tamaño bloque, redondeados (60%) y subredondeados (40%); el porcentaje de matriz es de 20% y está compuesta por arenas medias a gruesas. No presenta estructuras internas, es un depósito masivo (Figura 18).

Interpretación. La alta concentración de los clastos más gruesos en esta facies refleja la alta capacidad de transporte de sedimentos de las inundaciones (Gao et al., 2020). Si estas inundaciones se dan en canales profundos, no lograron expandirse, y por eso se pudo mantener la profundidad del flujo, la concentración de clastos y la capacidad de transporte de sedimentos (Blair, 1999; Blair & McPherson, 2009). Si el flujo tuvo cambios rápidos en la descarga y rápida depositación de la alta concentración de sedimentos, se puede explicar la falta de estructuras presente en esta facies (Allen, 1981; Rhee et al., 1997).

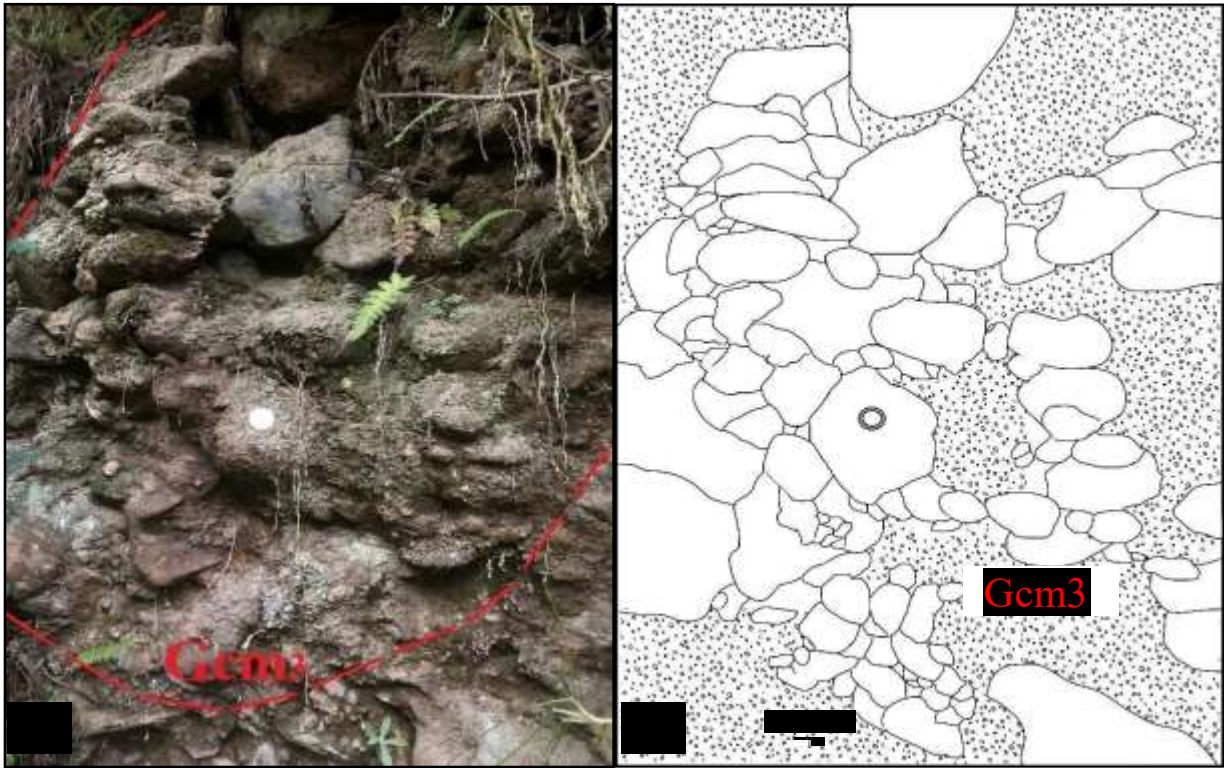


Figura 18 Fotografía de las facies Gcm3, gravas masivas clasto soportadas de tamaño bloque, donde puede observarse los contactos entre los clastos y el tamaño.

11.1. Facies Gt, Gravas con Estratificación inclinada festoneada.

Se encuentra en la estación 2, tamaño variable entre guijos y guijarros, mala selección, presenta un porcentaje de clastos del 40%, variando de subangulares (55%), subredondeados (25%) y angulares (20%) con una matriz de arena media a gruesa con un porcentaje de 65% (Figura 19).

Interpretación: Según Miall (1996) las gravas clasto soportadas registran la depositación de carga de fondo a partir de flujos de corriente, se interpretan como el producto de migración y acreción frontal de dunas o por

migración de barras de gravas en el canal bajo condiciones de régimen de flujo intermedio a bajo (Reading, 1996). En este caso, puede deberse a que la acción del agua se hizo importante, permitiendo el desarrollo de estructuras de ordenamiento interno.

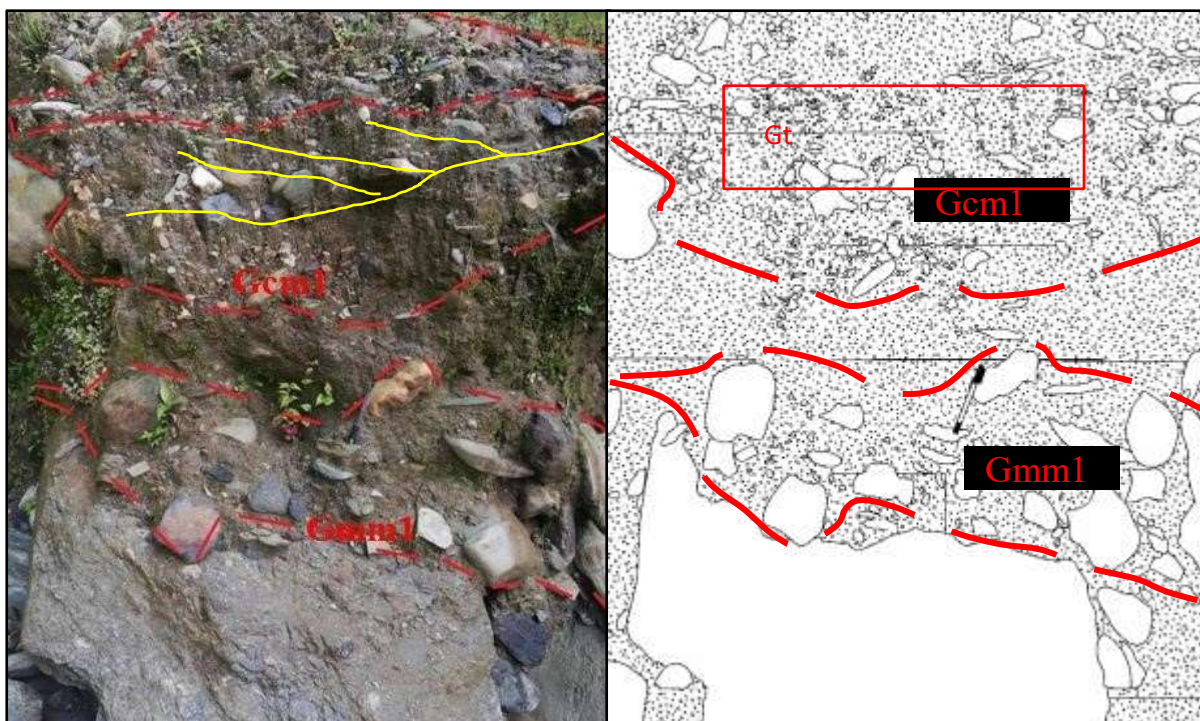


Figura 19 Fotografía de la facies Gt, gravas con estratificación inclinada, el recuadro rojo muestra la zona de la facies Gt y las líneas amarillas dibujan la facies.

11.1. Facies Sh, Arena con laminación paralela

Tiene un espesor de 10 a 17cm, no muestra ondulaciones, se observa en la unidad C, varía de tamaño de grano de arena fina a arena muy fina, con buena selección (Figura 20).

Interpretación: se da como producto de la deposición de un régimen de flujo superior, con espesores variables (Miall, 1996). Estas arenitas generalmente se encuentran con tamaño de grano fino, pueden ocurrir en arenas de canal y tienden a estar hacia el techo y suelen ser interpretadas como producto de régimen de flujo superior (Stear, 1985 en Reading, 1996).

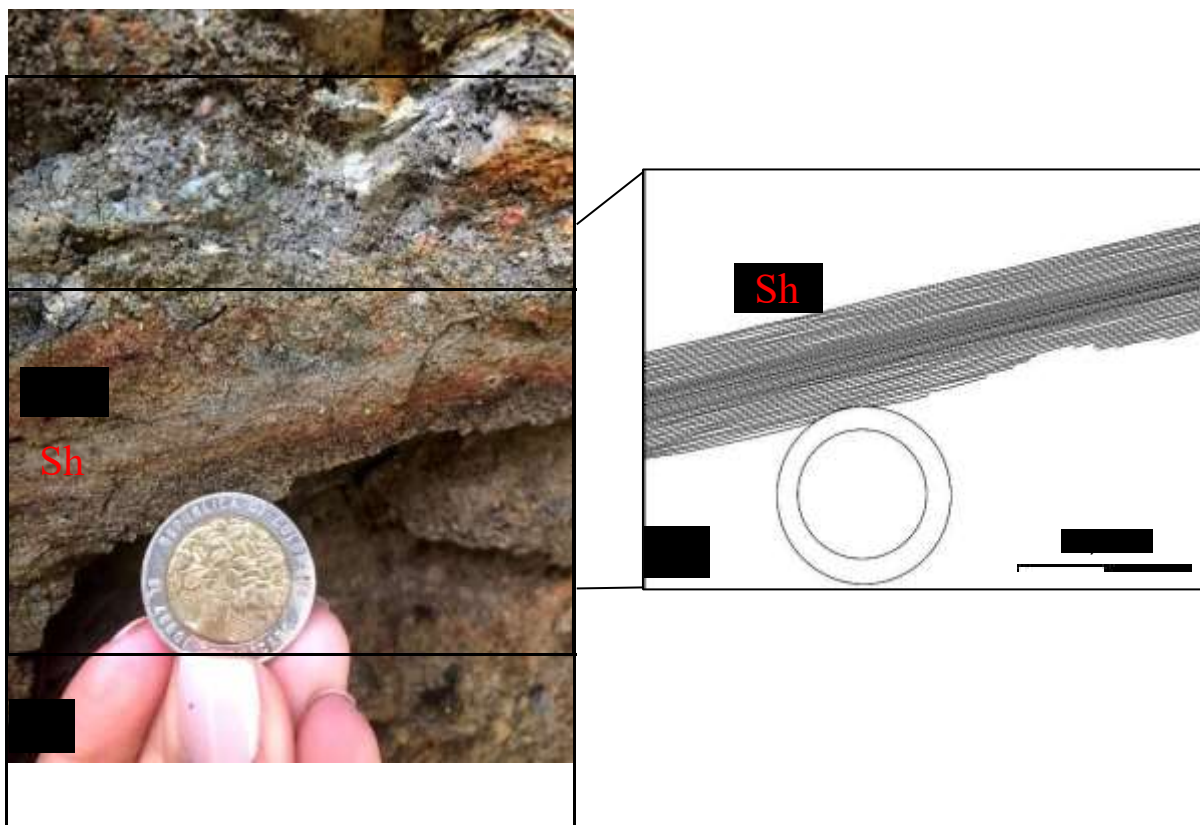


Figura 20 Fotografía de la facies Sh, corresponde a la Unidad C de la zona de estudio.

De las facies descritas anteriormente, las Gmm y Gcm son las que probablemente estén asociadas con procesos de avenidas torrenciales, presentes en la Unidad A, motivo por el cual la granulometría se hará en esta unidad.

12. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realizó para 6 muestras obtenidas de las estaciones. En este capítulo, se muestra el procedimiento del análisis de una muestra para la estación 4. Los datos de todas las estaciones del proceso para el análisis granulométrico se encuentran en los Anexos 1 a 5; al final del capítulo se describen los resultados obtenidos para todas las estaciones.

Para establecer la granulometría de los depósitos estudiados de la Unidad A, ya que es la que presenta la asociación más probable con avenidas torrenciales; se utilizan diferentes técnicas dependiendo el tamaño de grano, para sedimentos tamaño guijarros a bloques se realiza mediante conteo de clastos en afloramiento, y de tamaño guijo a arenas se realiza por medio del tamizado por vía seca.

12.1. Conteo de clastos en afloramiento

Consiste en sobreponer en el afloramiento una malla de un metro por un metro, subdividida cada diez centímetros, dando un total de cien puntos; en cada intersección se realiza un conteo, determinando así una distribución de los tamaños de granos de guijarros a bloques. Esta técnica se realiza en cada estación estudiada. Se registra el porcentaje según tamaño de grano de clastos y matriz, así como la redondez. A manera de ejemplo se muestra lo obtenido en la Estación 4 (Figura 21) en la cual se obtuvo que el mayor porcentaje de clastos son subangulares a angulares y la mayoría de clastos son guijarro. En general en la zona de estudio predomina el tamaño de grano guijo y guijarro.

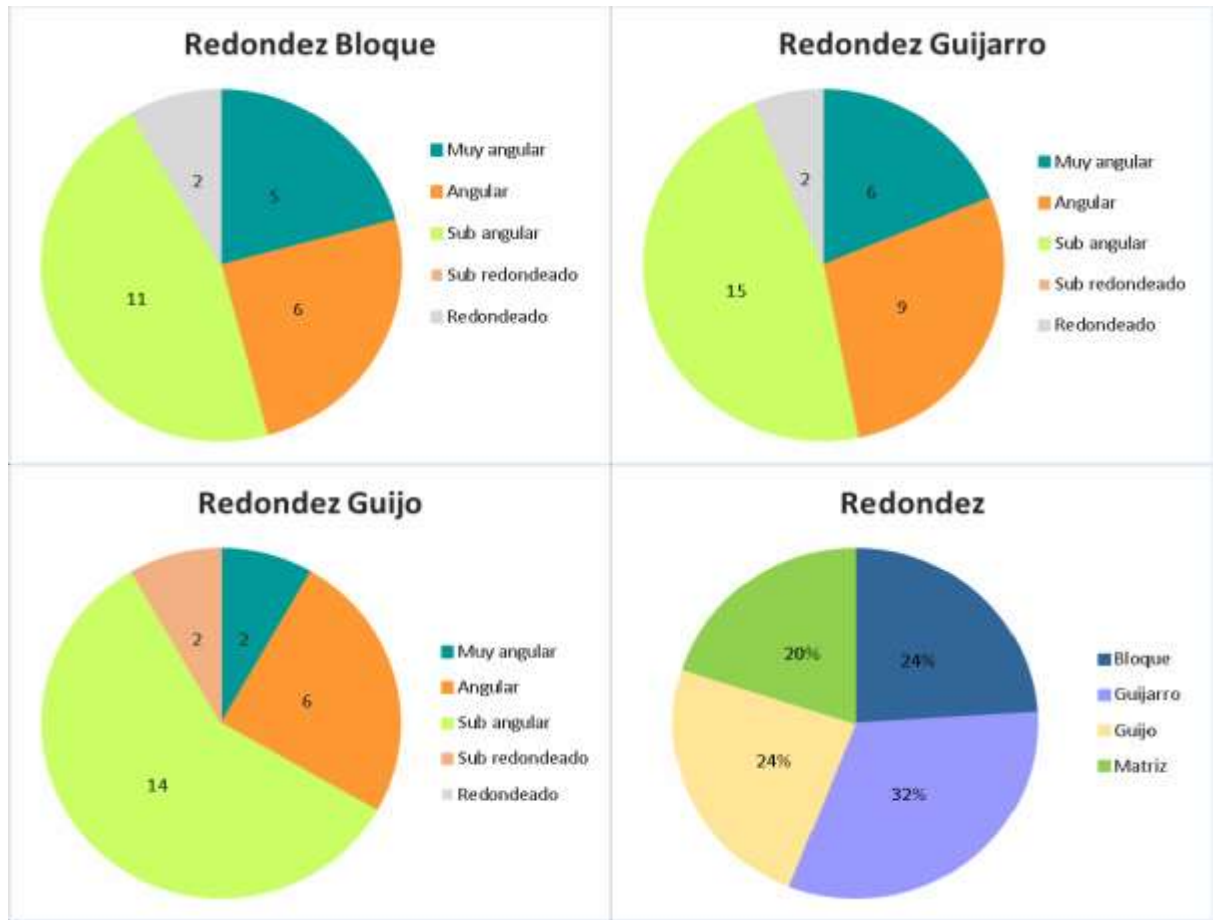


Figura 21 Diagramas tipo pastel que presentan la redondez según tamaño encontrado y general.

12.2. Tamizado por vía seca.

El procedimiento se realiza con las muestras de 50 gramos de matriz de las seis estaciones, se pasan por una serie de tamices, agitándose en un Ro-Tap por 15 minutos. Los pesos de cada tamiz se llevan a un porcentaje sobre el total de la muestra, realizando esto en cada estación. A continuación, se muestra los resultados para la Estación 4 (Tabla 1). Los datos obtenidos para las otras estaciones se encuentran en los anexos 1 al 5.

Tabla 1. Datos de análisis granulométrico de matriz de la estación 4, resultado de datos de tamizado por vía seca.

Tabla de análisis granulométrico de matriz				
Tamaño	Unidades Φ	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado
>2	<-1 Φ	13.74	32.28383459	32.28383459

1.0 – 2.0	-1Φ - 0Φ	5.77	13.55733083	45.84116541
0.5 – 1.0	0Φ - 1Φ	8.08	18.98496241	64.82612782
Tabla de análisis granulométrico de matriz				
0.25 – 0.5	1Φ - 2Φ	6.25	14.68515038	79.5112782
0.125 – 0.25	2Φ - 3Φ	5.31	12.47650376	91.98778195
0.0625 – 0.125	3Φ - 4Φ	2.01	4.722744361	96.71052632
<0.0625	>4Φ	1.4	3.289473684	100
Peso total		42.56	100	
Peso perdido		7.44		

Con los datos obtenidos por la aplicación de las técnicas granulométricas como la técnica de la malla y tamizado por vía seca para la estación 4 (Tabla 2), se realiza el histograma de frecuencias y la curva de frecuencia acumulada en escala de semiprobabilidades.

Tabla 2. Resultados del análisis granulométrico de la estación 4, teniendo en cuenta los tamaños de la técnica de la malla y la técnica de tamizado por vía seca.

Tabla para análisis granulométrico			
Tamaño	Unidades Φ	Porcentaje	Porcentaje acumulado
256 – 64	-8Φ - -6Φ	24	24
64 – 4.0	-6Φ - -2Φ	32	56
4.0 – 2.0	-2Φ - -1Φ	30.456	86.456
1.0 – 2.0	-1Φ - 0Φ	2.7114	89.1674
0.5 – 1.0	0Φ - 1Φ	3.7968	92.9642
0.25 – 0.5	1Φ - 2Φ	2.937	95.9012
0.125 – 0.25	2Φ - 3Φ	2.4952	98.3964
0.0625 – 0.125	3Φ - 4Φ	0.9444	99.3408
<0.0625	>4Φ	0.6578	99.9986
	Total	99.9986	

12.3. Histograma de frecuencias

Permite la visualización rápida de los comportamientos del tamaño de grano en las muestras (Figura 22). Para este caso, la muestra de la estación 4, se utilizaron los datos de la Tabla 1 (Figura 21).



Figura 22 Histograma de frecuencias de la estación 4, ilustrando la distribución según intervalo de tamaño de grano.

12.4. Curva de frecuencia acumulada en escala de semiprobabilidades

Los gráficos de frecuencia acumulada, en función de su distribución, permiten evaluar la probabilidad de que se supere un valor dado (Figura 23).

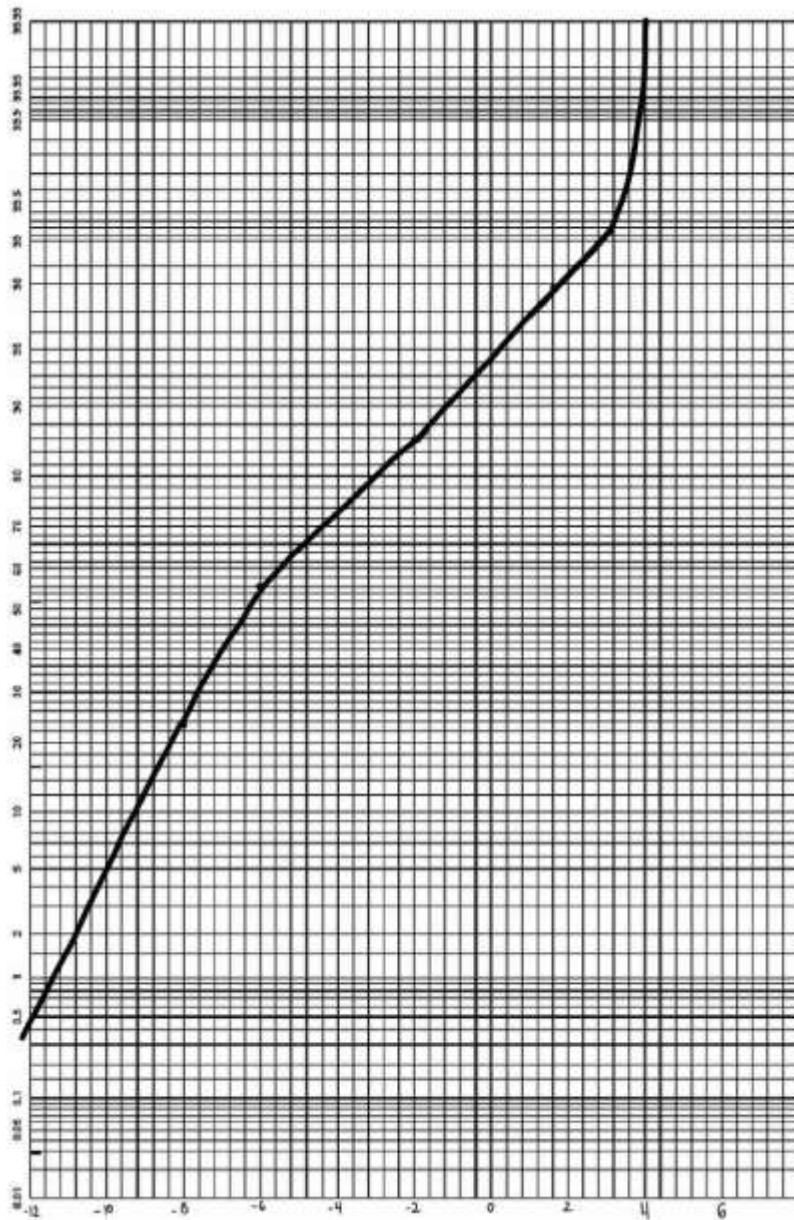


Figura 23 Curva de frecuencia acumulada con escala de semiprobabilidades correspondientes a la estación 4, el diámetro se expresa en unidades Φ .

La curva de frecuencia acumulada con escala de semiprobabilidades (Figura 23), permite determinar parámetros estadísticos granulométricos, como: medidas de tamaños promedio angulosidad, medidas de uniformidad (Desviación Estándar Gráfica) y asimetría (o Skewness). Dichos parámetros estadísticos permiten realizar una interpretación en términos de la energía, que a su vez define el índice de selección.

12.5. Parámetros estadísticos granulométricos

En la Tabla 3 muestra el resumen de los parámetros estadísticos obtenidos de la curva de frecuencia acumulado del tamaño de grano para las 6 estaciones de la Unidad A. Los parámetros estadísticos obtenidos en la muestra procedente de la estación 4 fueron los utilizados para la interpretación del depósito.

Tabla 3. Parámetros estadísticos obtenidos de la curva de frecuencia acumulada de cada una de las estaciones.

	Parámetros estadísticos (mm)		Medidas de uniformidad (Φ)	Medidas de simetría (Φ)	Medidas de angulosidad (Φ)
	Media	Mediana	Selección	Skewness	Kurtosis
Estación 1	20.6299249	18.3791737	4.361363636	0.31	0.573954895
Estación 2	38.4968012	78.7932425	5.314393939	0.13	0.713509777
Estación 3	13.6106749	19.6983106	4.10909091	0.17	0.748396294
Estación 4	54.4426983	84.4485063	3.188636364	0.308	1.119167718
Estación 5	11.8487807	13.928809	2.908333333	0.135	0.714169778
Estación 6	22.1106061	42.2242531	3.577272727	0.35	1.415797317

El resumen de los resultados obtenidos del análisis granulométrico para todas las estaciones (Tabla 3) con su interpretación (Tabla 4) se describe a continuación.

Tabla 4. Interpretación de los parámetros estadísticos obtenidos de la curva de frecuencia acumulada de cada una de las estaciones.

	Parámetros estadísticos (mm)		Medidas de uniformidad (Φ)	Medidas de simetría (Φ)	Medidas de angulosidad (Φ)
	Media	Mediana	Selección	Skewness	Kurtosis
Estación 1	20.6299249	18.3791737	Muy mal seleccionado	Muy positivamente asimétrico	Platikúrtica
Estación 2	38.4968012	78.7932425	Muy mal seleccionado	Positivamente asimétrico	Platikúrtica
Estación 3	13.6106749	19.6983106	Muy mal seleccionado	Positivamente asimétrico	Platikúrtica
Estación 4	54.4426983	84.4485063	Mal seleccionado	Muy positivamente asimétrico	Leptokúrtica
Estación 5	11.8487807	13.928809	Mal seleccionado	Positivamente asimétrico	Platikúrtica
Estación 6	22.1106061	42.2242531	Mal seleccionado	Muy positivamente asimétrico	Leptokúrtica

- En la muestra de la estación 1 de la Unidad A obtuvo un valor de 4.3Φ en la selección, revelando una extremadamente mala selección que se explica probablemente porque la gravedad fue el agente predominante, ya que no tiene la capacidad de segregar; también indica que el depósito está asociado a eventos rápidos y de poca periodicidad con una tasa de sedimentación alta que no permitió seleccionar el material. El valor de 0.31 para Skewness se traduce en un predominio de los sedimentos gruesos sobre los finos, y junto con el valor de 0.57 para Kurtosis (Platikúrtica), permiten inferir que los sedimentos que componen el depósito provienen de fuentes variadas. Considerando las características mencionadas anteriormente, se asume que el depósito es el resultado de un flujo gravitacional que afectó unidades.
- El valor obtenido de la selección en la estación 2 de la Unidad A es 5.3Φ , que significa que es extremadamente mal seleccionada, evidenciando la acción de la gravedad como se planteó en la interpretación de las facies, la tasa de sedimentación alta y los eventos rápidos que pudieron formar el depósito, y que al combinarse no permitieron una segregación del material. La medida de Skewness con un valor de +0.13 representa un predominio de sedimentos gruesos sobre sedimentos finos, y el valor de 0.7 en Kurtosis (Platikúrtica), indican que la fuente de los sedimentos es variada. Igualmente, se asume que fue un flujo gravitacional, que arrastro material de distintas fuentes el que formó el depósito.
- El dato hallado en la estación 3 de la Unidad A de la medida de uniformidad muestra un valor de 4.1Φ , mostrando una selección extremadamente mala, que pudo ser el resultado de un evento de rápida acción y poca periodicidad donde la gravedad fue el factor predominante y la tasa de aporte de sedimentos fue alta. El valor de - 0.17 en Skewness, indicando un mayor contenido de sedimentos gruesos, y la Kurtosis de 0.74 (Platikúrtica), Se infiere que el depósito fue formado por un flujo gravitacional que en su descenso obtuvo materiales de fuentes diferentes y fue de acción rápida.
- El resultado del análisis de uniformidad en la estación 4 de la Unidad A alcanzó un valor de 3.2Φ

indicando una muy mala selección, que podría ser el resultado de la gravedad como factor principal en el proceso de formación del depósito, que, en conjunto con un evento de rápida acción con una tasa de sedimentación alta, no permitieron una segregación de los materiales. El valor de +0.3 para Skewness, una asimetría positiva que evidencia el predominio de sedimentos gruesos, y el valor de 1.11 para Kurtosis (Leptokúrtica), evidencian una mezcla de fuentes en los sedimentos que forman el depósito. Se asume que el evento que formó el depósito fue un flujo gravitacional que contenía material procedente de fuentes distintas, ya que en el conteo de granos realizado a las muestras se encuentran granos de diferentes composiciones, tales como fragmentos de rocas ígneas, esquistos y cuarzo.

- De acuerdo al análisis de uniformidad en la estación 5, de la Unidad A, se obtuvo un valor de 2.9Φ , evidenciado una muy mala selección, producto de la acción de la gravedad como el principal factor en la formación del depósito, en un evento rápido que involucro una tasa de sedimentación alta, que no permitieron un retrabajamiento y segregación de los materiales. Con un valor de +0.13 para Skewness, es decir, una asimetría positiva donde predominan los sedimentos gruesos sobre los sedimentos finos, y un valor de 0.71 en Kurtosis (Platikúrtico), que indica una alta dispersión de tamaño de grano, se puede inferir que son varias las fuentes que aportaron el material que forma el depósito. Basado en los resultados obtenidos, se infiere que fue un flujo gravitacional el proceso encargado de formar el depósito.
- El estudio de la medida de uniformidad en la estación 6 de la Unidad A arroja un valor de 3.5Φ lo cual sugiere una selección muy mala, que es el resultado de un evento de acción rápida donde la gravedad tuvo el papel principal, y junto con una tasa de aporte de sedimentos alta, no tuvo lugar una segregación de materiales. El valor de 0.35 para Skewness, indicando un predominio de sedimentos gruesos, y un valor de 1.4 para Kurtosis (Leptokúrtico), permiten inferir que el depósito está formado

por sedimentos provenientes de diferentes fuentes. Finalmente, y al igual que en las anteriores muestras, se infiere que fue el flujo gravitacional que arrastro material de distintas procedencias y que se depositó de manera rápida, el que dio origen al depósito.

Aunque de manera general todos los depósitos tienen características similares que permiten inferir que fue un flujo gravitacional el proceso formador, se sabe que fueron varios los eventos de flujos gravitacionales que actuaron en la formación de los depósitos presentes en la Unidad A.

13. Edad relativa

Para la edad de los depósitos, se utilizó la propuesta de Parra et. al (1995) (Figura 24), quienes la determinan con base en varias características, como son: grado de disección del depósito, grado de alteración de los fragmentos, espesor de la capa de suelo, desarrollo de líquenes en los bloques y grado de enterramiento de los bloques (Figura 24).

Grado de disección del depósito: Se relaciona con el desgaste que ha tenido la superficie del depósito, a mayor edad la superficie se hace menos plana.

Espesor de suelo: Se refiere al espesor que ha alcanzado el suelo que se forma sobre los depósitos. Mientras más antiguos sean los depósitos, mayor espesor podrá alcanzar el suelo.

Estado de clastos: Evalúa el estado de conservación de los clastos presentes en los depósitos, especialmente el grado de meteorización que muestren. Los depósitos antiguos se caracterizan por tener un mayor efecto de meteorización sobre los clastos.

Presencia de bloques: Tiene en cuenta el grado de enterramiento de los bloques. Mientras más antiguo sea el depósito, a mayor profundidad estarán los bloques.

Cubierta de líquenes: Evalúa el tiempo que los elementos han estado en contacto con el ambiente. La presencia de cubiertas de tonos negros, blancos o verdes indica mayor tiempo de exposición. Con base en lo anterior, se establece una serie de categorías.

- Se clasifican como recientes, los que tienen una disección mínima, espesor de suelo de 0-10 cm, clastos con incipiente meteorización, presencia de bloques sin enterramiento y nula cubierta de líquenes.
- Los depósitos maduros tienen una disección moderada, un espesor de suelo 10-20 cm, meteorización moderada en los clastos, grado de enterramiento de los bloques moderado, y presencia de cubierta negra de líquenes en los clastos.
- Los depósitos antiguos tienen disección mayor, espesor de suelo mayor a 20 centímetros, alta meteorización, mayor presencia de bloques y cubierta de líquenes de colores blanco, negro y verde.








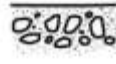
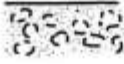







	RECIENTE	MADURO	ANTIGUO	
Disección:				
Espesor de suelo:	 A: 0-10 cm	 A: 10-20 cm	 > 20 cm	
Estado de clastos:				
Presencia de bloques:				
Cubierta de líquenes:	 Ninguno	 Negros	 Negros Blancos	 Negros Blancos Verdes

Figura 24 Criterios de campo para evaluar la edad relativa de los depósitos encontrados. Adaptado de Parra et. al (1995).

Los criterios evaluados en campo y las edades relativas obtenidas para los depósitos se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Edad relativa de los depósitos de campo, con base a la metodología de Parra et. al. (1995).

Depósito	Disección	Espesor de suelo	Estado de clastos	Presencia de bloques	Cubierta de líquenes
Depósito estación 1	Reciente	Maduro	Maduro	Reciente	Maduro
Depósito estación 2	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente
Depósito estación 3	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente
Depósito estación 4	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente
Depósito estación 5	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente
Depósito estación 6	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente	Reciente

El depósito de la estación 1, correspondiente a la unidad A (Figura 25), presenta una disección nula, el espesor del suelo es de 15 centímetros aproximadamente, el grado de meteorización es moderado y con presencia de cubierta negra de líquenes, lo cual muestra que es un depósito que ha estado expuesto a la intemperie durante un tiempo relativamente prolongado, por lo tanto, tiene una edad relativa madura.



Figura 25 Depósito estación 1, con edad relativa madura por grado de meteorización moderado, 15 centímetros de suelo aproximadamente y cubierta de líquenes negros (los círculos amarillos resaltan esta característica).

El depósito de la estación 2, unidad A, no presenta disección, el espesor del suelo es de 5 centímetros, el grado de meteorización es bajo, no presenta cubierta de líquenes y los clastos se encuentran bien preservados y conservan su forma (Figura 26), por tanto, se trata de un depósito reciente.

El depósito de la estación 3, unidad A, tampoco presenta disección, el espesor del suelo no alcanza los 5 centímetros, los clastos se encuentran bien preservados, con bajo grado de meteorización y no presentan cobertura de líquenes (Figura 26), igualmente, se trata de un depósito reciente.

El depósito de la estación 4, unidad A, no presenta disección, el espesor del suelo es de 3 centímetros, los clastos no están meteorizados y no están cubiertos por líquenes (Figura 27), consecuentemente también es un depósito reciente.

El depósito de la estación 5, también unidad A, tiene disección nula, el espesor del suelo es de 6

centímetros, grado de meteorización bajo, clastos bien preservados y sin cubierta de líquenes (Figura 27), se trata de un depósito reciente.

Finalmente, el depósito de la estación 6, correspondiente a la unidad A, no presenta disección, el espesor del suelo de 8 centímetros, los clastos conservan la forma, el grado de meteorización es bajo y no hay presencia de cubierta de líquenes (Figura 27), igualmente se trata de un depósito con edad relativa reciente.



Figura 26 Fotografías de las estaciones 2 y 3 (los números en la imagen indican la estación). Se puede observar que en los depósitos se presenta disección nula, meteorización baja, no hay presencia de líquenes y los clastos están preservados (como lo resalta los

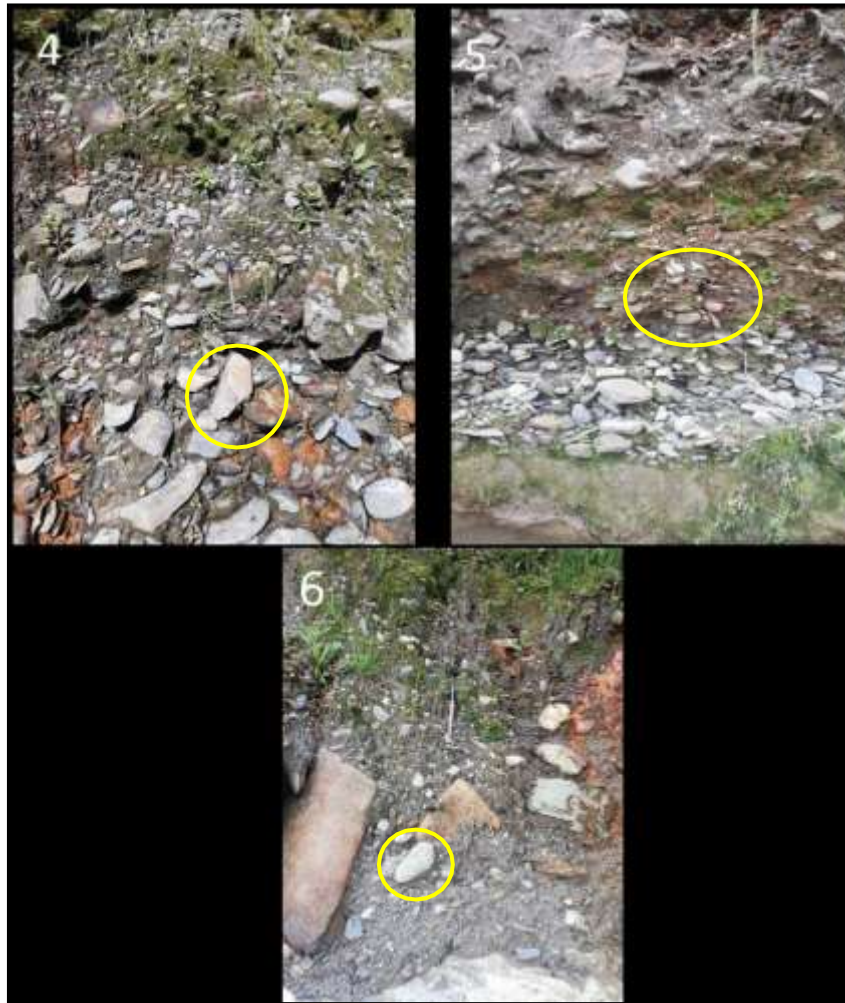


Figura 27 Estaciones 4, 5 Y 6. Los números en la imagen indican que la fotografía fue tomada en la estación de campo, muestra depósitos con disección nula, meteorización baja, sin presencia de líquenes y con los clastos preservados (como lo resalta los círculos amarillos), edad relativa reciente.

Según lo anterior, se concluye que el depósito más antiguo es el de la Estación 1 de la Unidad A, respecto a las otras estaciones, con una edad relativa de madura a reciente. Por otro lado, las demás estaciones de la Unidad A, tienen una edad relativa reciente.

Es importante resaltar que, con base en lo encontrado en campo en la zona de estudio, no se encontraron depósitos con una edad relativa antigua.

Un análisis similar se hizo para la Unidad B, observándose características similares en cuanto a los parámetros tenidos en cuenta para establecer la edad relativa; no se encuentran variaciones significativas con respecto a lo encontrado en la Unidad A, por lo tanto, también se le asigna una edad reciente.

Debido a las características observadas en la Unidad C, los parámetros a tener presente no son útiles para establecer la edad, se requiere de otra información para definirla. Como se planteó anteriormente, la relación con las otras unidades no es clara; aparentemente, la existencia de una estratificación bien definida y que se presenta con algo de compactación, induce a pensar en una edad anterior a la de las unidades A y B, pero es algo especulativo por el momento.

14. Discusión y evaluación de la torrencialidad

La caracterización sedimentológica realizada con la metodología propuesta en este estudio, es de gran ayuda para entender los procesos ocurridos y debe integrarse con estudios geomorfológicos, meteorológicos e hidrológicos para establecer con mayor certeza las probabilidades de existir avenidas torrenciales.

Las unidades que integran la cuenca estudiada, particularmente las unidades A y B, están asociadas a flujos gravitacionales y parecen haber algunos indicios, no definitivos, para correlacionarlas con avenidas torrenciales.

En la Unidad A se encuentran procesos que indican una probable correlación con avenidas torrenciales principalmente aquellas que tienen presencia de estructuras asociadas con el agua, por ejemplo, la imbricación. Además, los depósitos, en general son desordenados con tamaño de grano de bloques en menor proporción, gravas, arenas y lodos heterogéneos, flotando en una matriz con tamaño de grano frecuentemente arena media a fina, clastos angulares a subangulares y masivos. Las facies particularmente asociadas con los mencionados son Gmm y Gcm, sin embargo, no se puede afirmar con certeza absoluta la existencia de avenidas torrenciales, ya que no se encuentra gran cantidad de bloques, que comúnmente caracterizan este tipo de procesos. Esta ausencia se puede deber bien sea, a que la competencia del proceso no fue suficiente para llevar tamaño bloque o bien sea que la fuente no aportó material de este tamaño.

Según lo observado en el mapa de pendientes (Figura 28), la pendiente asociada a la zona de estudio es baja, en promedio menor a 45°, ocasionalmente se observan pendientes mayores. Según lo establecido por diversos autores (Archer y Fowler, 2018, Caballero, 2011) lo más común es que los eventos de avenidas torrenciales se desencadenen en pendientes altas, lo que no sucede en el caso de

estudio; si se presentan en pendientes

bajas, como en este caso, la intensidad de la lluvia debe ser suficientemente alta para ocasionar una avenida torrencial (Archer & Fowler, 2018); es de anotar que no hay registros históricos de precipitaciones altas, que hubieran podido detonar dicho evento, como se expone a continuación

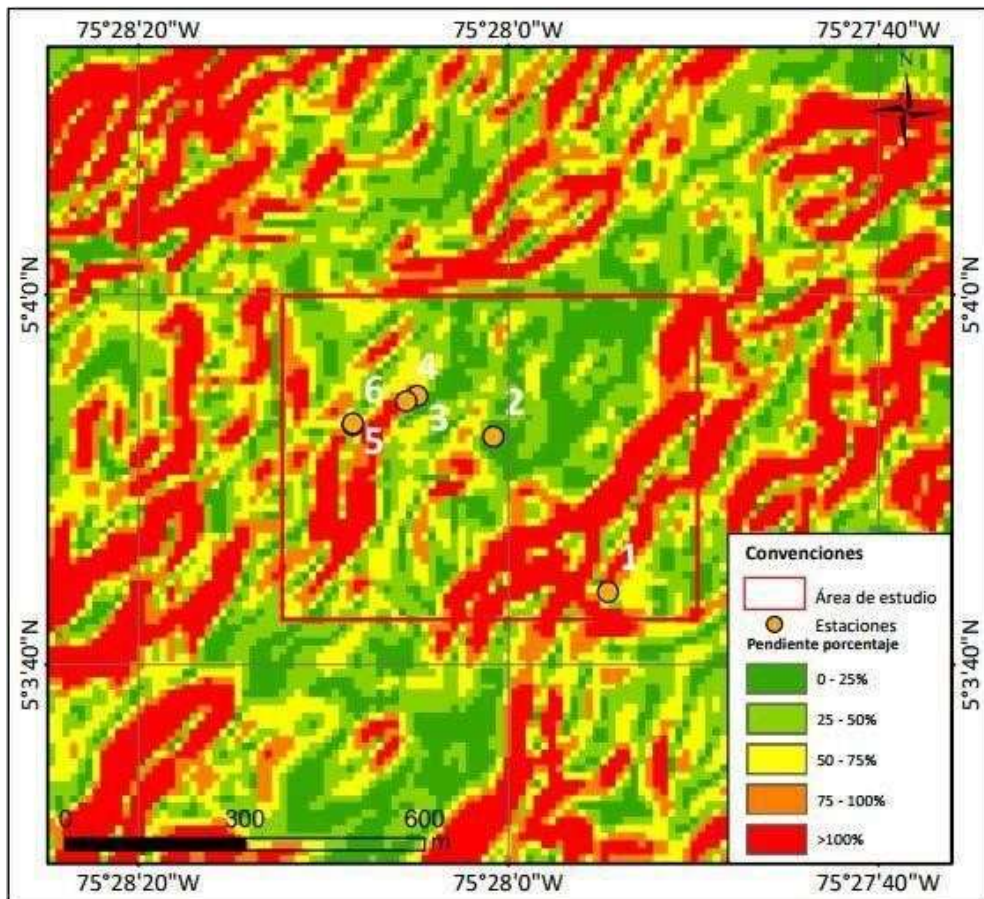


Figura 28 Mapa de pendientes de la zona de estudio, las franjas rojas representan la pendiente en porcentaje mayor al 100%, indicando que el ángulo de pendiente es de 45°. Los demás porcentajes indican que la pendiente es menor a 45°, lo cual una baja pendiente es en los porcentajes 0-25%.

De acuerdo con lo reportado por el SIMAC (2013), para los últimos cuatro años, los máximos valores registrados son 251mm en mayo de 2017, en octubre de 2017, tomados de la estación El Mirador (Figura 6). Si bien, los datos registran un intervalo muy reducido de tiempo, extrapolándolos se podría concluir que la precipitación no ha sido suficientemente alta para desencadenar avenidas torrenciales.

Adicionalmente, no hay registro histórico en noticias de los medios de información o por relatos de los pobladores de la zona, de la ocurrencia de un evento catastrófico que tengan las características propias de avenidas torrenciales; esto indica que, si se dio este evento en el área estudiada se dio con una anterioridad mayor a 100 años.

En cuanto a la Unidad B, no hay evidencia de acción importante del agua, por lo cual se sugiere que son procesos fundamentalmente gravitacionales, no necesariamente asociados con avenidas torrenciales. Sin embargo, tienen importancia desde el punto de vista ambiental ya que indica que en la zona ha habido flujos hiperconcentrados, flujos pseudoplásticos y a flujos de escombros, que pueden implicar pérdidas de vidas y afectaciones materiales.

La Unidad C es de gran importancia estratigráfica, como se habló anteriormente, pero sin importancia en cuanto a avenida torrencial, se formó a partir de procesos piroclásticos que aportaron material a corrientes que retrabajaron ese producto piroclástico, esta interacción produjo laminaciones paralelas en un régimen de flujo superior. Por tal motivo sugerimos un estudio específico y más detallado, ya que puede llegar a ser de gran importancia su presencia en la geología regional.

Es factible que en la zona de estudio hayan interactuado, tanto procesos gravitacionales como asociados a acción de la corriente, como se puede plantear teniendo en cuenta la presencia, aunque aislada, de imbricación, pero como se anotó no se puede asociarlo a eventos de avenidas torrenciales con total certeza.

Teniendo en cuenta que la Unidad A se encuentran procesos que indican una probable relación con avenidas torrenciales, se determina que los depósitos estudiados corresponden a una torrencialidad entre mínima (más probablemente) a baja (menos probable). Según la propuesta de Parra et al., (1995), que establecen las siguientes categorías:

- **Torrencialidad alta:** Incluye las cuencas con cuatro o más depósitos torrenciales.
- **Torrencialidad moderada:** Incluye las cuencas con dos y tres depósitos torrenciales.

- **Torrencialidad baja:** Las cuencas con un registro de un eventotorrencial.
- **Torrencialidad mínima:** No se encontraron depósitos que indican eventos catastróficos, pero no significa que no haya sucedido, sino que pudieron haber sido erodados.

En concreto, no se encontraron evidencias claras de depósitos asociados con avenidas torrenciales, aunque existe la probabilidad de una presencia aislada de ellas. Es probable que los depósitos producidos por avenidas torrenciales se hayan erosionado o que las características sedimentológicas no corresponden a las frecuentemente asociadas con ese tipo de eventos.

En conclusión, es posible que la cuenca de la quebrada Minitas haya tenido un evento de avenida torrencial, según las características sedimentológicas observadas. Los depósitos encontrados corresponden casi exclusivamente a flujos de lodo y flujos de escombros. No se descarta que se hayan presentado ocasionalmente avenidas torrenciales, asociados a la Unidad A, en los que se tiene evidencias de acción de agua, pero no se demuestra la existencia de agente desencadenante capaz de producir un evento, ya de esas características que no se puede correlacionar claramente con precipitaciones altas.

15. Conclusiones

- Se establecieron tres unidades informales. La Unidad A, con un espesor promedio de 2.0 metros, es discordante con el basamento y disconforme con la Unidad B, constituida por clastos desde guijos hasta guijarros. La Unidad B, con espesor de 3.0 m, compuesta por clastos hasta de tamaño bloque, geometría irregular; el contacto con la Unidad C es incierto. La Unidad C tiene un espesor de 0.70 m, está compuesta por arenitas finas volcánicas.
- Las facies encontradas fueron: Gmm1 (gravas masivas matriz soportadas con tamaño guijo a guijarro) y Gmm2 (gravas masivas matriz soportadas con tamaño guijo a guijarro, con imbricación), interpretadas como flujos gravitacionales con alta concentración de sedimentos y viscoso; facies

Gcm1(gravas masivas clastos soportadas de tamaño guijos a guijarros) y Gcm2 (gravas masivas clastos soportadas de tamaño guijos a bloques), generadas por flujos gravitacionales con altas concentración de sedimentos y descarga ; la facies Gt (gravas con estratificación inclinada festoneada), asociada con migración de barras de gravas en un régimen de flujo inferior a intermedio y facies Sh (arenas con laminación paralela) producida en un régimen de flujo superior.

- El resultado del análisis granulométrico indica depósitos mal seleccionados a muy mal seleccionados, positivamente asimétricos a muy positivamente asimétricos y leptokúrticos a platikúrticos. La interpretación de los parámetros estadístico es coherente con un origen a partir de flujos gravitacionales.
- La edad relativa de las Unidades A y B a partir de los criterios encontrados en campo, indica que son recientes; para la Unidad C no se tuvo un resultado concluyente.
- De las unidades estudiadas, sólo en la Unidad A hay probabilidad de que hayan actuado avenidas torrenciales, ya que en ocasiones se tienen la coexistencia de flujos gravitacionales y estructuras relacionadas con flujo de corriente. Sin embargo, no se han encontrado características comúnmente presentes en depósitos de avenida torrenciales, tales como la existencia abundante de bloques.
- La existencia de agente desencadenante capaz de producir avenidas torrenciales, tal como altas precipitaciones no parece darse, si se tiene en cuenta los datos hidrometeorológicos disponibles; adicionalmente, la pendiente establecida es baja. Por tanto, la posibilidad de que se relacione una avenida torrencial es mínima.
- En conclusión, la torrencialidad de la zona estudiada es de mínima a baja.

- La integración de la sedimentología, meteorología y geomorfología, permitió establecer de una manera más confiable la probable existencia de avenidas torrenciales en la zona de estudio.

Bibliografía

- Abdullatif, O.M. (1989) Channel-fill and sheet-flood facies sequences in the ephemeral terminal River Gash, Kassala, Sudan. *Sed. Geol.*, 63, 171-184.
- Alarcón Alba, N. A., Bernal Calderón, P. A., & Rivera Quintero, L. X. (2017). Metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial a escala 1: 2000.
- Alexander, J., & Cooker, M. J. (2016). Moving boulders in flash floods and estimating flow conditions using boulders in ancient deposits. *Sedimentology*, 63(6), 1582-1595.
- Allen, P.A. (1981) Sediments and processes on a small stream-flow dominated, Devonian alluvial fan, Shetland Islands. *Sed. Geol.*, 29, 31-66.
- Archer, D. R., & Fowler, H. J. (2018). Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S121-S133.
- Blair, T. C. (1999). Cause of dominance by sheetflood vs. debris-flow processes on two adjoining alluvial fans, Death Valley, California. *Sedimentology*, 46(6), 1015-1028.
- Blair, T. C., & McPherson, J. G. (2009). Processes and forms of alluvial fans. In *Geomorphology of desert environments* (pp. 413-467). Springer, Dordrecht.
- Borrero, C. Naranjo, J.L., (1990). Casabianca Formation: a Colombian example of volcanism-induced aggradation in a fluvial basin. *Jour. of Volc. and Geoth. Res.*, 41: 253- 267.
- Botero, G. A. y H. González, (1983). Algunas localidades fosilíferas cretáceas de la Cordillera Central, Antioquia y Caldas, Colombia: *Geología Norandina*, v. 7, p. 15-28.

- Caballero, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45-50
- Castelltort F. Xavier Aiguabella¹, Josep Carles Balasch Solanes, Jordi Cirés Fortuny y Ferran Colombo Piñol (2018) Flash floods pleistocenos en la Depresión Central Catalana (Cuenca del Ebro) *Geogaceta*, 63, 2018 páginas 11-14
- Cruden, David M., y D. J. Varnes. (1996). "Landslide Types and Processes, Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences." Special Report - National Research Council, Transportation Research Board 247: 36-75.
- DeCelles PG, Gray MB, Ridgway KD, Cole RB, Pivnik DA, Pequera N, Srivastava P (1991) Controls on synorogenic alluvial-fan architecture, Beartooth Conglomerate (Paleocene), Wyoming and Montana. *Sedimentology* 38: 567-590
- Etayo-Serna, F. (1985). Documentación paleontológica del infracretácico de San Felix y Valle Alto, Cordillera Central. En F. Etayo-Serna, F. Laverde, (eds), Proyecto Cretácico, V. 16: Bogotá, Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas.
- Florez, A. (1986). Geomorfología del área Manizales, Chinchina, Cordillera Central, Colombia (Vol. 9). Ministerio de Hacienda y Crédito. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Investigación y Divulgación Geográfica.
- Gao, C., Ji, Y., Wu, C., Jin, J., Ren, Y., Yang, Z. & Zhou, Y. (2020). Facies and depositional model of alluvial fan dominated by episodic flood events in arid conditions: An example from the Quaternary Poplar Fan, north-western China. *Sedimentology*, 67(4), 1750-1796.
- Gómez-Cruz, A. D. J., Sánchez, M. M., & Pardo-Trujillo, A. (1995). Edad y origen del "complejo metasedimentario Aranzazu-Manizales" en los alrededores de Manizales (departamento de Caldas, Colombia). *Geología Colombiana*, 19, 83-93.

- Gonzales, H. (1990). INGEOMINAS, mapa geológico generalizado de Caldas.
<http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040002159/Mapa/pdf/0101021591>

30

001.pdf

- Gonzales, H. (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Boletín Geológico, 23(1), 3-174.
- González, H. (2001). Mapa geológico del departamento de Antioquia, escala 1:400.000, memoria explicativa. INGEOMINAS, 240p.
- González, J. L., Hermelin, M., & Cháves, O. A. (2005). Aspectos geomorfológicos de la avenida torrencial del 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados. Desastres de Origen Natural En Colombia, 1979-2004, 135. Herrera, J.S. y López, S.A. (2003). Estratigrafía de la Formación Manizales y Propuesta de un modelo de depósito. Trabajo de Grado, Universidad de Caldas, Programa de Geología, Manizales. 91 p.
- Iverson, Richard M. (1997). "The Physics of Debris Flows." Reviews of Geophysics 35 (3): 245-296. doi: [10.1029/97RG00426](https://doi.org/10.1029/97RG00426).
- Laming, D. J. C. (1966). Imbrication, paleocurrents and other sedimentary features in the lower New Red Sandstone, Devonshire, England. Journal of Sedimentary Research, 36(4), 940-959.
- Maya, M., y González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Boletín Geológico, 35 (2-3): 43-57.
- Mejía, V., Sánchez-Duque, A., Opdyke, N., Huang, K., Rosales, A., and Agudelo, C. (2011). Volcano- Tectonic implications for the Ruiz-Tolima Volcanic Complex based on paleomagnetic data. Biennial Meeting of LATINMAG (Latin -American Association of Paleomagnetism and Geomagnetism), Tandil, Argentina.

- Méndez, R. y Patiño, J. (2003). El Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín. IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín, Resúmenes, 140 p.
- Miall, A. D. (1996). "The geology of fluvial deposits. Sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology". Berlin, Springer.
- Montoya, L. J., Silva, S. M., & González, J. E. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada Doña María. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 8(15), 11-29.
- Naranjo, J. L., & Ríos, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. Revista Universidad de Caldas, 10(1-3), 113. -
Nelson, H. (1957). Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. Leidse Geologische Mededelingen. 22: 1-76.
- Nemec, W.; Steel, R.J. (1984). Alluvial and coastal conglomerates: their significant features and some comments on gravelly mass-flow deposits. In Sedimentology of Gravels and Conglomerates (Koster, E.H.; Steel, R.J.; editors), Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 10: 1-31.
- Nettleton, I. M., S. Martin, S. Hencher, y R. Moore. (2005). "Debris Flow Types and Mechanisms." En Scottish Road Network Landslides Study, editado por M. G. Winter, F. Macgregor y L. Shackman, 25-44. The Ecottish Executive. Consultado el 17 de noviembre de 2017. <https://www2.gov.scot/resource/doc/55971/0015351.pdf>
- Olsen, H. (1987) Ancient ephemeral stream deposits: a local terminal fan model from the Bunter Sandstone Formation (L. Triassic) in the Tonder-3, -4 and -5 wells, Denmark. Geol. Soc. Spec. Publ., 35, 69-86.

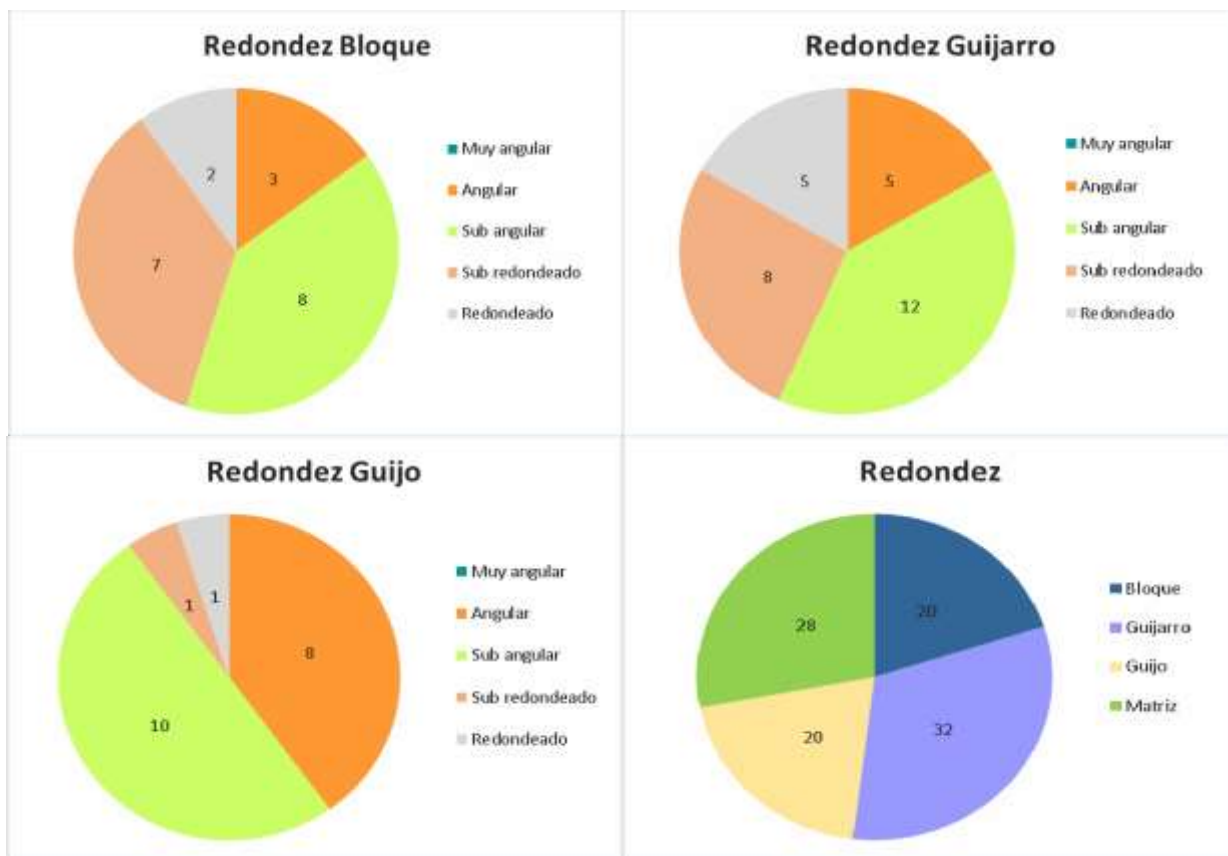
- Parra, E., Viana, R., González, M. (1995). Metodología para la evaluación de la torrencialidad caso Oriente Antioqueño. Memorias Congreso Colombiano de Geología
- Pierson, T. C., & Scott, K. M. (1985). Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water resources research*, 21(10), 1511-1524.
- Ramirez, L. A. (2019). Origen y características de los flujos torrenciales, del río. Ibagué – Tolima: Informe Universidad del Tolima.
- Reading, HG (1996) Ambientes sedimentarios: Procesos, facies y estratigrafía. 3ª edición, Blackwell Science, Oxford, 688 p.
- Rhee, Jo, H.R., C.W. and Chough, S.K. (1997) Distinctive characteristics of streamflow-dominated alluvial fan deposit: Sanghori area, Kyongsang Basin (Early Cretaceous), southeastern Korea. *Sed. Geol.*,110, 51-79.
- Rivas, M., De Cabezas, Y. O., Soto, A. C., Ramirez, G., González, R., & González, J. L.(2009). Determinacion de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocoties, Merida, Venezuela. *La Revista Forestal Venezolana*, 53(1), 33-42.
- SIMAC. (2013). Estaciones hidrometeorológicas para la gestión del riesgo por deslizamientos en Manizales. Informe Universidad Nacional De Colombia, Sede Manizales.
- Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Bucaramanga: Geotecnología S.A.S. Obtenido de www.erosion.com.co

Anexos

Se anexa la información detallada de la granulometría para todas las estaciones.

Anexo A. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 1.

- Conteo por la técnica de la malla



- Datos de análisis granulométrico de matriz

Tabla de análisis granulométrico de matriz				
Tamaño	Unidades Φ	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado
>2	<-1 Φ	7.78	15.730	15.730
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	6.11	12.353	28.083
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	10.6	21.431	49.515
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	13.04	26.365	75.879
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	7.97	16.114	91.994

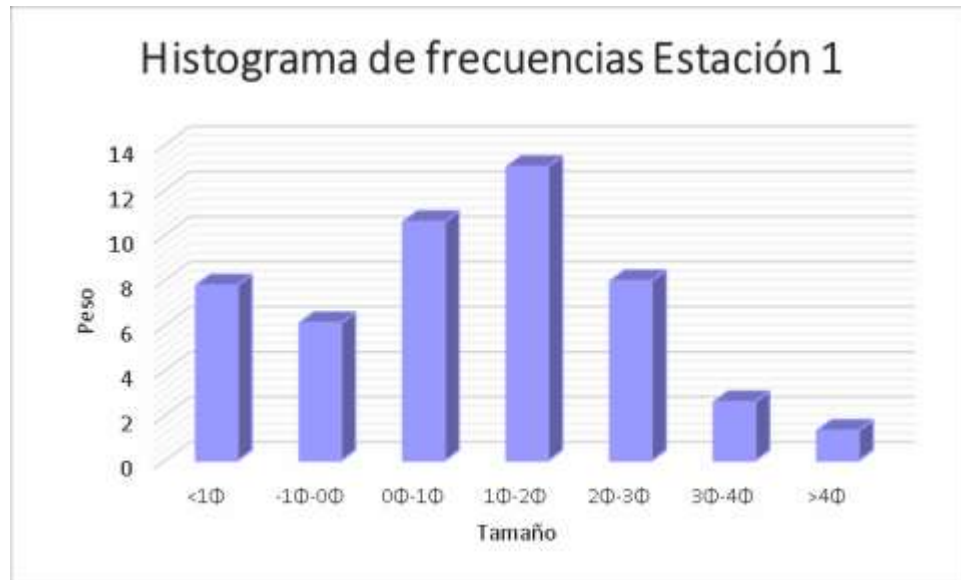
0.0625 – 0.125	3Φ - 4Φ	2.6	5.257	97.250
<0.0625	>4Φ	1.33	2.689	99.939
Peso total		49.43	100	

Peso perdido	0.57			
---------------------	-------------	--	--	--

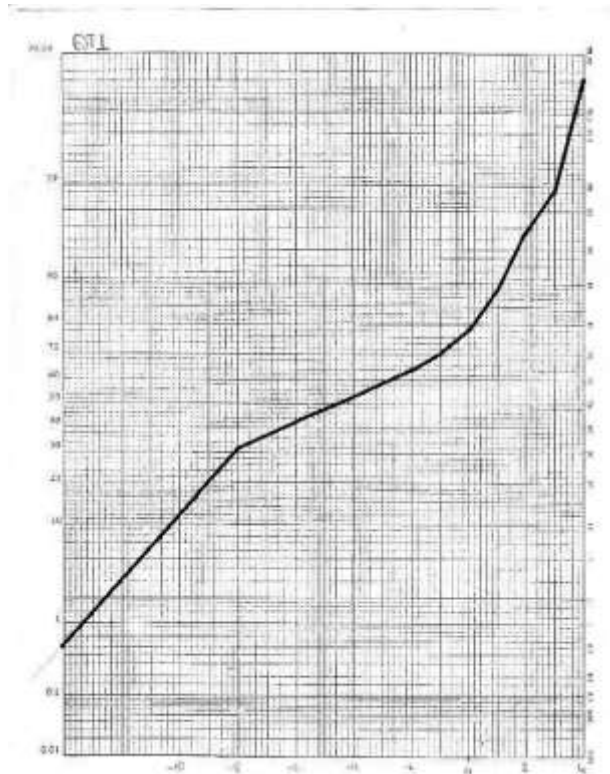
- Resultados del análisis granulométrico

Tabla para análisis granulométrico			
Tamaño	Unidades Φ	Porcentaje	Porcentaje acumulado
256 – 64	-8 Φ - -6 Φ	30	30
64 – 4.0	-6 Φ - -2 Φ	12	42
4.0 – 2.0	-2 Φ - -1 Φ	22.6	64.6
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	5.188	69.788
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	9	78.788
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	11.073	89.861
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	6.767	96.628
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	2.207	98.835
<0.0625	>4 Φ	1.129	99.964
	Total	99.964	

- Histograma de frecuencia: los datos graficados corresponden a las columnas Tamaño y Peso que se encuentran en la Tabla de análisis granulométrico de matriz.



- Curvas de frecuencia acumulada con escala de semi probabilidades



- Datos graficados en la curva de frecuencias

Parámetros estadísticos (mm)			Medidas de uniformidad (Φ)	Medidas de simetría (Φ)	Medidas de angulosidad (Φ)
Moda	Media	Mediana	Selección	Skewness	Kurtosis
2 - 1	20.6299249	18.3791737	4.361363636	0.31	0.573954895

Anexo B. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 2.

- Conteo por la técnica de la malla



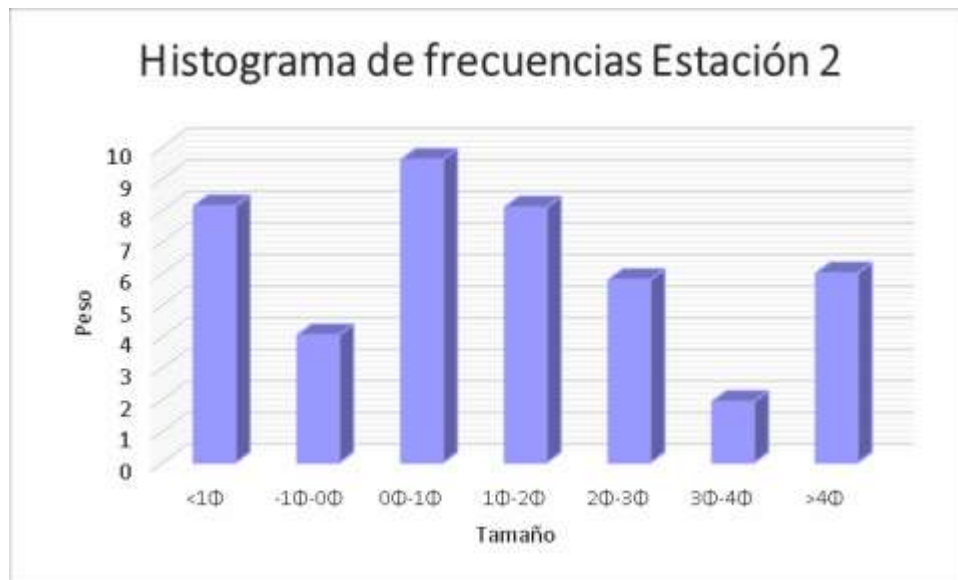
- Datos de análisis granulométrico de matriz

Tabla de análisis granulométrico de matriz				
Tamaño	Unidades Φ	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado
>2	<-1 Φ	8.13	18.65534649	18.65534649
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	4.04	9.27030748	27.92565397
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	9.6	22.02845342	49.95410739
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	8.09	18.56356127	68.51766866
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	5.79	13.28591097	81.80357962
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	1.93	4.428636989	86.23221661
<0.0625	>4 Φ	6	13.76778339	100
Peso total		43.58	100	
Peso perdido		6.42		

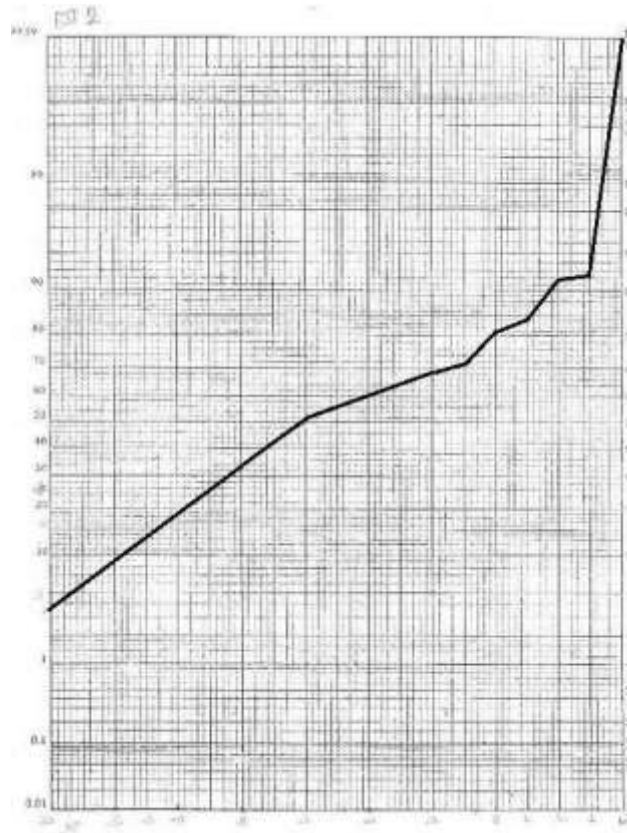
- Resultados del análisis granulométrico

Tabla para análisis granulométrico			
Tamaño	Unidades Φ	Porcentaje	Porcentaje acumulado
256 – 64	-8 Φ - -6 Φ	33	33
64 – 4.0	-6 Φ - -2 Φ	18	51
4.0 – 2.0	-2 Φ - -1 Φ	17.275	68.275
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	3.615	71.89
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	8.5909	80.4809
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	7.2395	87.7204
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	5.1811	92.9015
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	1.7269	94.6284
<0.0625	>4 Φ	5.3691	99.9975
	Total	99.9975	

- Histograma de frecuencia: los datos graficados corresponden a las columnas Tamaño y Peso que se encuentran en la Tabla de análisis granulométrico de matriz.



- Curvas de frecuencia acumulada con escala de semi probabilidades

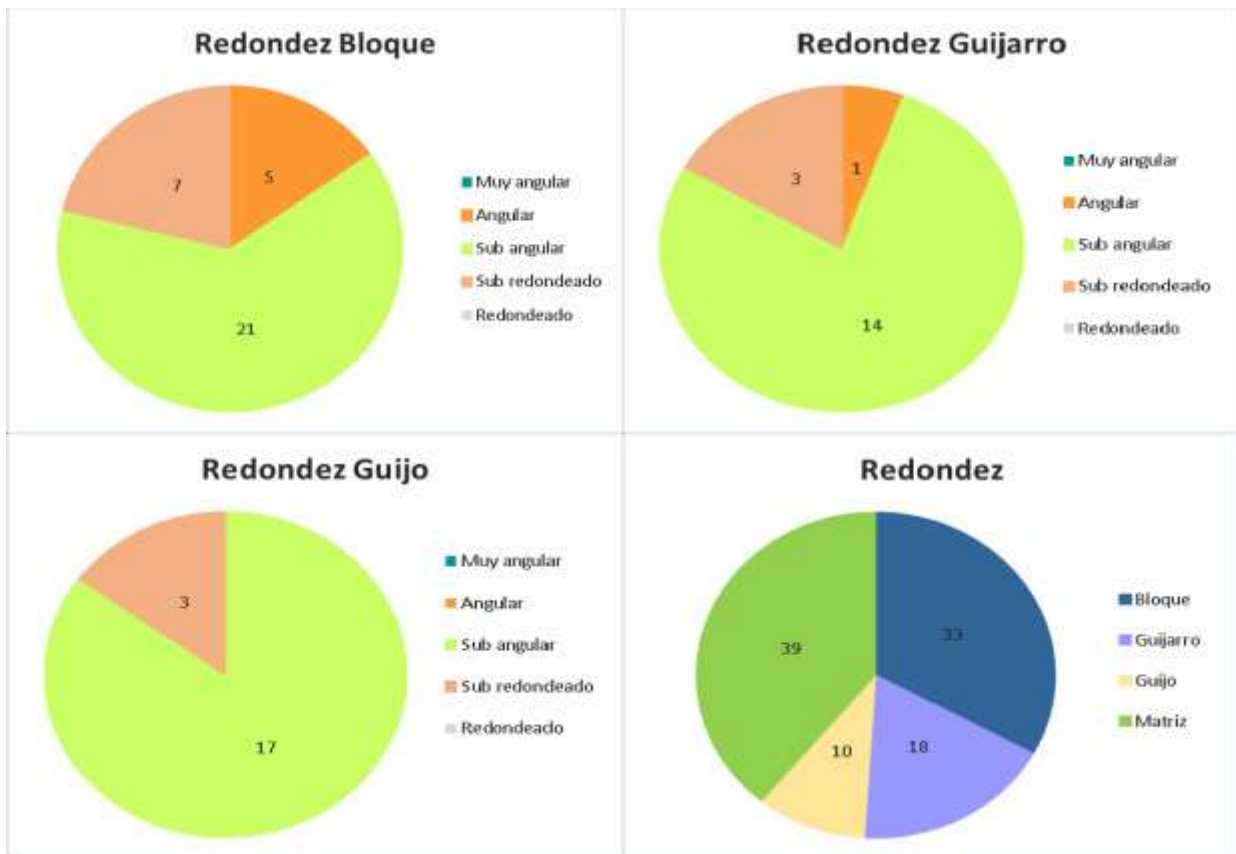


- Datos graficados en la curva de frecuencias

Parámetros estadísticos (mm)			Medidas de uniformidad (Φ)	Medidas de simetría (Φ)	Medidas de angulosidad (Φ)
Moda	Media	Mediana	Selección	Skewness	Kurtosis
4 – 2	38.4968012	78.7932425	5.314393939	0.13	0.7135097768

Anexo C. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 3.

- Conteo por la técnica de la malla



- Datos de análisis granulométrico de matriz

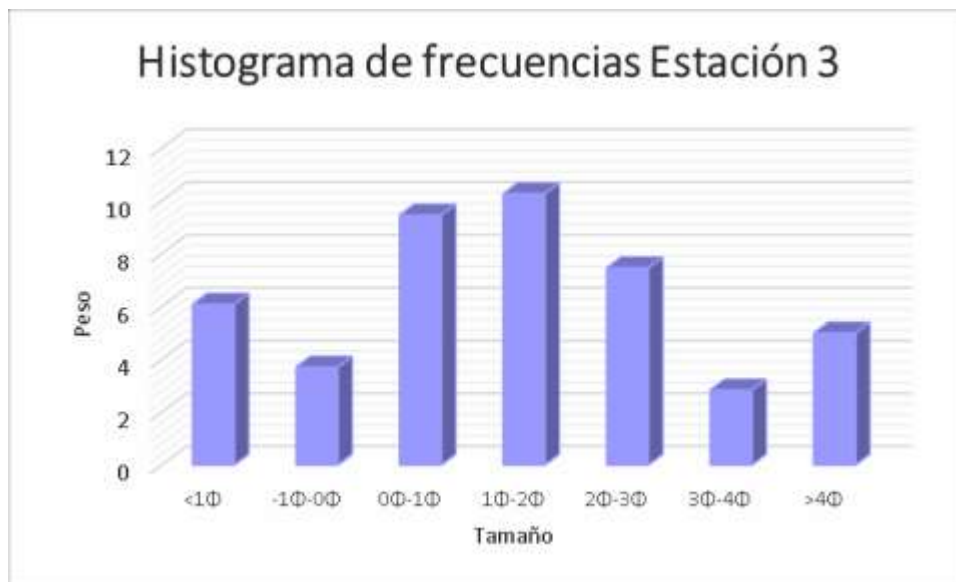
Tabla de análisis granulométrico de matriz				
Tamaño	Unidades Φ	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado
>2	<-1 Φ	6.08	13.57445858	13.57445858
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	3.7	8.260772494	21.83523108
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	9.46	21.12078589	42.95601697
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	10.27	22.92922527	65.88524224
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	7.46	16.65550346	82.5407457
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	2.83	6.318374637	88.85912034
<0.0625	>4 Φ	4.99	11.14087966	100
Peso total		44.79	100	
Peso perdido		5.21		

- Resultados del análisis granulométrico

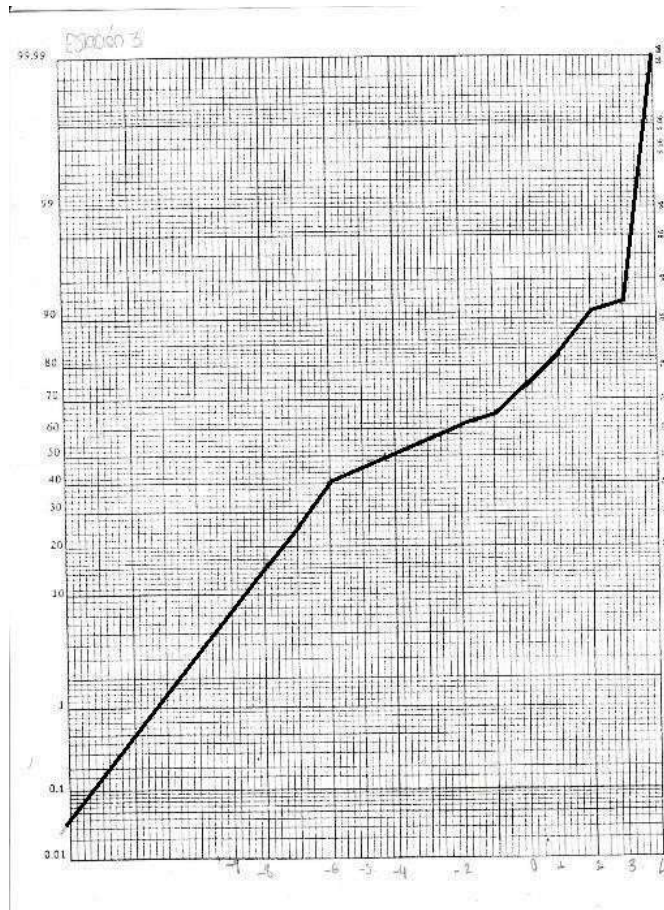
Tabla para análisis granulométrico			
Tamaño	Unidades Φ	Porcentaje	Porcentaje acumulado
256 – 64	-8 Φ - -6 Φ	15	15
64 – 4.0	-6 Φ - -2 Φ	25	40

4.0 – 2.0	-2Φ - -1Φ	21.108	61.108
1.0 – 2.0	-1Φ - 0Φ	3.717	64.825
0.5 – 1.0	0Φ - 1Φ	9.504	74.329
0.25 – 0.5	1Φ - 2Φ	10.318	84.647
0.125 – 0.25	2Φ - 3Φ	7.4949	92.1419
0.0625 – 0.125	3Φ - 4Φ	2.843	94.9849
<0.0625	>4Φ	5.013	99.9979
	Total	99.9979	

- Histograma de frecuencia: los datos graficados corresponden a las columnas Tamaño y Peso que se encuentran en la Tabla de análisis granulométrico de matriz.



- Curvas de frecuencia acumulada con escala de semi probabilidades

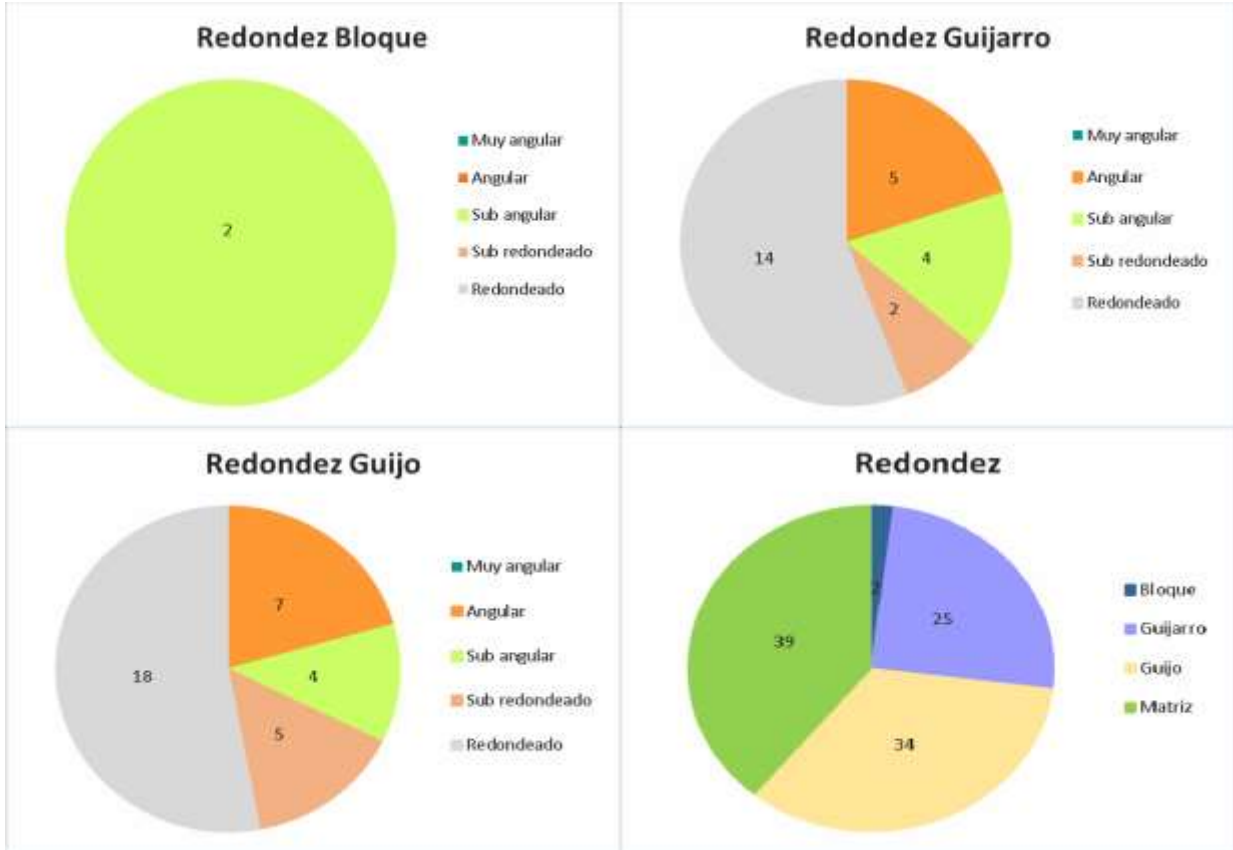


- Datos graficados en la curva de frecuencias

Parámetros estadísticos (mm)			Medidas de uniformidad (Φ)	Medidas de angulosidad (Φ)
Moda	Media	Mediana	Selección	Kurtosis
4 - 2	13.6106745	19.6983106	4.109090909	0.7483962937

Anexo D. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 5.

- Conteo por la técnica de la malla



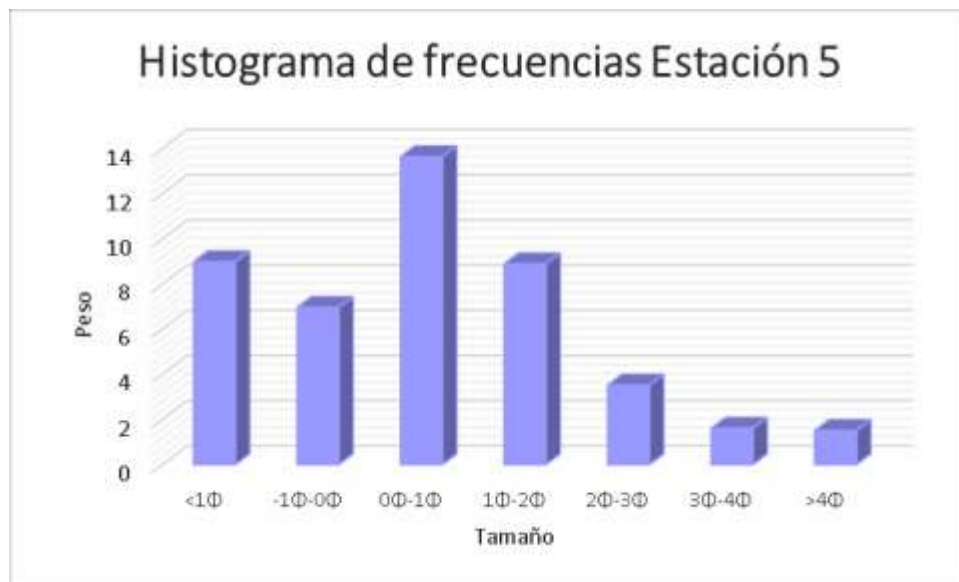
- Datos de análisis granulométrico de matriz

Tabla de análisis granulométrico de matriz				
Tamaño	Unidades Φ	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado
>2	<-1 Φ	8.97	19.91563055	19.91563055
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	6.95	15.43072824	35.34635879
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	13.63	30.26198934	65.60834813
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	8.88	19.71580817	85.32415631
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	3.51	7.793072824	93.11722913
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	1.6	3.552397869	96.669627
<0.0625	>4 Φ	1.5	3.330373002	100
Peso total		45.04	100	
Peso perdido		4.96		

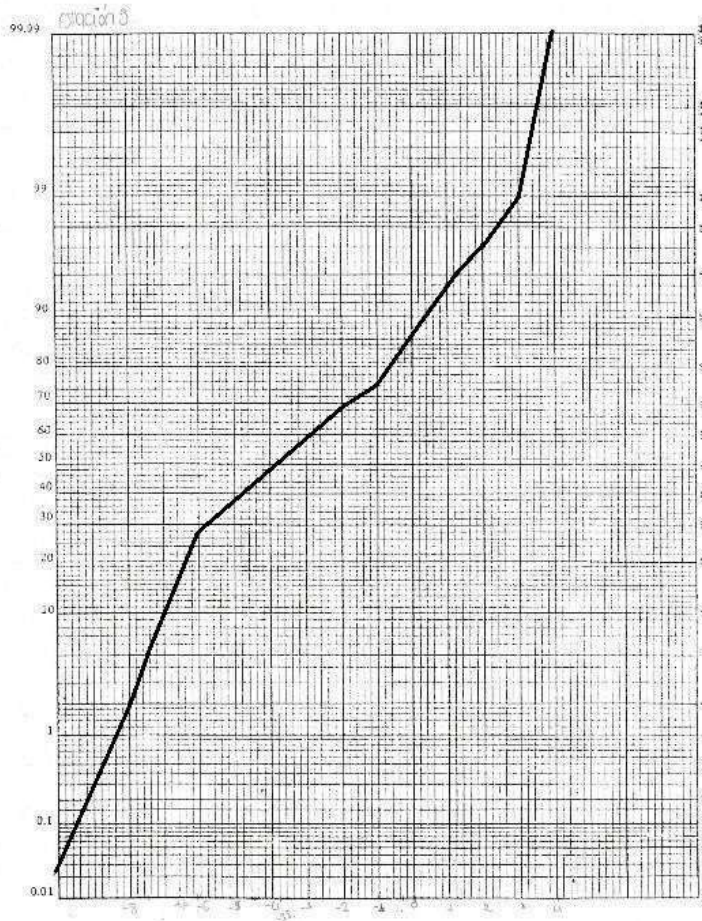
- Resultados del análisis granulométrico

Tabla para análisis granulométrico			
Tamaño	Unidades Φ	Porcentaje	Porcentaje acumulado
256 – 64	-8 Φ - -6 Φ	2	2
64 – 4.0	-6 Φ - -2 Φ	25	27
4.0 – 2.0	-2 Φ - -1 Φ	42	69
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	6.0177	75
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	11.8017	87
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	7.6888	94
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	3.039	97
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	1.3852	99
<0.0625	>4 Φ	1.2987	100
	Total	99.9311	

- Histograma de frecuencia: los datos graficados corresponden a las columnas Tamaño y Peso que se encuentran en la Tabla de análisis granulométrico de matriz.



- Curvas de frecuencia acumulada con escala de semi probabilidades

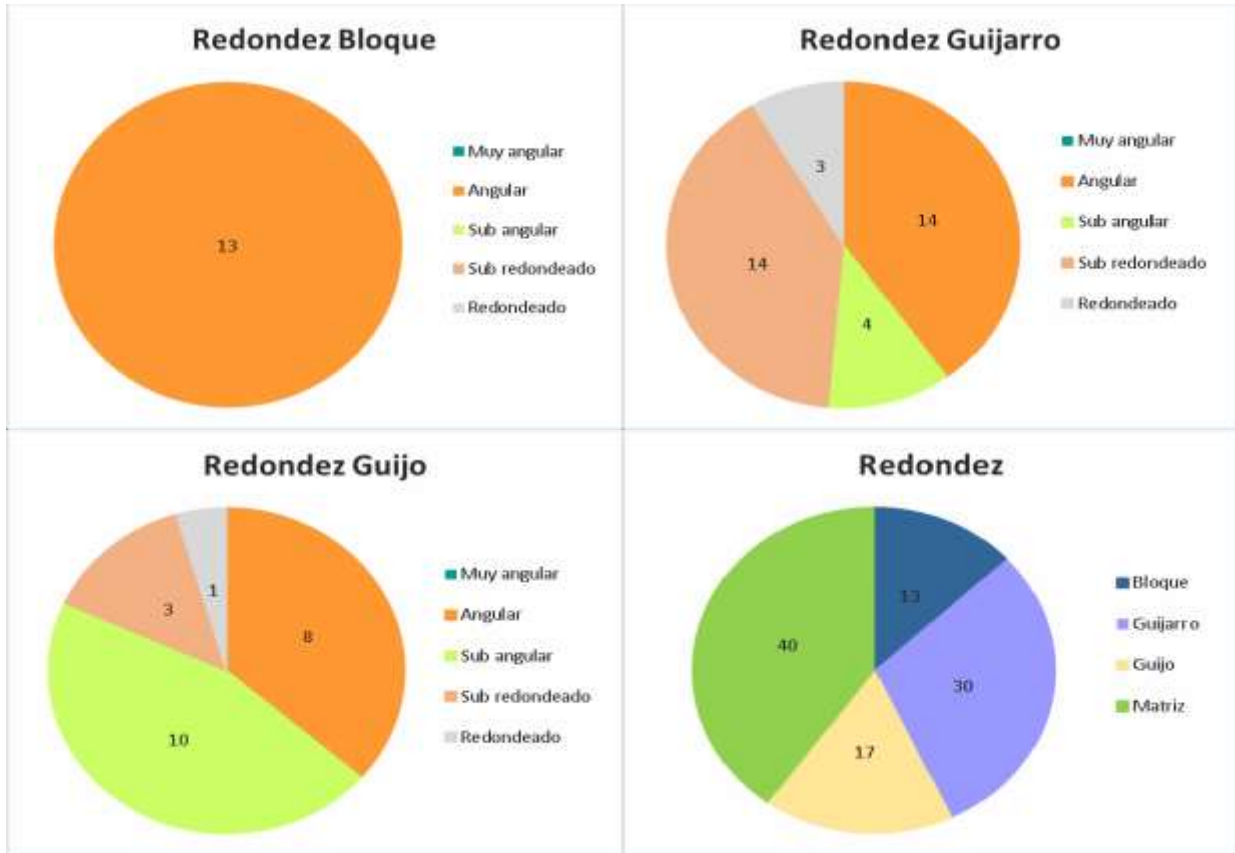


- Datos graficados en la curva de frecuencias

Parámetros estadísticos (mm)			Medidas de uniformidad (Φ)	Medidas de angulosidad (Φ)
Moda	Media	Mediana	Selección	Kurtosis
4 - 2	11.8487804	13.928809	2.908333333	0.7141697776

Anexo E. Resultados de la granulometría para las muestras de la estación 6.

- Conteo por la técnica de la malla



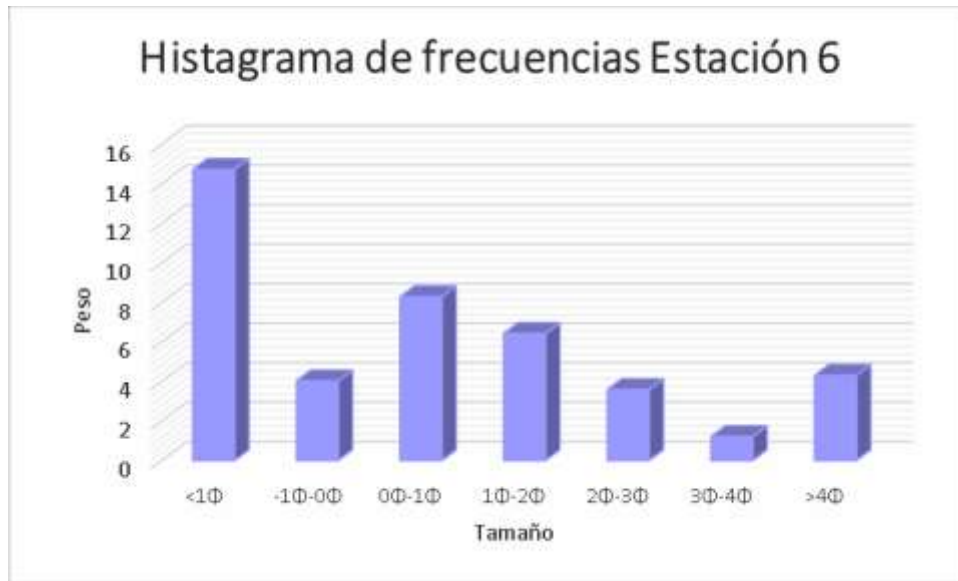
- Datos de análisis granulométrico de matriz

Tabla de análisis granulométrico de matriz				
Tamaño	Unidades Φ	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado
>2	<-1 Φ	14.72	34.61900282	34.61900282
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	4.02	9.454374412	44.07337723
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	8.28	19.47318909	63.54656632
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	6.42	15.09877705	78.64534337
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	3.58	8.419567262	87.06491063
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	1.2	2.822201317	89.88711195
<0.0625	>4 Φ	4.3	10.11288805	100
Peso total		42.52	100	
Peso perdido		7.48		

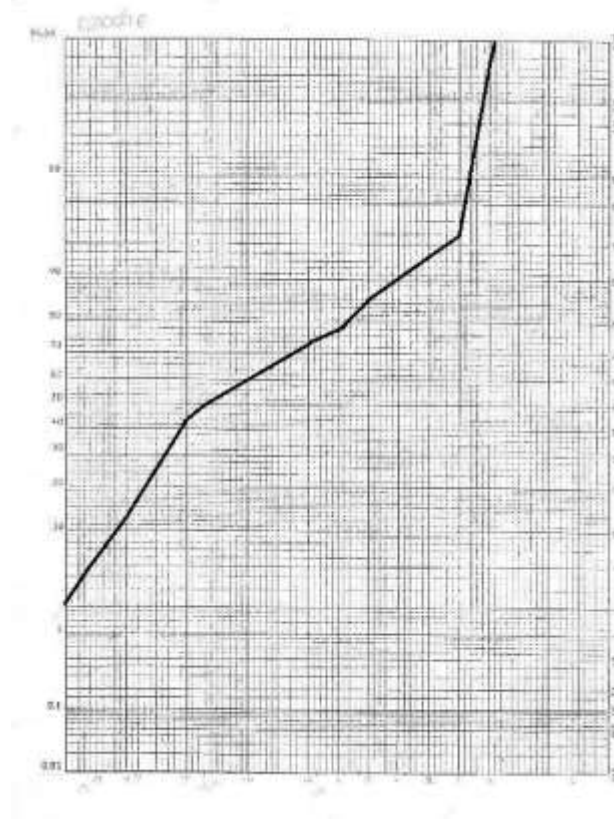
- Resultados del análisis granulométrico

Tabla para análisis granulométrico			
Tamaño	Unidades Φ	Porcentaje	Porcentaje acumulado
256 – 64	-8 Φ - -6 Φ	13	13
64 – 4.0	-6 Φ - -2 Φ	30	43
4.0 – 2.0	-2 Φ - -1 Φ	30.84	73.84
1.0 – 2.0	-1 Φ - 0 Φ	3.781	77.621
0.5 – 1.0	0 Φ - 1 Φ	7.7892	85.4102
0.25 – 0.5	1 Φ - 2 Φ	6.0392	91.4494
0.125 – 0.25	2 Φ - 3 Φ	3.3676	94.817
0.0625 – 0.125	3 Φ - 4 Φ	1.1288	95.9458
<0.0625	>4 Φ	4.044	99.9898
	Total	99.9898	

- Histograma de frecuencia: los datos graficados corresponden a las columnas Tamaño y Peso que se encuentran en la Tabla de análisis granulométrico de matriz.



- Curvas de frecuencia acumulada con escala de semi probabilidades



- Datos graficados en la curva de frecuencias

Parámetros estadísticos (mm)		Medidas de uniformidad (Φ)	Medidas de simetría (Φ)	Medidas de angulosidad (Φ)
Media	Mediana	Selección	Skewness	Kurtosis
22.1106061	42.2242531	3.577272727	0.35	1.415797317

