

2019

ESTUDIO DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN LA QUEBRADA EL ROLLO MUNICIPIO DE SAN BERNARDO



Equipo Gestión Ambiental del Riesgo
Subdirección de Conocimiento y Evaluación
Ambiental
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE
NARIÑO

**ESTUDIO DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN LA QUEBRADA EL
ROLLO MUNICIPIO DE SAN BERNARDO**

Elaboró:

Myriam Patricia Colimba Piarpuezan

Ing. Agroforestal

Dania Sofía Varona Bravo

Geóloga

Brayan Julian Torres Chazatar

Ing. Mecánico – Mg Ingeniería Hidráulica

Mario Alexander Guerrero Ortega

Geógrafo

Asesoró:

Juan Guillermo Delgado Noguera

Geólogo

Francisco Mafla Chamorro

Ing. Sanitario – Mg

Aprobó:

María Nathalia Moreno Santander

Subdirectora de Conocimiento y Evaluación Ambiental

Hugo Mideros López

Directo general COPORNARIÑO

INTRODUCCIÓN

En el marco de la Ley 1523 de 2012 Artículo 31 “*LAS CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES EN EL SISTEMA NACIONAL. Las corporaciones autónomas regionales o de desarrollo sostenible, que para efecto de la presente ley se denominarán las corporaciones autónomas regionales, como integrantes del sistema nacional de gestión del riesgo, además de las funciones establecidas por la Ley 99 de 1993 y la Ley 388 de 1997 o las leyes que las modifiquen. Apoyarán a las entidades territoriales de su jurisdicción ambiental en todos los estudios necesarios para el conocimiento y la reducción del riesgo y los integrarán a los planes de ordenamiento de cuencas, de gestión ambiental, de ordenamiento territorial y de desarrollo.*”, y bajo el Decreto 1077 Sección 3 “**INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LOS PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL**”; la Corporación Autónoma Regional de Nariño, desde la Subdirección de Conocimiento y Evaluación ambiental, a través del equipo de Gestión Ambiental del Riesgo, se priorizó amenazas naturales que pueden presentarse dentro del departamento de Nariño, de esta manera se desarrolló un estudio piloto por avenidas torrenciales en la Microcuenca El Rollo del Municipio de San Bernardo a escala 1: 2000.

Se eligió esta zona para elaborar el estudio, debido a los diferentes eventos que se han presentado años atrás y a las eventualidades registradas por el equipo de Gestión ambiental del Riesgo en su labor de seguimiento mediante visitas técnicas de control y monitoreo en esta zona, lo cual ha permitido identificar y caracterizar los efectos adversos relacionados con dichos fenómenos naturales, que a su vez ocurren con mucha frecuencia.

Se resalta en esta zona la alta vulnerabilidad expuesta a la amenaza por avenidas torrenciales, considerando la ubicación geográfica del casco urbano, las condiciones geográficas y geológicas de la microcuenca y el efecto de las fuertes precipitaciones con volúmenes de agua que pueden ocasionar flujos torrenciales. Estas condiciones naturales de la zona, hacen que incremente la susceptibilidad de la población a este tipo de amenaza, adicionalmente se tiene que la Quebrada El Rollo es la principal fuente abastecedora del acueducto municipal, de esta forma el estudio de avenidas torrenciales toma relevancia como herramienta para los procesos de planificación y ordenamiento dentro del municipio de San Bernardo.

Teniendo en cuenta que para la elaboración de un estudio por avenidas torrenciales no se cuenta con una guía o una metodología establecida, se ha retomado las diferentes metodologías empleadas tanto en la academia como en las guías técnicas del Fondo de Adaptación e información disponible en otras entidades que trabajan respecto al tema.

El objeto del presente estudio, es evaluar el comportamiento de avenidas torrenciales y los factores que se involucran para que este fenómeno natural ocurra. Para esto se contó



con un equipo interdisciplinario que abarcó todos los campos comprendidos para determinar la amenaza.

A partir del estudio desarrollado se generó el presente documento técnico, el cual se divide en capítulos dentro de los cuales se encuentra.

Tabla de contenido

1	MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE AVENIDAS TORRENCIALES.	0
1.1	Métodos basados en datos de Caudales.....	2
1.1.1	Métodos históricos	2
1.1.2	Métodos empíricos y curvas envolventes.....	2
1.1.3	Métodos estadísticos	3
1.1.4	Métodos basados en datos de lluvias: Hidrometeorológicos	3
2	CARACTERÍSTICAS DE LA MICROCUENCA	3
2.1	Sistemas De Información Geográfica - SIG.....	3
2.2	Modelo Digital de Elevación (DEM).	8
2.3	Red de drenaje y puntos de desagüe.	10
2.4	Características hidromorfométricas	11
2.5	Geología.	14
2.5.1	Cretácico	14
2.5.2	Cenozoico (Plio- Cuaternario) (Paleógeno – Neógeno)	15
2.5.3	Cuaternario	16
2.6	Geomorfología	17
2.6.1	Unidades geomorfológicas.....	17
2.7	Unidades Geológicas Superficiales	20
3	ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN.....	21
3.1	Análisis de Homogeneidad de los datos Finales.	28
3.2	Análisis estadístico de las precipitaciones máximas en la Estación de San Bernardo.	31

3.2.1	Función Gumbel	32
3.2.2	Función SQRT- et MÁX.	33
3.2.3	Función GEV.	33
3.2.4	Función TCEV.	35
4	ESTUDIO HIDROLÓGICO	36
4.1	Cálculo de la curva IDF de la microcuenca	36
4.2	Ajuste a curvas sintéticas	41
4.3	Tiempo de concentración	45
4.4	Modelo de producción de escorrentía: modelo SCS.....	47
4.4.1	Umbral de escorrentía	48
4.4.2	Contenido inicial de humedad.....	48
4.4.3	Clasificación hidrológica del suelo.	50
4.4.4	Tipo de uso del terreno.	56
4.5	Cálculo de Po y CN para la microcuenca el Rollo	62
5	MODELACIÓN PSEUDODISTRIBUIDA DE CRECIDAS CON HEC-HMS.....	69
5.1	Componentes del sistema	69
5.1.1	Modelo de cuenca	71
5.2	Hietogramas de tormenta	72
5.3	Resultados obtenidos en Hec-HMS.....	74
5.4	Comparativa de resultados con otros CN	77
6	MOVIMIENTOS EN MASA Y TIPOS DE FLUJO ASOCIADOS A AVENIDAS TORRENCIALES – MODELO FLO 2D.....	77
6.1	Clasificación de flujos según Hunger et al. 2001.	77
6.1.1	Flujo de detritos (debris flow)	79

6.1.2	Flujo de lodo (mud flow).....	80
6.2	Clasificación de Flujos – Flo2D	80
6.2.1	Inundación de agua	81
6.2.2	Inundaciones de lodo.....	81
6.2.3	Flujos de lodo	82
6.2.4	Deslizamientos de tierra o Flujos granulares	82
6.3	Deslizamientos en la quebrada El Rollo:	84
6.3.1	Deslizamientos rotacionales	85
6.4	Reptación o Creep	86
7	GENERALIDADES SOFTWARE FLO 2D.....	87
8	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	91
8.1	Metodología de Calibración.....	91
8.2	Levantamiento topográfico.	97
8.3	Calibración con Modelación en HEC-RAS.....	99
8.3.1	Resultados obtenidos en HEC-RAS.....	100
8.4	Calibración con el modelo Flo 2D.....	101
9	METODOLOGÍA E INSUMOS PARA LA SIMULACIÓN DE AVENIDA TORRENCIAL EN LA MICROCUENCA EL ROLLO - MODELO FLO 2D.....	102
9.1	Topografía:.....	103
9.2	Hidrología:.....	103
9.3	Cálculo de volúmenes:	103
9.4	Cálculo de Cv para el modelo en Flow 2D:.....	106
10	SIMULACIÓN FLO 2D.....	111
10.1	Categorización de la amenaza modelo flo 2d.....	112

10.2	Escenarios de amenaza propuestos	114
10.2.1	Escenario de Amenaza 1: Áreas de drenaje 1 y 2.	114
10.2.2	Escenario de amenaza 2: áreas de drenaje 1, 2 y 3.	121
11	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126

Lista de Tablas

Tabla 1.	Características morfométricas de las Áreas aportantes.	12
Tabla 2.	Información de las Estaciones cercanas.	22
Tabla 3.	Distancias de las Estaciones respecto a la estación base.	23
Tabla 4.	Disponibilidad de datos de las Estaciones.	24
Tabla 5.	Precipitación máxima anual de la serie final.	26
Tabla 6.	Estadísticos de la serie de precipitación máxima diaria.	28
Tabla 7.	Resultados prueba de Buishand.	29
Tabla 8.	Interpretación prueba de Buishand.	29
Tabla 9.	Resultados prueba de Pettitt.	30
Tabla 10.	Resultados prueba SNHT	30
Tabla 11.	Coeficientes de distribución para cuencas en Peru.	37
Tabla 12.	Valores de precipitación para la distribución en 24 horas.	37
Tabla 13.	Valores de intensidad para la distribución en 24 horas.	38
Tabla 14.	Valores de los coeficientes de distribución para cuencas en Brasil.	39
Tabla 15.	Valores de precipitación para la distribución en 24 horas.	40
Tabla 16.	Valores de intensidad para la distribución en 24 horas.	40
Tabla 17.	Valores de la curva IDF (IDEAM).	44

Tabla 18. Valores de parámetros de la curva IDF para cada periodo de retorno (IDEAM).	44
Tabla 19. Condiciones de humedad según el S.C.S.	49
Tabla 20. Tipología de suelos hidrológicos según el S.C.S.....	51
Tabla 21. Clase hidrológica de suelo según su uso.	53
Tabla 22. Equivalencia Usos de suelos metodologías Corín Land Cover y S.C.S, Microcuenca El Rollo.....	57
Tabla 23. Tipología de usos de suelos según el S.C.S.	61
Tabla 24. Valores de la curva Numero para las diferentes áreas.	63
Tabla 25. Resultados cálculo del CN para el Área 1.	65
Tabla 26. Resultados cálculo del CN para el Área 2.	66
Tabla 27. Resultados cálculo del CN para el Área 2.	67
Tabla 28. Valores CN para las Áreas de la Microcuenca.	68
Tabla 29. Valores de los tiempos de concentración (Tc) y desfase al pico (TLag).	68
Tabla 30. Comparativa de resultados de distintos CN para T50.	77
Tabla 31. Clasificación de deslizamientos de tierra según Hunger et al 2001.	78
Tabla 32. Clasificación de deslizamiento de acuerdo al tipo de flujo.	79
Tabla 33. Tipos de Flujo y concentración en peso y volumen.	80
Tabla 34. Relaciones T, μ Vs. Cv.....	89
Tabla 35. Cálculo de Cv hidrograma sólido real.....	101
Tabla 36. Valores de caudales de las Areas aportantes de la Microcuenca El Rollo...	103
Tabla 37. Áreas de las secciones transversales extremas.	105
Tabla 38. Áreas Medias.	105
Tabla 39. Volumen deslizamientos microcuenca El Rollo calculado por el método del prismoide.	106

Tabla 40. Parámetros Geomecánicos de material solido de la Microcuenca El Rollo..	108
Tabla 41. Valores de Cv para las áreas 1 y 2 de la Microcuenca El Rollo.....	111
Tabla 42. Valores de Cv para el área total de la Microcuenca El Rollo.	111
Tabla 43. Nivel de Intensidad por flujo torrencial.....	112
Tabla 44. Nivel de amenaza por flujo torrencial.	113
Tabla 45. Categorización de Amenaza por Fenómeno de Avenidas Torrenciales.....	113
Tabla 46. Datos para simular el escenario 1.	114
Tabla 47. Datos para simular el escenario 2.	121

Lista de figuras.

Figura 1. Mapa Delimitación de la Microcuenca el Rollo.....	5
Figura 2. Captura drone Phantom 4 V 2.0.	7
Figura 3. Ortomosaico – vuelo Drone Phantom 4 V 2.0.....	8
Figura 4. Modelo de Red Irregular Triangular – TIN.....	9
Figura 5. Modelo Digital de Elevación - DEM.....	9
Figura 6. Red de drenaje de la Microcuenca el Rollo.....	10
Figura 7. Drenaje dendrítico.	11
Figura 8. Subdivisión de la microcuenca en áreas aportantes.	12
Figura 9. Mapa Geológico Microcuenca el Rollo.....	17
Figura 10. Mapa unidades geomorfológicas.	19
Figura 11. Unidades Geológicas Superficiales	21
Figura 12. Polígonos de Thiessen para las Estaciones.	23
Figura 13. Serie de datos de precipitación Estación San Bernardo.	24
Figura 14. Serie de datos de precipitación Estación Berruecos.	25

Figura 15. Serie de datos de precipitación Estación San Bernardo.	26
Figura 16. Resultados función de distribución Gumbel.	32
Figura 17. Resultados función de distribución SQRT-ET max.	33
Figura 18. Resultados función de distribución GEV.	34
Figura 19. Resultados función de distribución TCEV.	35
Figura 20. Curva IDF a partir de los coeficientes en Perú.	39
Figura 21. Curva IDF a partir de los coeficientes en Brasil.	41
Figura 22. Ajuste de la curva IDF para la distribución de Perú.	42
Figura 23. Ajuste de la curva IDF para la distribución de Brasil.	43
Figura 24. Curva IDF de la estación de San Bernardo proporcionada por el IDEAM. ...	45
Figura 25. Distribución de puntos para muestreo de suelos	52
Figura 26. Grupo hidrológico de suelo propuesto ministerio de obras públicas y urbanismo de España M.O.P.U.	52
Figura 27. Mapa de suelos hidrológicos de la Microcuenca el Rollo, San Bernardo. ..	54
Figura 28. Suelo cultivo caña	55
Figura 29. Suelo Pasturas	55
Figura 30. Suelos en praderas pobres y áreas boscosas	56
Figura 31. Suelo bosques.....	56
Figura 32. Coberturas de masas forestales - A) densidad boscosa clara B) densidad boscosa media	58
Figura 33. Coberturas de praderas pobres	59
Figura 34. Cobertura de cultivo de Fique	59
Figura 35. Mapa de Coberturas Vegetales de la Microcuenca el Rollo, San Bernardo.	60
Figura 36. Esquema de las Áreas en Hec- HMS.	71

Figura 37. Comparativa de Curvas IDF para T=50 años.....	73
Figura 38. Hietograma de precipitación usando coeficientes de Perú.....	73
Figura 39. Hietograma de precipitación usando coeficientes de Brasil.	74
Figura 40. Hidrograma del área 1.....	74
Figura 41. Hidrograma del área 2.....	75
Figura 42. Suma de Hidrogramas en el punto de confluencia del área 1 y 2.	75
Figura 43. Hidrograma del área 3.....	76
Figura 44. Hidrograma del punto de desagüe de la Microcuenca	76
Figura 45. Concentración por Volumen, Cv	84
Figura 46. Esquema general de un deslizamiento rotacional.....	85
Figura 47. Esquema de reptación.....	87
Figura 48. Fotografía crecida 1 de marzo de 2018	92
Figura 49. Fotografía crecida 23 marzo de 2018.	93
Figura 50. Fotografía crecida 4 de mayo de 2018.	93
Figura 51. Fotografía crecida 13 de mayo de 2018	94
Figura 52. Visita de campo realizada por el equipo de Gestión del Riesgo.....	95
Figura 53. Puente principal San Bernardo	95
Figura 54. Lluvia real para la calibración	96
Figura 55. Hidrograma de crecida del evento real de calibración.....	96
Figura 56. Área del levantamiento topográfico.....	97
Figura 57. Curvas de Nivel del Levantamiento Topográfico.....	98
Figura 58. Ejemplo de perfiles generados por la Topografía.....	98
Figura 59. Perfil y nivel en el puente.....	100

Figura 60. Resultados de la simulación en el modelo Flo2D.....	102
Figura 61. Diagrama del método del prismoide.	104
Figura 62. Esquema dimensiones de cada sección transversal de un prismoide para el cálculo de áreas.	104
Figura 63. Superficie de falla falla y dirección de la resistencia al cortante (U. S. Corps of Engineers, 2003)	107
Figura 64. Deslizamiento 1. Coordenadas	109
Figura 65. Deslizamiento 2. Coordenadas.	109
Figura 66. Deslizamiento 3. Coordenadas.	110
Figura 67. Deslizamiento 5. Coordenadas.	110
Figura 68. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – TR2.	116
Figura 69. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 2 años.....	117
Figura 70. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 2 años.	117
Figura 71. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 25 años.	118
Figura 72. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años.....	118
Figura 73. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 25 años.	118
Figura 74. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 50 años.	119
Figura 75. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años.....	120
Figura 76. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 50 años.	120
Figura 77. Zonas de amenaza escenario 1.....	121
Figura 78. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 2 años.	123
Figura 79. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 2 años.....	124

Figura 80. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 2 años.	124
Figura 81. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 25 años.	125
Figura 82. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años.....	125
Figura 83. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 25 años.	125
Figura 84. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 50 años.	126
Figura 85. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años.....	126
Figura 86. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 50 años.	126

1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE AVENIDAS TORRENCIALES.

Una avenida torrencial puede definirse como un flujo rápido producto de una mezcla de sólidos y agua; fenómeno relacionado a crecientes súbitas y la capacidad de los cuerpos de agua para arrastrar grandes cantidades de material sólido (rocas – sedimentos) y material vegetal; que se origina comúnmente en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas presentan fuertes desniveles y que por efecto de fenómenos hidrometeorológicos intensos se desencadena.

Las avenidas torrenciales, en ocasiones se denominan crecientes, avalanchas, crecidas, o torrentes, que se presentan por lo general en cuencas de alta montaña, y que debido a sus características se consideran uno de los fenómenos naturales más peligrosos por su alta velocidad y concentración en materiales de arrastre, lo cual puede causar grandes daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas.

Los eventos torrenciales abarcan un enorme rango de formas de drenaje que van desde una pequeña cárcava que aparece espontáneamente en una ladera, a un gigantesco abanico aluvial del orden de decenas de kilómetros (Garzón y otros, 2009). Hidráulicamente un flujo torrencial se caracteriza por contener un alto porcentaje de material sólido (que incrementa considerablemente la viscosidad y densidad del flujo, disminuyendo su velocidad), y recorre cauces de altas rugosidades y pendientes. En la mayoría de los casos, el aporte de material es debido a que se saturan los materiales (roca fracturada, saprolito, suelo) de las laderas, haciendo que estos se desprendan generando deslizamientos, cuyo material cae al cauce y es transportado inmediatamente aguas abajo o queda inicialmente represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina (Urrea & Vásquez, 1996), (Rendón, 1997); (OSSO – La Red, 2003); (Castro, 2007). En otros casos puede que no haya aporte de material sólido debido a deslizamientos, simplemente el material que ya se encontraba en el cauce con mucha anterioridad es arrastrado aguas abajo por la creciente.

Cuando se presentan avenidas torrenciales las corrientes aumentan la capacidad para transportar sedimentos gruesos, donde además se pueden incorporar restos vegetales y lodo, en una zona de influencia amplia, área afectada que se ubica paralelamente al flujo principal y otra que corresponde a la zona donde grandes depósitos producto de dichos flujos se acumulan. Estos eventos son impredecibles, con alto potencial destructivo y ocurren de manera rápida, a altas velocidades, en periodos de tiempo muy cortos, con largos periodos de retorno para un mismo lugar y presentan una distribución temporal y espacial errática (Durán, Elízaga, Garzón, Lamas, & Prieto, 2008); (Piedrahíta, 1996); debido a esto las avenidas torrenciales son una amenaza de alta peligrosidad puesto que no dan tiempo de reacción a las personas que se encuentran expuestas a

este fenómeno, generando así situaciones desastrosas con pérdidas de vidas humanas y destrucción de viviendas, estructuras, cultivos, carreteras, etc. (Vásquez, 1993); (Urrea & Vásquez, 1996); (Flórez & Suavita, 1997); (Smith & Ward, 1998); (Castro, 2007).

Según la Metodología para la evaluación del riesgo en los POMCA (UNAL, 2013), una avenida torrencial se desencadena cuando tiene las siguientes características:

- **Pendiente:** La pendiente de la cuenca y del perfil longitudinal del cauce, influyen en la velocidad de la escorrentía y la cantidad de infiltración. Es por ello por lo que las cuencas de mayor pendiente media y con cambios drásticos en la gradiente en diferentes segmentos del cauce principal o sus tributarios, son más susceptibles a la ocurrencia de avenidas torrenciales.
- **Geomorfología:** Las avenidas torrenciales se generan en zonas montañosas, escarpadas y de piedemonte, en donde se configuren notorios cambios de la pendiente del cauce. A nivel más local, la torrencialidad es común en frentes donde predomina la erosión sobre la sedimentación, en cañones en “V” y morfologías que configuren relieves abruptos.
- **Cantidad y aporte de sedimentos:** Para la generación de un flujo torrencial, es indispensable una combinación de materiales gruesos heterométricos y finos especialmente arenas y limos. Por esta razón el tipo de material geológico superficial es determinante en la ocurrencia y tipo de fenómeno. Por ejemplo, en cuencas de alta pendiente modeladas en suelos residuales, compuestos por materiales finos, los fenómenos comunes no son las avenidas torrenciales sino los flujos de lodos.
- **Susceptibilidad a movimientos en masa:** Cuencas con alta probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa favorecen el aporte de sedimentos, árboles y demás desechos, así como formación de represamientos en los cauces.
- **Alta precipitación:** Cuencas localizadas en climas húmedos a muy húmedos, donde los aguaceros son frecuentes y presentan alta intensidad y duración, son propensas a la generación de avenidas torrenciales.
- **Permeabilidad y humedad del suelo:** La humedad del suelo es considerado como el factor importante en la generación de avenidas, especialmente en zonas húmedas con suelos profundos. Si el suelo está saturado durante una precipitación, no permitirá infiltración adicional y toda la lluvia se convierte en escorrentía. Por otro lado, en zonas secas se tiene una tasa específica a la que puede absorberse la lluvia, llamada la capacidad de infiltración. Si el índice de pluviosidad excede la capacidad de infiltración, conduce a una producción rápida y eficiente de escorrentía superficial. La tasa de infiltración también se ve afectada

por la permeabilidad del suelo (University Corporation for Atmospheric Research, 2010).

En la actualidad existen dos grandes grupos de métodos de estimación hidrológica: los métodos de tipo determinístico y los de tipo probabilístico.

En los métodos de tipo determinístico, se calculan de forma unívoca los caudales de la máxima avenida con base a datos fundamentalmente hidrometeorológicos, destacando entre ellos el método de la “Avenida Máxima Probable”. Sin embargo, los métodos de tipo probabilístico se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad y pueden ser estadísticos o estocásticos. Los primeros tratan con ejemplos observados, mientras que los estocásticos requieren invariablemente el uso de datos.

Los métodos hidrometeorológicos de transformación lluvia-escorrentía permiten estudiar el comportamiento hidrológico de una superficie como respuesta a la acción de una precipitación, teniendo en cuenta las características de la propia superficie (humedad, vegetación, presencia de nieve, etc.).

Dentro de los métodos hidrometeorológicos, los modelos agregados consideran que la transformación lluvia-escorrentía se produce en toda la superficie de manera unitaria. Los métodos simplificados de los modelos agregados calculan el caudal punta del hidrograma, es decir, el caudal máximo de escorrentía superficial suponiendo una precipitación de intensidad constante, tanto en el espacio como en el tiempo, en toda la cuenca. (Orio, 2011)

1.1 Métodos basados en datos de Caudales

1.1.1 Métodos históricos

Los métodos históricos consisten en estudios históricos de avenidas. Presentan incertidumbres en las valoraciones cuantitativas y/o cualitativas de las avenidas históricas, aunque suponen una fuente importante de información para tener unas referencias temporales más amplias, y para incorporar los datos hidrológicos históricos a las series hidrológicas, tanto locales como regionales, aumentando así la confianza en la extrapolación estadística.

1.1.2 Métodos empíricos y curvas envolventes

Consisten en la aplicación de fórmulas empíricas y curvas envolventes calibradas para cuencas determinadas. Los resultados deben utilizarse únicamente como ordenes de magnitud, referencia y contraste de los resultados obtenidos con la aplicación de los otros métodos hidrológicos analíticos.

1.1.3 Métodos estadísticos

En estos métodos se considera que el caudal es una variable aleatoria que puede ser estudiada mediante leyes estadísticas de fenómenos extremos. Sin embargo, para que las extrapolaciones presenten cierto grado de confianza es necesario disponer de registros de caudales lo suficientemente largos.

1.1.4 Métodos basados en datos de lluvias: Hidrometeorológicos

Estos métodos presentan la gran ventaja de estudiar el comportamiento hidrológico de una cuenca como respuesta a la acción de la precipitación, teniendo en cuenta el estado en el que se encuentra la propia cuenca (humedad, vegetación, etc.).

- Estos métodos estudian por separado cada una de las fases del fenómeno:
- Análisis de la evolución espacio-temporal de las lluvias.
- Transformación de la lluvia en escorrentía.
- Concentración y transporte de la escorrentía. *(Orio, 2011)*

En el presente estudio se emplea esta metodología para la obtención de los hidrogramas de avenidas asociados a diferentes periodos de retorno, debido a que los datos disponibles son registros de precipitación en estaciones del entorno de la microcuenca e información hidrológica sobre ésta.

2 CARACTERÍSTICAS DE LA MICROCUENCA

2.1 Sistemas De Información Geográfica - SIG.

Debido a la necesidad de integrar el conocimiento técnico de manera interdisciplinaria, los Sistemas de Información Geográfica – SIG, son una herramienta idónea que permite utilizar información variada de distintas fuentes, y que, a su vez, facilita el análisis simultáneo de un mismo problema, en este sentido, los SIG suelen aplicarse a sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales, constituyéndose en una herramienta para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales. *(Diaz & Teobaldis , 2017)*

Contar con un software especializado en SIG, ya sea de versión libre o de aquellos que requieran de la compra de una licencia, es cuestión de afinidad para la manipulación de la información. En nuestro caso se utilizó el software ArcGis Versión 10.2, debido que el geoprocésamiento de los datos permite la creación de herramientas especializadas como lo es el Arc toolbox. En este sentido, para el desarrollo del estudio en la quebrada el Rollo,

en el municipio de San Bernardo, los Sistemas de Información Geográfica – SIG, juegan un papel importante, ya que por medio de esta herramienta se ha logrado integrar de manera espacial, el contexto natural de la microcuenca el Rollo.

Con relación a lo anterior, uno de los primeros pasos fue la revisión de información secundaria del área de estudio, teniendo como punto de partida, la delimitación de la microcuenca, de esta manera, se revisa la información oficial del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Juanambú, debido a que la microcuenca El Rollo, se encuentra en el municipio de San Bernardo y por ende, hacen parte de este Plan de Ordenación; posteriormente, se realiza su respectiva verificación en campo, apoyado de imagen satelital Landsat del área de estudio, como se indica en el mapa (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.1**).

Para el desarrollo del trabajo de campo en el área de interés, se identifican puntos de control con GPS Gramin Monterra, con sistemas de coordenadas Magna Colombia Oeste, lo que permite verificar la delimitación de la microcuenca. Una vez determinada esta demarcación, se procede a establecer las diferentes temáticas ambientales, para el desarrollo del estudio (Coberturas de la tierra, suelos, red de drenaje, curvas de nivel, entre otras), como insumos importantes para la interpretación del área en cuestión.

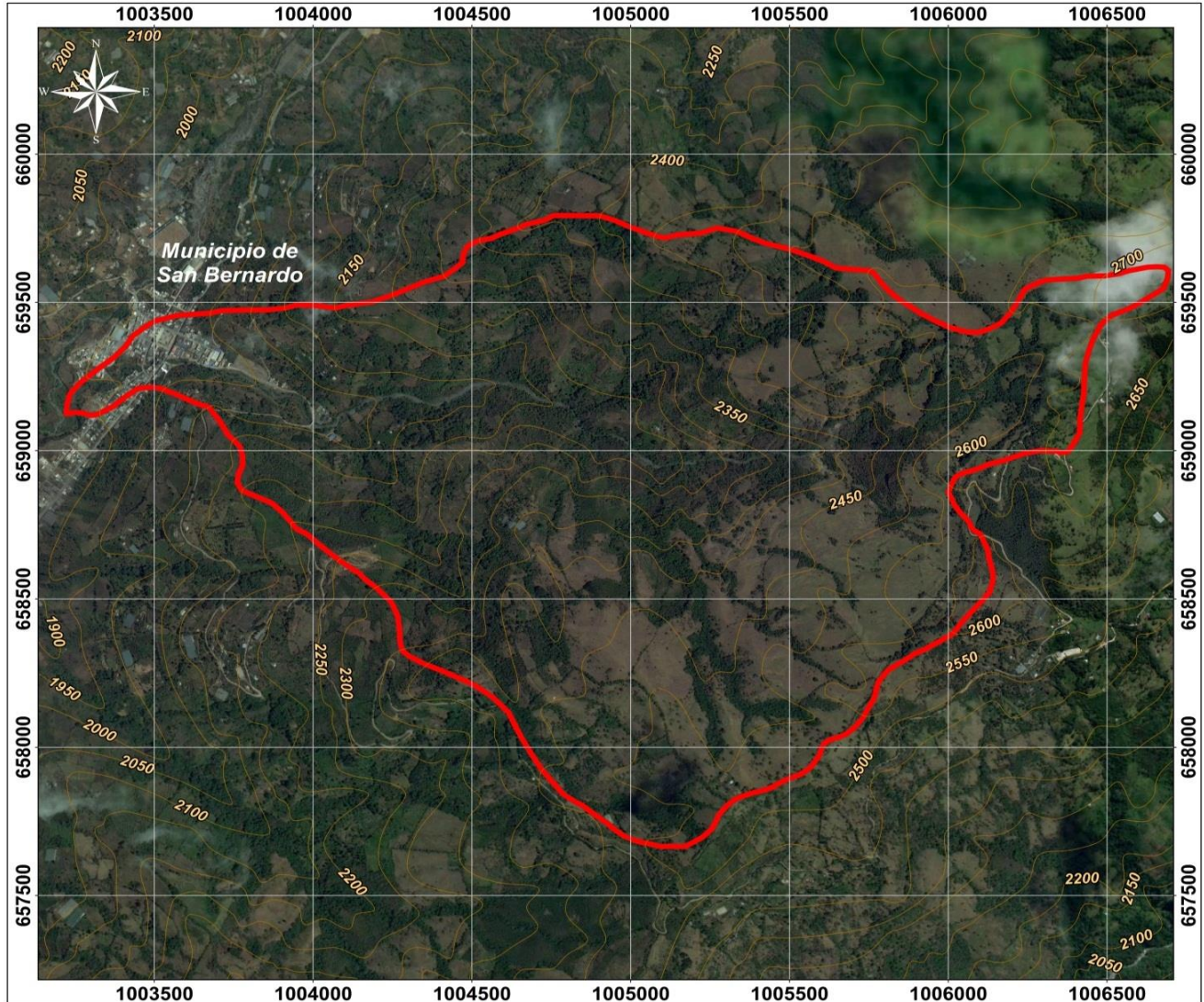


Figura 1. Mapa Delimitación de la Microcuenca el Rollo

Para el desarrollo de las temáticas ambientales, se requiere contar con información actual, para lo cual, se realizó un vuelo con aeronave no tripulada - dron Phantom 4 V.2.0; teniendo en cuenta, el comportamiento de la quebrada el Rollo y su área de influencia desde aguas arriba hasta su punto de desagüe.

Se determina los parámetros mínimos para la realización del vuelo, los cuales corresponden a la escala, altura de vuelo y resolución del lente de la cámara del dron, como se describen a continuación:

En este sentido, es de gran importancia determinar la altura de vuelo (H), para lo cual se aplica la siguiente ecuación:

$$H = E \times F$$

Siendo:

H: altura de vuelo.

E: escala o nivel de detalle del objeto real.

F: resolución de lente del dron.

Donde, para el presente estudio.

E= 1: 5.000

F = 35 mm

H = 5.000 * 35 mm

H = 175.000 mm = 175 m

La altura del vuelo del dron se realiza a 175 metros, la resolución del pixel (GSD), equivale a 4,77, cm/px, y la escala de trabajo es 1:5000.

Cumpliendo con los parámetros anteriormente mencionados, se realiza la captura de 1134 imágenes en formato JPG, realizando posteriormente su procesamiento a través del software Pix4Dmapper, como programa idóneo para el desarrollo del mismo (Figura 2).



Figura 2. Captura drone Phantom 4 V 2.0.

Dentro de los principales insumos que se obtienen a partir del vuelo del drone, podemos encontrar como resultado el ortomosaico, que es la composición de imágenes a la que se ha corregido los errores geométricos, para que cada punto en terreno sea observado de manera perpendicular, como se presenta en la (figura 3).

Es importante tener en cuenta, que el ortomosaico no cubre en su totalidad el área de la microcuenca el Rollo, pero es insumo que permite identificar coberturas en tiempo real (año 2019), mientras que, para cubrir el área restante de la microcuenca, se tuvo como apoyo una imagen satelital Landsat, adaptada de la plataforma libre Google Earth año 2017.

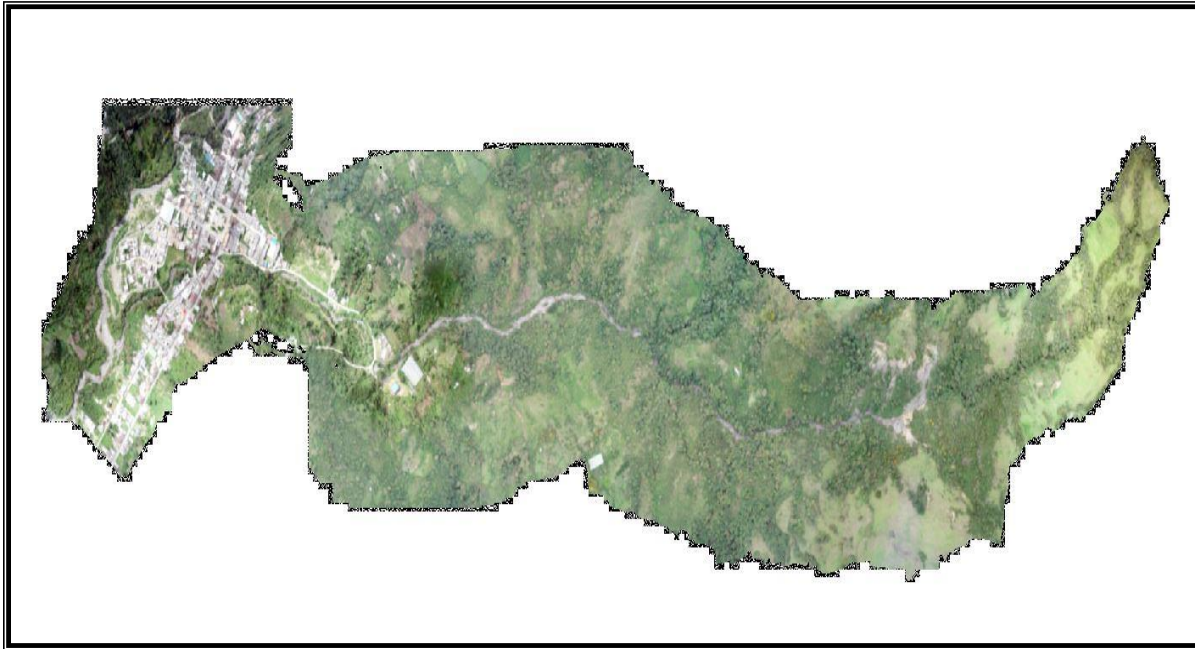


Figura 3. Ortomosaico – vuelo Drone Phantom 4 V 2.0.

2.2 Modelo Digital de Elevación (DEM).

Referente a la topografía (descripción y delineamiento de la superficie de terreno) de la microcuenca el Rollo, se cuenta con las curvas de nivel, las cuales permiten identificar la altitud del terreno, o en su defecto, es la altura a la cual se encuentra un punto de interés, medido en metros sobre el nivel del mar (m.s.n m). Las curvas de nivel se encuentran a escala 1:25.000, es decir, que la distancia entre curvas es de 50 metros. En este sentido, a partir de las curvas de nivel, se pueden generar insumos como un Modelo de Red Irregular Triangular – TIN (figura 4), y un Modelo Digital de Elevación – DEM (figura 5).

Con relación a lo anterior, un TIN “constituye una forma de representación del terreno a través de una red irregular de triángulos. Cada uno de los vértices de estos triángulos tiene un valor de altura, con lo que de esta manera las superficies de los triángulos van a representar la superficie del terreno. A mayor densidad de puntos con información topográfica de la elevación del terreno, nuestro TIN se asemejará más a la realidad y los resultados serán más fiables” (TODOSIG, 2019).

Así mismo, un Modelo Digital de Elevación – DEM, “son datos digitales más comunes de la forma de la superficie de la tierra, basados en celdas (pixel)” como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** (ESRI, 2019).

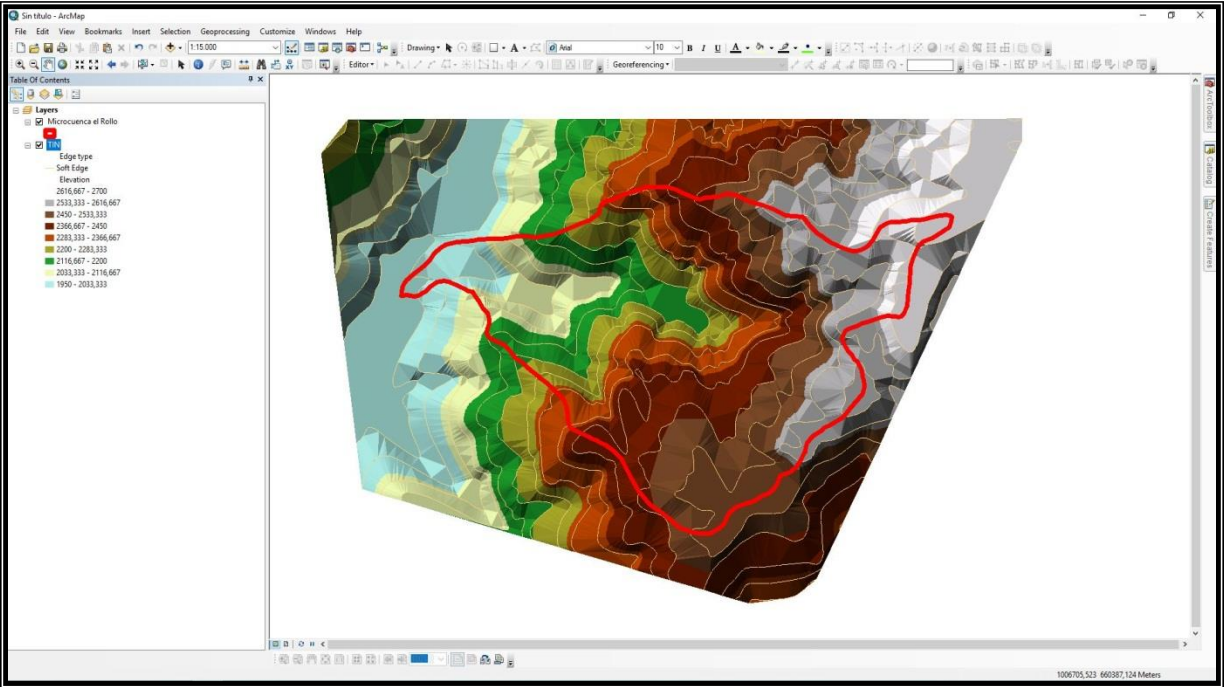


Figura 4. Modelo de Red Irregular Triangular – TIN.

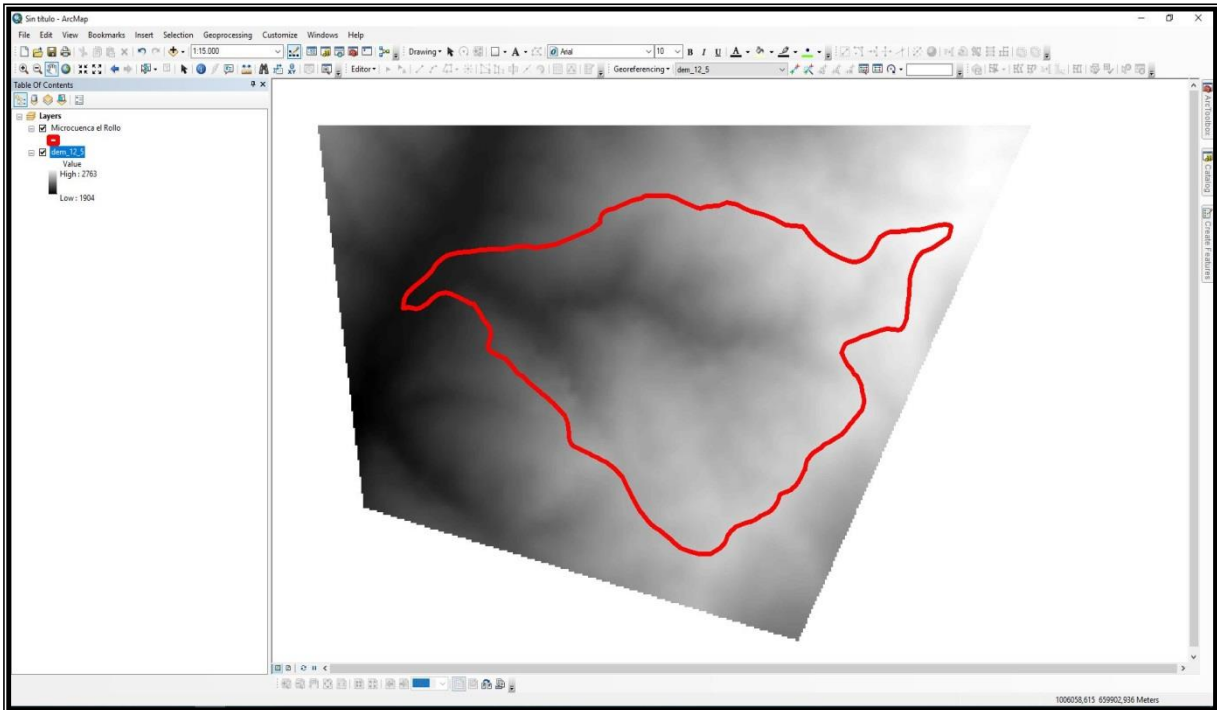


Figura 5. Modelo Digital de Elevación - DEM.

Es importante resaltar, que para realizar el modelamiento por avenidas torrenciales en la microcuenca el Rollo, curvas de nivel, el ortomosaico, el Modelo de Red Irregular Triangular - TIN y el Modelo Digital de Elevaciones – DEM, son insumos de gran importancia, ya que se constituyen en herramientas de punto de partida, para la interpretación geográfica del entorno natural.

2.3 Red de drenaje y puntos de desagüe.

La red de drenaje está determinada por un cauce principal que nace en la parte superior de la microcuenca con varias aportaciones de quebradas más pequeñas a lo largo de su recorrido hasta el casco urbano. El flujo va en dirección este-oeste teniendo como punto final de desagüe el Río San Bernardo en la parte inferior del centro poblado (figura 6).

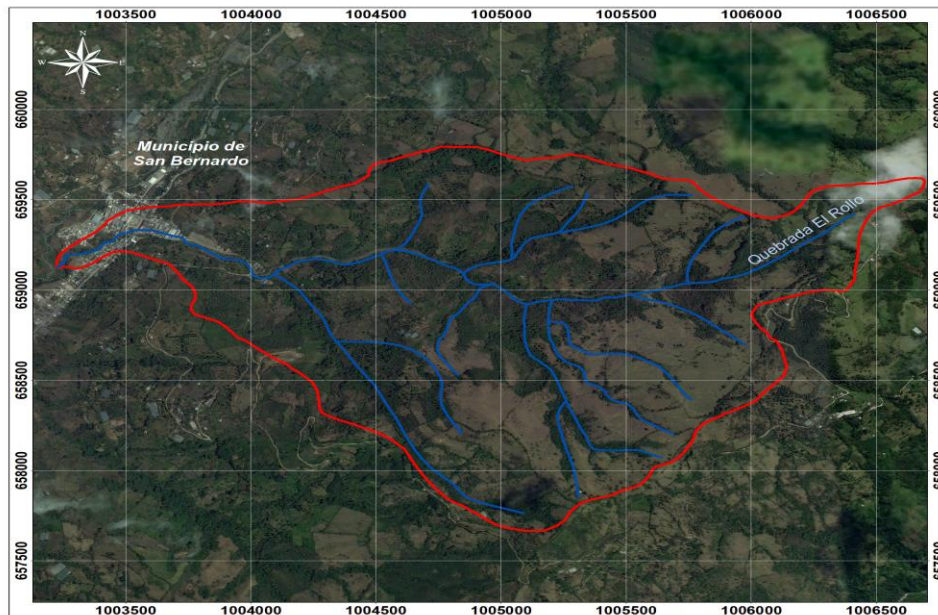


Figura 6. Red de drenaje de la Microcuenca el Rollo.

En cuanto a la morfología del drenaje, encontramos que la microcuenca es de tipo dendrítico, donde las corrientes se asemejan a las ramificaciones de un árbol frondoso (figura 7). Este tipo de drenaje se desarrolla cuando las rocas presentan una resistencia a la erosión uniforme y no ejercen un control sobre la dirección de crecimiento del valle.

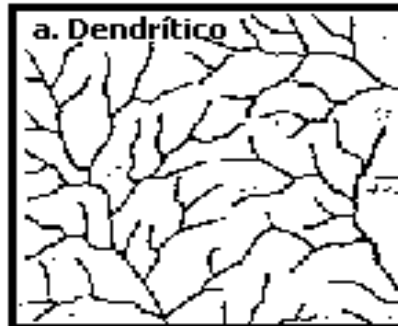


Figura 7. Drenaje dendrítico.

Debido a la relativa uniformidad del sustrato y similar resistencia a la erosión, la forma del patrón dendrítico está determinado básicamente por la dirección de la pendiente del terreno (*TARBUCK & LUTGENS, 2005*)

2.4 Características hidromorfométricas

Las características hidromorfométricas sirven para caracterizar una cuenca desde el punto de vista físico. En la determinación de la cuenca influye la escala de trabajo, por lo que el error cometido se traslada a la determinación de las características hidromorfométricas de la cuenca. A fin de disminuir el error en la determinación de la cuenca, se trabajó con la información obtenida por el vuelo del dron a escala 1: 2.000 y los datos proporcionados por el IGAC a escala 1: 25.000.

La microcuenca del Rollo se dividió por lo tanto en tres áreas de acuerdo a la morfología del terreno y a la red de drenaje respectiva (figura 8). Las dos primeras áreas (1 y 2), que corresponden a la parte alta de la microcuenca en dirección este; así mismo, la tercera área (3) se ubica en la parte más baja y recoge toda el agua que aportan las otras dos. A continuación, se presenta las áreas divisorias de la microcuenca en cuestión:

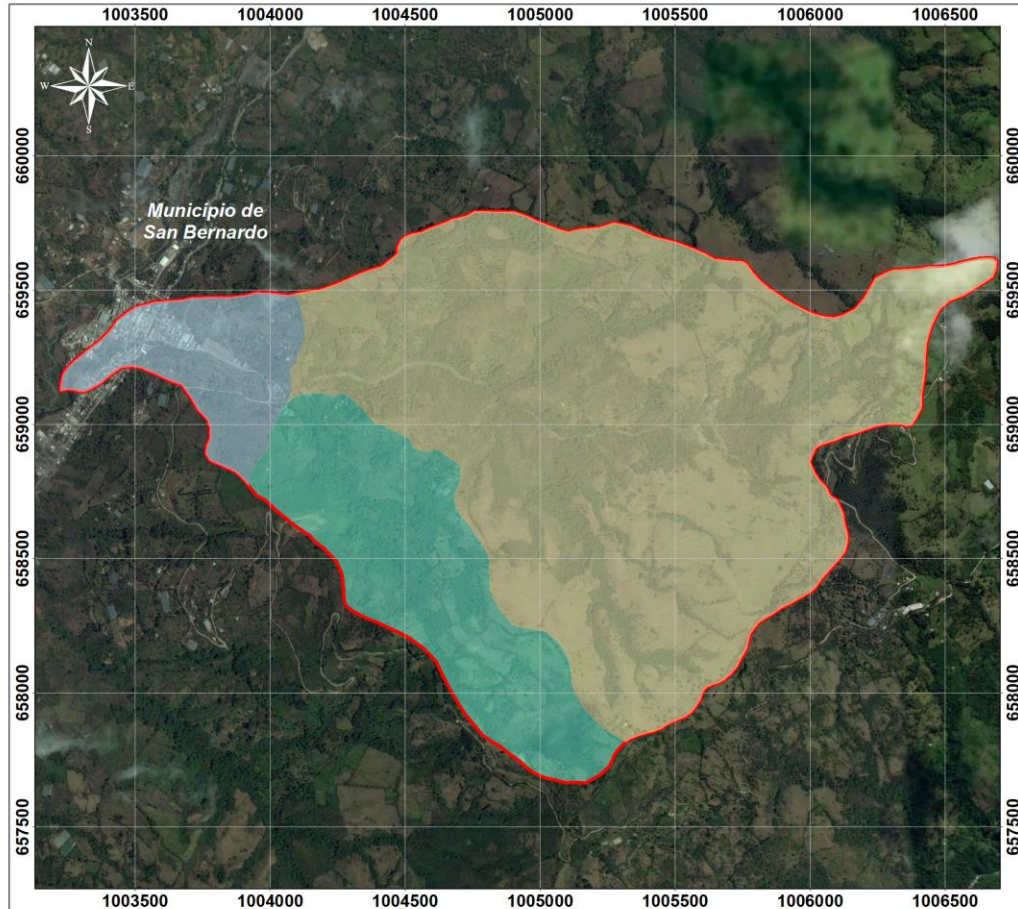


Figura 8. Subdivisión de la microcuenca en áreas aportantes.

En la siguiente tabla se presentan las características de las áreas que conforman la Microcuenca objeto de estudio y el punto de desagüe correspondiente a la desembocadura sobre la Quebrada San Bernardo.

Tabla 1. Características morfométricas de las Áreas aportantes.

ÁREA	COTA		DESNIVEL (m)	AREA (Km ²)	PENDIENTE (m/m)
	MÁXIMA	MÍNIMA			
1	2547	2060	487	0.74	0.27
2	2725	2060	665	2.67	0.17
3	2184	1930	254	0.31	0.29

Perímetro: Es la longitud del límite exterior de la cuenca. Su magnitud depende de la superficie y la forma de la cuenca.

El perímetro de la microcuenca es de una longitud aproximada de: $P = 9.58 \text{ KM}$

Superficie: Es el parámetro más importante de una cuenca. En realidad, no es posible medir la superficie real de la cuenca en un mapa, sino que se aproxima por el área de la proyección de la cuenca.

El área de la microcuenca estudiada es: $A = 3,74 \text{ km}^2$

Longitud del cauce principal: La definición de cauce principal viene asociada a una característica hidrológica, siendo el curso de la red de drenaje que vincula mayor flujo de agua, es decir, por el que circula un mayor caudal.

Habitualmente suele coincidir con el cauce de mayor longitud, pero no siempre es así, puesto que pueden existir superficies más generadoras de escorrentía asociadas a tramos más cortos.

La longitud del cauce principal es de 4.07 km

Pendiente media: Una vez obtenida la longitud, se determinan las cotas de los puntos de inicio y final de cauce principal, obteniéndose así la pendiente media como la relación entre la diferencia de cotas y la longitud del cauce.

$$J = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{ppal}}$$

Siendo H_{max} y H_{min} las alturas máximas y mínimas de la Quebrada el Rollo. L_{ppal} es la longitud del cauce principal y J la pendiente media, en este caso de la Quebrada en cuestión.

La pendiente de del cauce total de la Quebrada el Rollo es del 17%.

Coefficiente de compacidad: Este coeficiente se debe a Gravelius, y es la relación entre el perímetro de la cuenca y el círculo de la misma área que la cuenca.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$K_c = 0.04$$

Se trata de un coeficiente que da idea sobre la configuración geométrica de la cuenca, y por tanto del hidrograma de crecida (puesto que la forma de la cuenca afecta directamente al tiempo de respuesta).

Si son cuencas alargadas, tienen hidrogramas más laminados ya que todo debe pasar por un mismo cauce; en cambio, en cuencas más redondeadas el hidrograma de respuesta esperado es brusco. Este coeficiente es siempre mayor que la unidad, tanto más próximo a ella cuanto la cuenca se aproxime más a la forma circular, pudiendo alcanzar valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas (Orío, 2011).

2.5 Geología.

Para realizar la caracterización geológica – geomorfológica de la microcuenca El Rollo en el municipio de San Bernardo a escala 1:25.000 se llevó a cabo las siguientes fases:

- Fase 1: Recopilación y análisis de información disponible de la memoria explicativa de la plancha 411 La Cruz, Ingeominas 2002 a escala 1:100.000, POMCA Juanambú 2018 a escala 1:25.000 y la memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 411 La Cruz Ingeominas 2016 escala 1:100.000.
- Fase 2: trabajo de campo para validar la información secundaria, describir y caracterizar las unidades geológicas, identificar la morfología y las características geotécnicas de las unidades geológicas superficiales, para lo cual se tomó datos estructurales y litológicos con sus respectivos puntos de control.
- Fase 3: finalmente con la información secundaria y los registros tomados en campo, se procedió a realizar un mapa con las unidades geológicas, geomorfológicas y geológicas superficiales de la microcuenca El Rollo a escala 1:25.000.

En la microcuenca El Rollo se identificó tres unidades geológicas y se describen a continuación de acuerdo con la sucesión estratigráfica (figura 9).

2.5.1 Cretácico

Complejo Quebrada Grande (K1cqg)

Esta unidad fue descrita por Botero (1963) en el departamento de Antioquia, en cercanías a la población de La Estrella, como Formación Quebradagrande describiendo un conjunto de rocas volcánicas de composición intermedia a básica y rocas sedimentarias de edad mesozoica, con metamorfismo de muy bajo grado; tomando este nombre a lo largo de la cartografía regional; posteriormente Maya & González (1995) sugieren, dadas las

condiciones litológicas y tectónicas, denominar la formación como Complejo Quebradagrande, y le asignan rango de unidad litodémica.

Mojica et al. (2001) consideran que la acumulación del Complejo Quebradagrande tuvo lugar en un ambiente marino de aguas profundas, pobre en oxígeno, con influencia de corrientes turbidíticas. La aparición de intercalaciones volcánicas confirma la presencia simultánea de episodios de vulcanismo submarino, que generaron flujos de lava básicos y acumulaciones piroclásticas.

Esta unidad aflora a lo largo de la microcuenca cubriendo un área de 333 hectáreas que corresponde al 89%, donde se identifican intercalaciones de metalodolitas grafitosas y esquistos cuarzo – micáceos, que presentan un alto fracturamiento y meteorización.

Las metalodolitas y esquistos, son de color gris, macroscópicamente presentan una estructura esquistosa fina, con presencia de grafito, un brillo sedoso y partición irregular por crenulación. Estas rocas se encuentran altamente fracturadas, donde se identificaron algunas zonas de microplegamientos.

En la parte más alta de la microcuenca afloran esquistos cuarzomicáceos, de color gris claro, presenta un brillo sedoso, no fue posible tomar datos de la dirección de esquistosidad o planos de falla, puesto que esta unidad se encuentra altamente meteorizada y fracturada.

2.5.2 Cenozoico (Plio- Cuaternario) (Paleógeno – Neógeno)

Lavas y Cenizas (TQvlc + Qsgf).

Esta unida fue descrita por Murcia y Cepeda (1991), como una secuencia de lavas y cenizas, con depósitos glaciares y fluvio-glaciares, que posiblemente se originaron en volcanes extintos y actuales del complejo volcánico Doña Juana a la cual hacen parte los volcanes Doña Juana, Petácas, Ánimas, Bordoncillo y Patascoy.

Gran parte de la unidad está conformada por depósitos piroclásticos de flujo y caída, que generalmente se presentan en avanzado estado de meteorización, que generan suelos arcillosos de color pardo, gris y blanco de diversas tonalidades; algunos de los depósitos piroclásticos tienen posiblemente composición riolítica y desarrollan material caolinítico (plancha 411 La Cruz).

Esta unidad se observa en la parte alta de la microcuenca en un 9% cubriendo un área de 34 hectáreas, como un depósito volcánico de color amarillo, con una matriz arenosa de tamaño de grano fino y presencia de ceniza volcánica, en algunos afloramientos se

distingue niveles de paleosuelos. Esta unidad en algunos sectores alcanza hasta 1.5 m de espesor y tiene formación de capas de materia orgánica de hasta 40 cm de espesor.

2.5.3 Cuaternario

Depósitos fluviotorrenciales

La composición y las características de estos depósitos son similares a las de los clasificados como depósitos aluviales, pero se han separado por su mayor consistencia y coherencia, y por su posición con respecto a los cauces actuales. Estos depósitos corresponden a eventos torrenciales de años atrás indicando la alta susceptibilidad de las microcuencas a la ocurrencia de Avenidas torrenciales.

Esta unidad cubre el 2% con un área de 8 has dentro de la microcuenca y se conforma por depósitos clasto – soportados, poco seleccionados, con una matriz compuesta por arenas fina y media de color negro, presenta poca consistencia y plasticidad, se encuentra en una 40% en relación con los clastos, que son poco redondeados, de angulares a subangulares, de tamaño bloques, cantos y gravas de metalodolitas, esquistos grafitosos y esquistos cuarzo – micáceos y se presentan en un 60%.

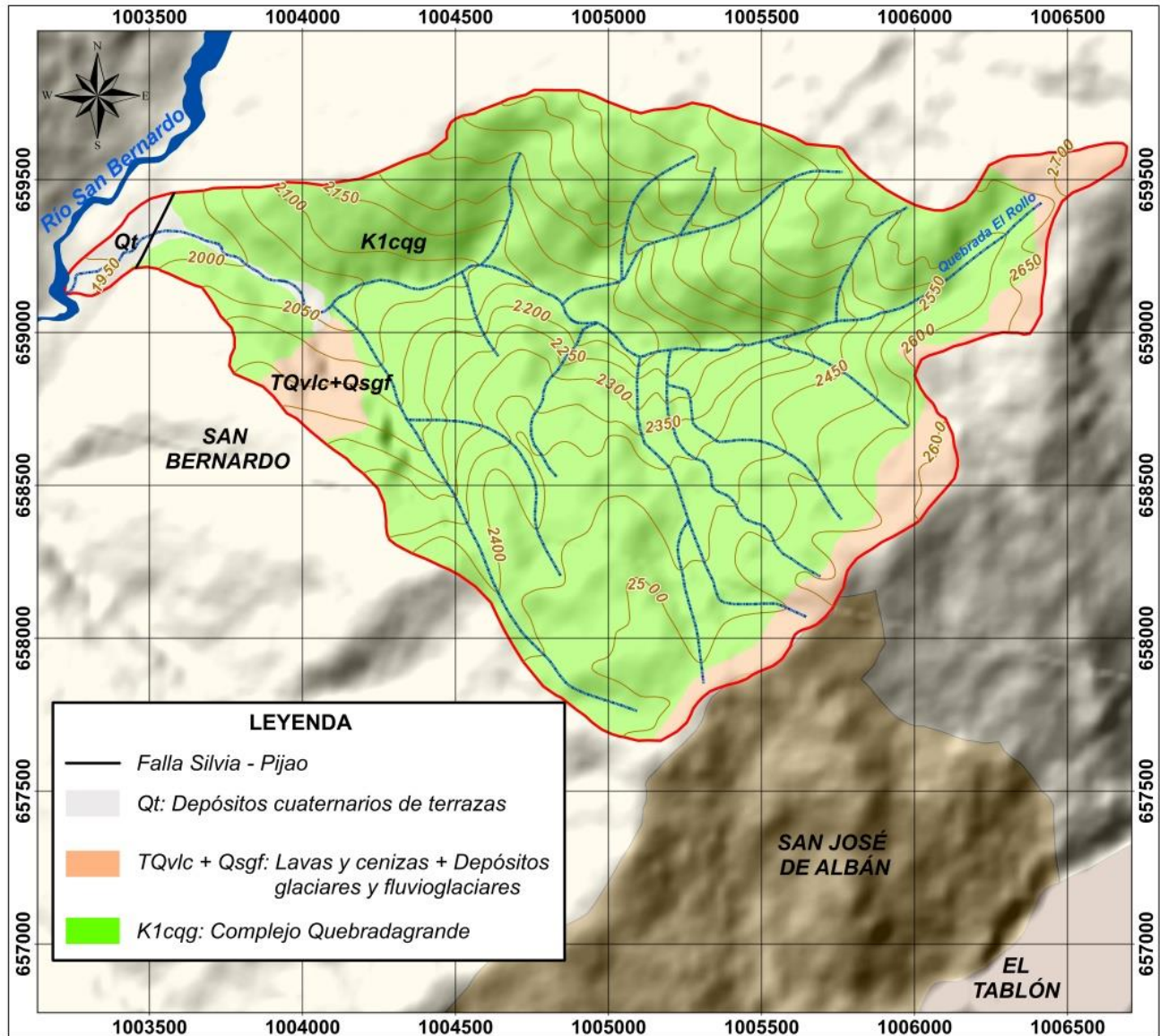


Figura 9. Mapa Geológico Microcuenca el Rollo

2.6 Geomorfología

2.6.1 Unidades geomorfológicas.

2.6.1.1 Geformas de origen estructural:

Las geformas que se originan en este tipo de ambiente se encuentran relacionados con la dinámica interna de la tierra asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades, generando estructuras geológicas sobre las que se

desarrollan el relieve actual (figura 10). Las geoformas de origen estructural ocupan el **xxx%** de la microcuenca El Rollo como resultado de la actividad de la Falla Silvia Pijao y procesos erosivos sobre las unidades geológicas conformadas por metalodlitas y esquistos micáceos del complejo Quebradagrande que afloran en el sector.

Espolón (Ses): esta unidad se caracteriza por tener saliente de morfología alomada, dispuesta paralela a la tendencia estructural general de la región en dirección SW – NE. Se caracteriza por tener laderas de longitudes moderadamente largas, con pendientes de abruptas (**%**) a inclinadas (**%**), marcados por intensos procesos erosivos y movimientos en masa (Imagen x).

Sierras estructurales (Ss): esta unidad corresponde a una prominencia topográfica de morfología montañosa, de laderas simétricas o asimétricas, de longitudes largas, de formas cóncavas y convexas, con pendientes muy inclinadas (**%**) a escarpadas (**%**) que van en dirección NW y tendencia estructural NE – SW sobre metalodolitas y esquistos micáceos del Complejo Quebradagrande. Su origen está relacionado con los procesos de fallamiento intenso en macizos rocosos.

Es una unidad con fuertes pendientes y un relieve relativamente alto, puede presentar cizallamiento y debilidad de la roca al encontrarse en una zona de fallamiento, se tiene como unidades con alta densidad de movimientos de masa, principalmente deslizamientos rotacionales, estos tienden a ubicarse en la base de estas geoformas (Imagen xx).

2.6.1.2 Geoformas de origen fluvial – Lagunar.

Corresponde a las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichos cauces, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de dichas corrientes, sin importar las variaciones que tiene el comportamiento de la dinámica fluvial. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre. En la zona de estudio se identificó una unidad que ocupa el **%%** y representa los flujos torrenciales.

Terraza de acumulación (Fta): Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales, que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce de un río. Su origen es relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación se le atribuye fases de acumulación, incisión y erosión vertical. Morfométricamente son geoformas que presentan una topografía plana y suaves

pendientes, su material es poco consolidado, pero son sectores donde se presenta una mayor acumulación que erosión.

Esta unidad corresponde a depósitos fluvio-torrenciales de la quebrada El Rollo, que están constituidos por sedimentos de tamaño de grano desde bloques hasta arenas finas los cuales se acumularon durante los principales eventos torrenciales, donde se presentaron altas precipitaciones y el aporte de material rocoso fue abundante; esta unidad se ubica en la parte baja de la microcuenca donde la pendiente es menor y se asienta el casco urbano.

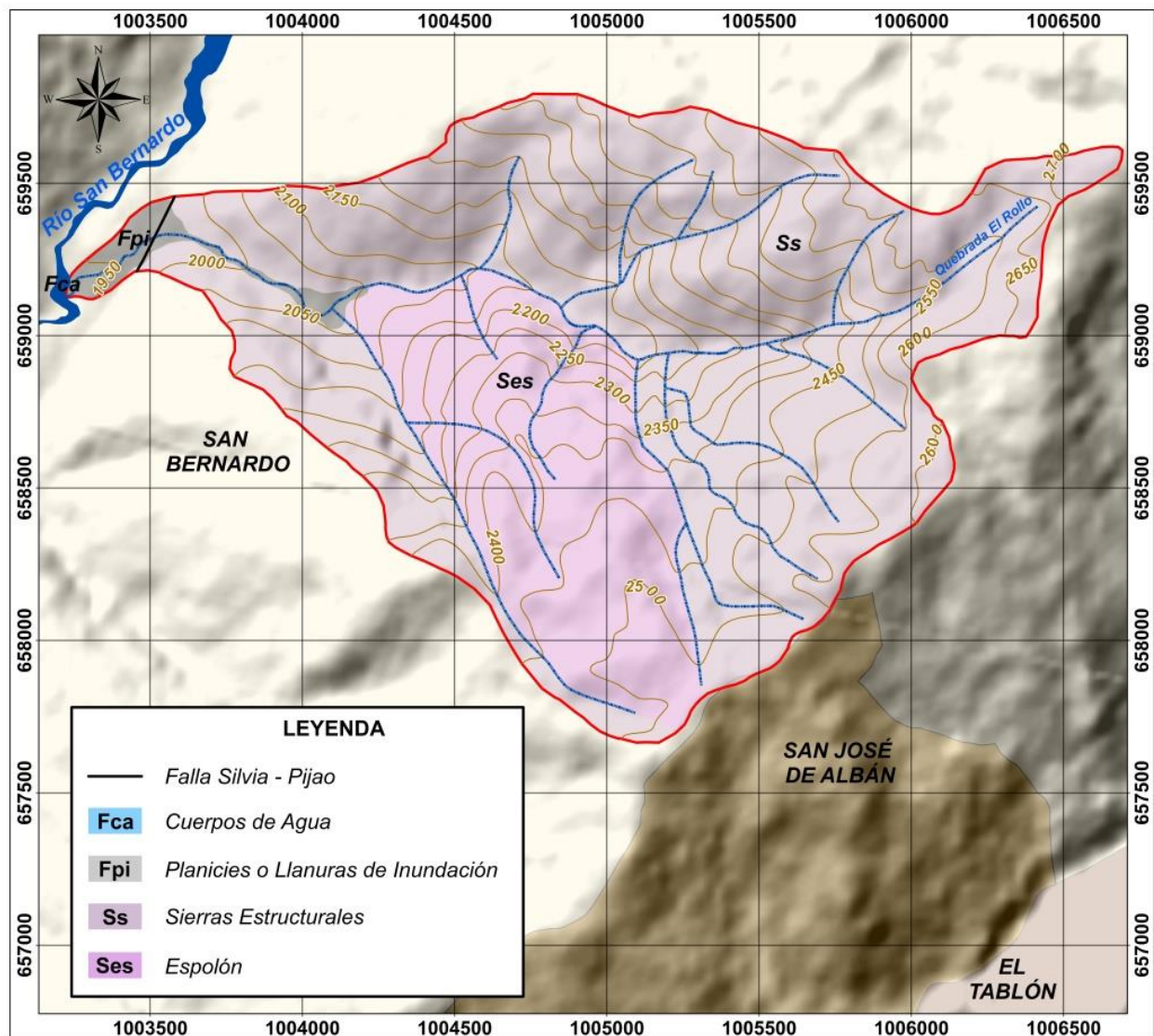


Figura 10. Mapa unidades geomorfológicas.

2.7 Unidades Geológicas Superficiales

Roca moderadamente blanda de la Formación Quebradagrande en ambiente estructural (Rmbqgae): Roca moderadamente blanda del Complejo Quebradagrande en ambiente estructural, muy fragmentada en bloques sueltos con entramamiento pobre. Las superficies de contacto entre bloques pueden presentarse altamente descompuestas y pulidas. Esta unidad presenta alta meteorización permitiendo la formación de suelo residual con textura limo-arenarcillosa de humedad media, consistencia media, ángulo de fricción cercano a 28° y cohesión alrededor de 13 kPa.

Roca moderadamente dura de flujos de avalanchas ardientes, flujos de lava y lahares en ambiente estructural (Rmdflaae): Roca moderadamente dura de avalanchas ardientes, flujos de lava y lahares en ambiente estructural, fragmentada en bloques angulares desajustados formados por muchos conjuntos de diaclasas. Las superficies de contacto entre bloques pueden presentarse moderadamente descompuestas y en regulares condiciones. Presenta una meteorización moderada que genera suelo residual con textura limo arenarcillosa de humedad baja, consistencia media, ángulo de fricción cercano a 28° y cohesión alrededor de 10 kPa.

Suelo transportado fluvial (Stf): Suelo transportado fluvial de terrazas, con espesor variable de arena limoarcillosa de humedad moderada, consistencia alta, condición normalmente consolidada, ángulo de fricción cercano a 28° y cohesión alrededor de 14 kPa.

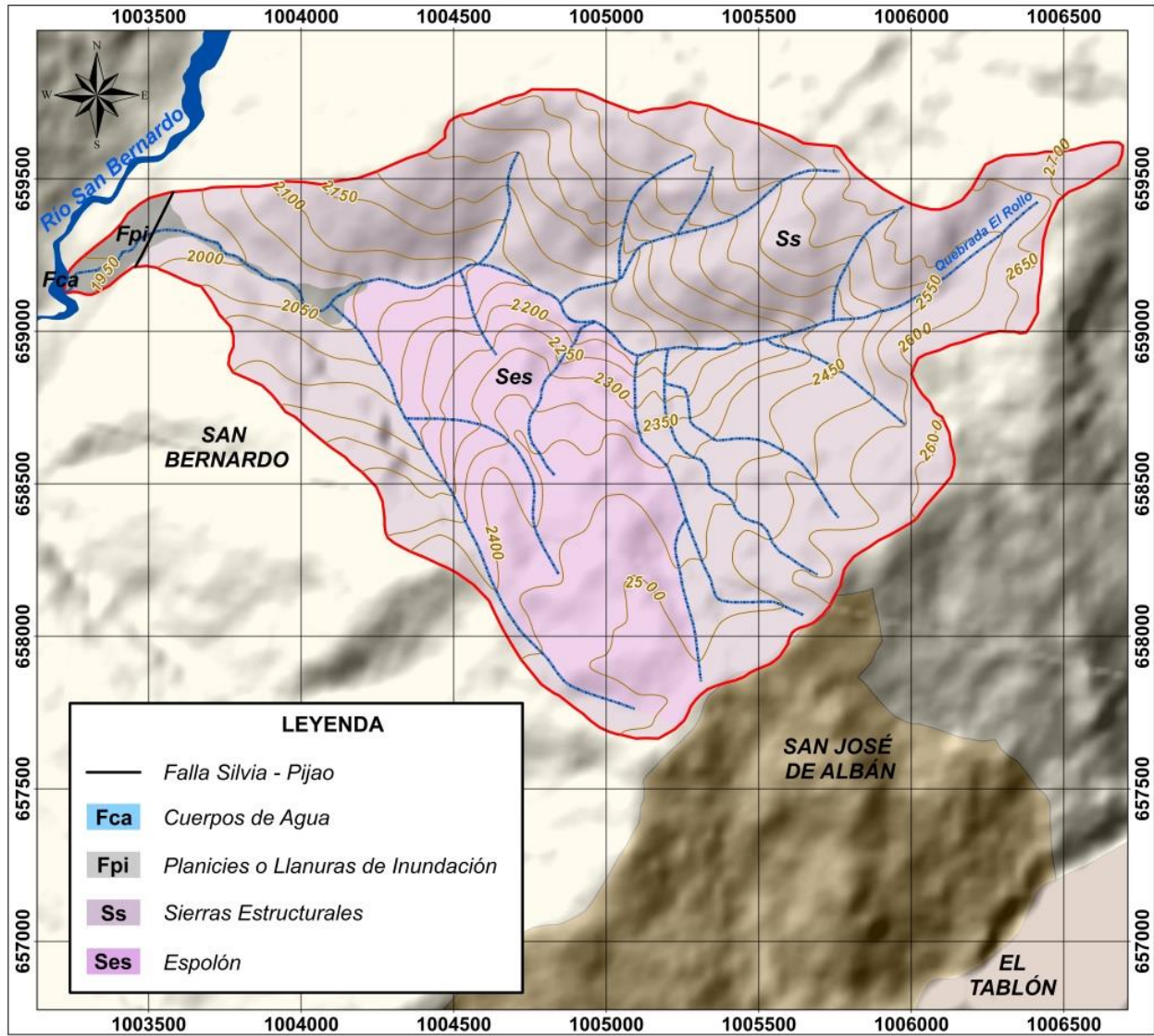


Figura 11. Unidades Geológicas Superficiales

3 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN

La Microcuenca objeto de estudio hace parte de la cuenca del Juanambú y se encuentra ubicada en el Municipio de San Bernardo, Departamento de Nariño. Se sitúa aproximadamente a 75 kilómetros de San Juan de Pasto, la capital del departamento. Así mismo, se encuentra localizada en un área de influencia del macizo colombiano, que hacen de esta tierra propicia para diversidad de cultivos.

El municipio de San Bernardo cuenta con una estación climática ordinaria, la cual será la estación base para el modelo hidrológico, no obstante, se ha tenido en cuenta para el

cálculo, el área de influencia de 5 estaciones cercanas para evaluar la afectación de cada una de ellas (tabla 2).

Tabla 2. Información de las Estaciones cercanas.

ESTACIÓN	CATEGORÍA	MUNICIPIO	ESTE	NORTE
San Bernardo [52045030]	Climática Ordinaria	San Bernardo	1005290	662052
Cruz la 1 [52030070]	Pluviométrica	La Cruz	1010850	669793
Berruecos [5204016]	Pluviométrica	Arboleda	993046	658735
Unión LA [52030030]	Pluviométrica	La Unión	994159	666475
Aponte [52040050]	Pluviométrica	El Tablón	1005290	647678

Con esta información, se procede a la creación de polígonos de Thiessen, los cuales se crean al unir los puntos de ubicación de las estaciones entre sí, y trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. Este procedimiento se realizó a través de la herramienta Polígonos de Thiessen del Programa ArcGis 10.2 (figura 12).

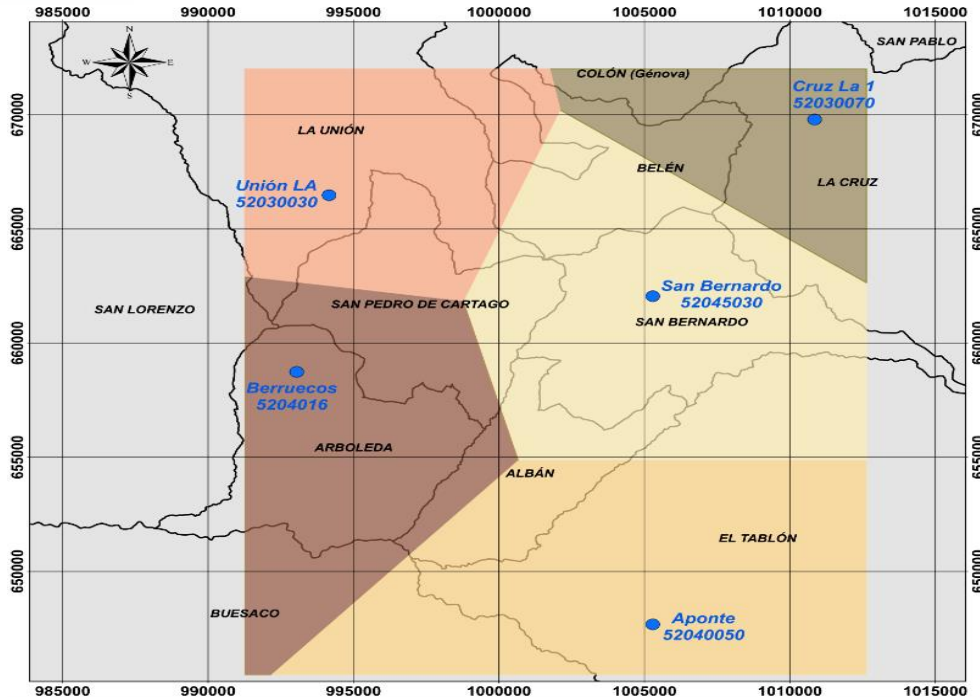


Figura 12. Polígonos de Thiessen para las Estaciones.

Observando los polígonos generados por Arc Gis, notamos que el área de influencia de la estación de San Bernardo abarca todo el municipio, así mismo las distancias de cada una de las estaciones a la estación base se muestra a continuación:

Tabla 3. Distancias de las Estaciones respecto a la estación base.

ESTACIÓN	MUNICIPIO	DISTANCIA
Aponte	El Tablón	14,37
Berruecos	Arboleda	12,68
Unión LA	La Unión	11,97
Cruz la 1	La Cruz	9,53

Considerando lo anterior, el criterio de selección para el relleno de los datos de la estación base está basado en priorizar las más cercanas y que posean un número suficiente de datos, recomendable mínimo con 30 años de mediciones. De este modo, se ha descartado la estación de Cruz la 1 y Unión LA por la ausencia de datos disponibles, aunque son las que más cerca están de la estación base. De este modo, se eligió la

estación de Berruecos, la cual, si cuenta con datos necesarios, resultando el siguiente análisis:

Tabla 4. Disponibilidad de datos de las Estaciones.

ESTACIÓN	Rango de series de Precipitación máximas diarias	No días faltantes
SAN BERNARDO	01/01/1974 - 12/12/2017	386
BERRUECOS	01/01/1981 - 12/12/2017	3181

La tabla 4 muestra que existen varios meses faltantes en la estación de San Bernardo, sobre todo en los años 2006 y finales del 2017 como se muestra a continuación en la figura 13:

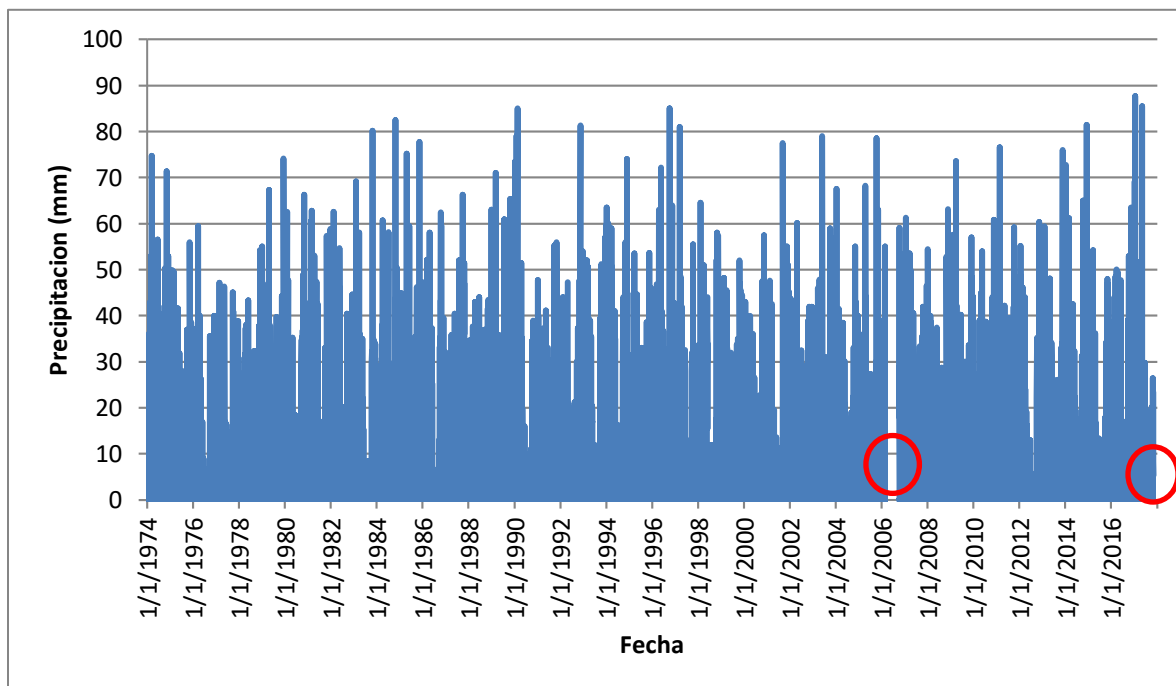


Figura 13. Serie de datos de precipitación Estación San Bernardo.

En cuanto a la estación de Berruecos, los datos faltantes de precipitación son muchos mayores y corresponden a periodos mucho más largos que la estación de San Bernardo, como se observa a continuación:

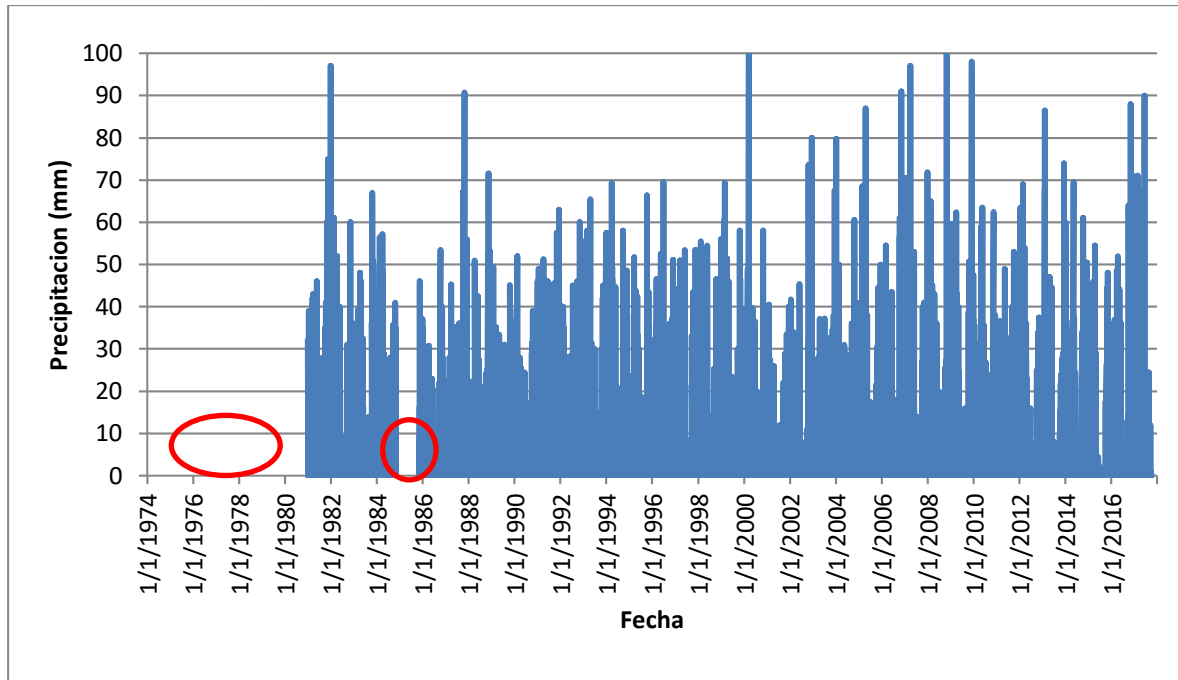


Figura 14. Serie de datos de precipitación Estación Berruecos.

A pesar de la elevada cantidad de datos faltantes en la Estación de Berruecos, los valores correspondientes al periodo 1/01/1981 – 01/01/2016 se usarán para poder rellenar los días faltantes en la estación base. Así, para llevar a cabo este procedimiento, se usó el método de Regresión Lineal, el cual está basado en el uso de datos de estaciones cercanas estableciendo la siguiente relación:

$$Y = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2 + \dots + n \cdot X_i$$

Dónde:

Y: valor de precipitación estimada

X_i : valor de precipitación en estaciones con información completa

a,b,c: constantes de regresión

De este modo, se graficó los registros de las dos estaciones como se muestra en la figura 15, donde se calculó a través de la herramienta línea de tendencia la ecuación lineal correspondiente.

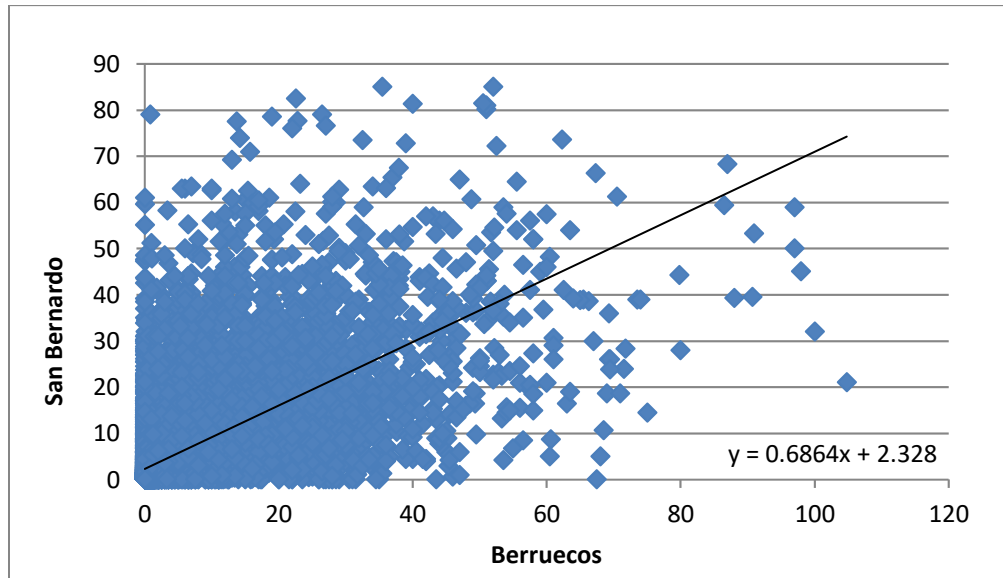


Figura 15. Serie de datos de precipitación Estación San Bernardo.

La ecuación resultante que relaciona las dos estaciones, está dada por la siguiente expresión:

$$y = 0.686x + 2.328$$

Siendo Y el valor de precipitación de la estación de San Bernardo y X el valor correspondiente a la estación de Berruecos. Aplicando este método se logró encontrar los datos faltantes en nuestra estación principal, descartando así el año 2017 por la ausencia de datos en las dos estaciones. De este modo resulta la siguiente tabla con los máximos valores de precipitación anuales:

Tabla 5. Precipitación máxima anual de la serie final.

DATOS FINALES SAN BERNARDO	
P MAX DIARIA ANUAL	AÑO
74.77	1974
56.0	1975
59.5	1976
47.2	1977
54.2	1978

74.2	1979
66.3	1980
62.8	1981
91.4	1982
80.2	1983
82.5	1984
77.7	1985
62.5	1986
66.3	1987
44.0	1988
71.0	1989
85.0	1990
56.0	1991
81.3	1992
57.0	1993
74.0	1994
53.6	1995
85.0	1996
81.0	1997
64.5	1998
52.0	1999
57.5	2000
77.5	2001
60.1	2002
79.0	2003
67.5	2004

78.6	2005
82.9	2006
61.3	2007
63.1	2008
73.6	2009
60.8	2010
76.6	2011
60.4	2012
76.0	2013
81.5	2014
54.2	2015
63.5	2016

3.1 Análisis de Homogeneidad de los datos Finales.

Obtenido la serie final de precipitación máximos diarios, es necesario analizar la homogeneidad de los mismos, comprobando por lo tanto si los datos presentan variaciones bruscas o si sufren modificaciones progresivas; para ello se usó la herramienta de Excel XLSTAT, donde se realizó este procedimiento para toda la serie de precipitación máxima diaria, encontrando los siguientes resultados:

Tabla 6. Estadísticos de la serie de precipitación máxima diaria.

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Desv. típica
SERIE MAX DIARIA	13149	0	13149	0.000	85	10.379

Existen varias pruebas de homogeneidad aplicables a series de datos, entre ellas la prueba Normal Estándar (SNHT), Pettitt y Buishand (*Moreno 2011*). Aplicando por ejemplo el método de Buishand, que puede ser empleado en variables con cualquier tipo de distribución, propone identificar un cambio en la media de la serie de datos. De esta

forma, se realiza la prueba con un intervalo de confianza del 99% y nivel de significancia 5%, usando simulaciones Monte Carlo. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 7. Resultados prueba de Buishand.

Prueba de Buishand (SERIE MAX DIARIA):	
P	140.65
t	11434
valor-p (bilateral)	0.095
alfa	0.05

Interpretación de la prueba:

H₀: Los datos son homogéneos

H_a: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H₀.

El postulado concluye que para que exista homogeneidad en una serie de datos el número de Buishand (B), debe ser muy próximo a cero, por lo cual interpretando esta prueba se obtuvo buenos resultados, es decir que la serie de datos era homogénea. Los resultados finales son presentados a continuación:

Tabla 8. Interpretación prueba de Buishand.

Resumen:	Prueba Exitosa
	Bushand
	<i>En caso de Homogeneidad los valores deben ser próximos a cero</i>
Valor de B	0.000000035

Por otro lado, la prueba de Pettitt no es una prueba paramétrica y se basa en rangos, haciendo caso omiso a la normalidad de la serie. Esta prueba se aplicó con un nivel de

significancia del 5% y un intervalo de confianza del 99% arrojando los siguientes resultados:

Tabla 9. Resultados prueba de Pettitt.

Prueba de Pettitt (SERIE MAX DIARIA):	
K	2634751
t	7116
valor-p (bilateral)	< 0.0001
alfa	0.05

Interpretación de la prueba:

H0: Los datos son homogéneos

Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Puesto que el valor-p calculado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha

El resultado de la prueba muestra que la serie de datos no es homogénea y que existe al menos un valor donde existe un cambio significativo. Por último, la prueba SHNT es un test muy difundido y del cual se han desarrollado versiones para analizar cambios en la media, la varianza y la tendencia de la serie. Aplicando este método se encontró lo siguiente:

Tabla 10. Resultados prueba SNHT

Prueba SNHT (Serie MAX Diaria):	
T0	5,91
t	1978
valor-p (bilateral)	0,1481
alfa	0,05

Interpretación de la prueba:

H0: Los datos son homogéneos

Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

La prueba concluye que la hipótesis nula será aceptada si para el valor T0 y para el tamaño de la muestra se supera el nivel de significación impuesto. Evidentemente el valor $-p$ es mayor que el de significancia alfa, por lo cual se concluye que la serie de datos es homogénea.

En vista de los resultados obtenidos, donde se tiene dos pruebas favorables y una desfavorable se asume por mayoría de resultados aceptables como homogénea la serie final de precipitación.

3.2 Análisis estadístico de las precipitaciones máximas en la Estación de San Bernardo.

Es necesario elaborar un análisis estadístico de las precipitaciones máximas para relacionar esos eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia, por lo cual se ha planteado los cálculos de cuatro funciones de distribuciones para calcular la precipitación máxima asociada a un periodo de retorno.

Las cinco funciones a analizar son las siguientes:

- Gumbel: Basado en el método de los momentos.
- GEV (General Extreme Value).
- SQRT: por el método de máxima verosimilitud.
- TCEV(Two Component Extreme Value)

Para calcular los valores por estas funciones se usó el programa AFINS 2.0, desarrollado por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia. Este es un programa para el análisis de la frecuencia de extremos hidrológicos (caudal o lluvia), en un punto y utilizando información sistemática y/o no sistemática. Se entiende por información Sistemática aquella que es observada de forma sistemática una estación de aforos o pluviómetro. Por otra parte, se entiende por información no Sistemática aquella que no se ha obtenido en una estación de medición, por análisis de eventos históricos o mediante técnicas de paleohidrología. La información no Sistemática sólo es posible con caudales, y suele asociarse a un límite de percepción,

por lo que desde el punto de vista estadístico es una información censurada (IIAMA, 2019).

El método de estimación del programa AFINS, es el de Máxima Verosimilitud, así mismo el programa ofrece la posibilidad de estimar inicialmente los parámetros por el método de los Momentos.

3.2.1 Función Gumbel

Para la estimación de los parámetros de la función Gumbel se utiliza el Método de los Momentos, igualando los parámetros muestrales (media, varianza y coeficiente de asimetría) a las expresiones de estos estadísticos, en función de los parámetros de la distribución.

Gumbel es la particularización de la función “General Extreme Value” cuando uno de sus parámetros toma el valor cero. De esta forma, la ley de probabilidad queda definida por la siguiente función de distribución, siendo x el valor de la precipitación diaria máxima anual (IIAMA, 2019)

$$F_x(x) = e^{-\lambda e^{-\theta x}}$$

Donde λ Y θ son los parámetros de la función de distribución. De este modo, los valores encontrados por el programa son los siguientes (figura 16):

$$\lambda = 443.701$$

$$\theta = 0.09905$$

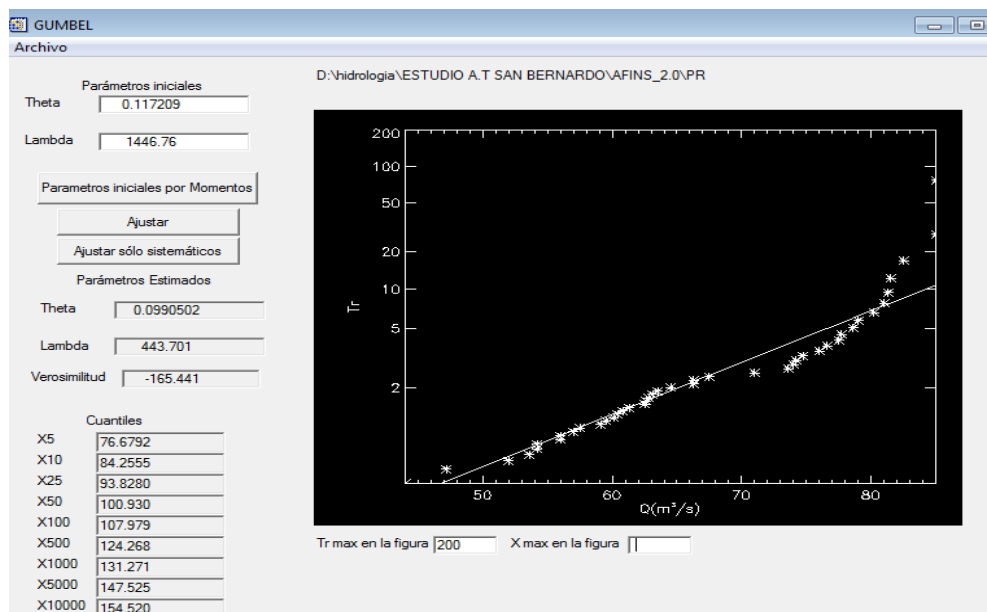


Figura 16. Resultados función de distribución Gumbel.

3.2.2 Función SQRT- et MÁX.

Esta distribución propuesta por Etoh, T. et al en 1986, está derivada explícitamente para precipitaciones máximas diarias. En la función SQRT-ET máx, los cuantiles estimados son similares a los de la distribución Gumbel para períodos de retorno bajos y medios.

La función que describe esta probabilidad es:

$$F(x) = \exp[-k (1 + \alpha x)] \cdot \exp(-\alpha x)$$

Dónde: $F(x)$ = probabilidad de que se presente un valor inferior a x

k, α = parámetros de la distribución, que dependen de la media y desviación típica

El valor de los parámetros para esta función fueron los siguientes (figura 17):

$$k = 21646.6$$

$$\alpha = 2.59454$$

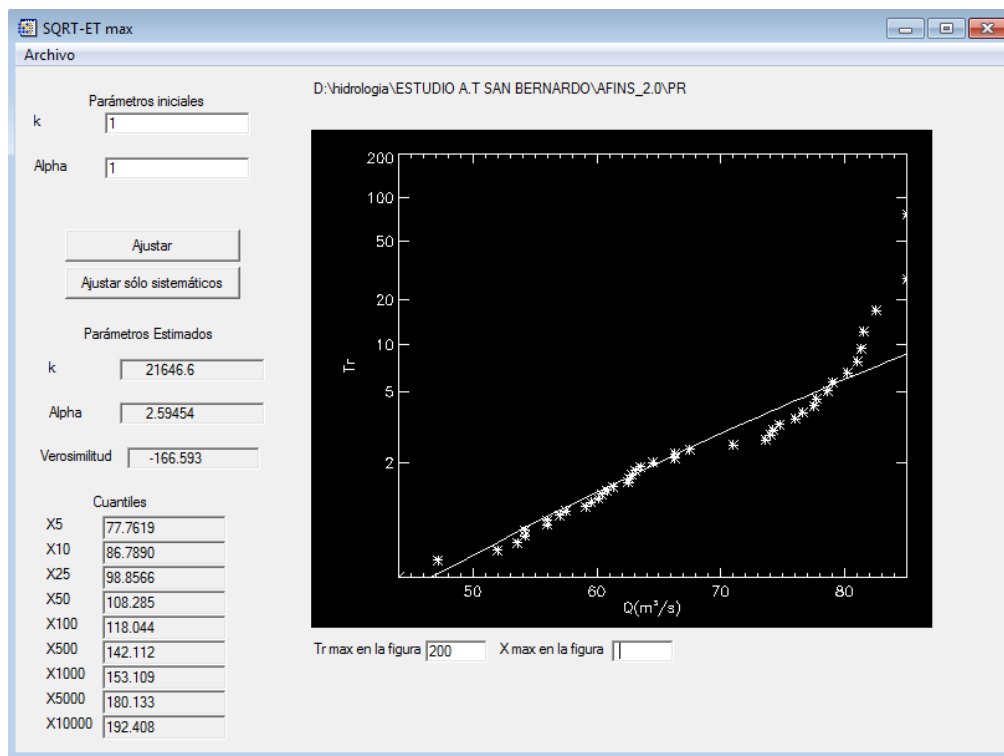


Figura 17. Resultados función de distribución SQRT-ET max.

3.2.3 Función GEV.

El modelo para el que se desarrolla la teoría de valores extremos está enfocado a describir el comportamiento estadístico de $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$ donde X_1, \dots, X_n es una

secuencia de variables aleatorias independientes con distribución común F y M_n representan el máximo del proceso sobre n unidades de tiempos de observación (IIAMA, 2019). Esta función tiene el siguiente estadístico:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta}} \right]$$

$$f(x) = F(x) \left[\frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} \right]$$

Donde α es el parámetro de escala, β es el parámetro de forma y x_0 es el parámetro de localización. De este modo, el programa nos muestra los siguientes resultados para los parámetros y cuantiles correspondientes:

- Estación San Bernardo
 $\beta = 0.4826$
 $\alpha = 11.56$
 $X_0 = 64.02$

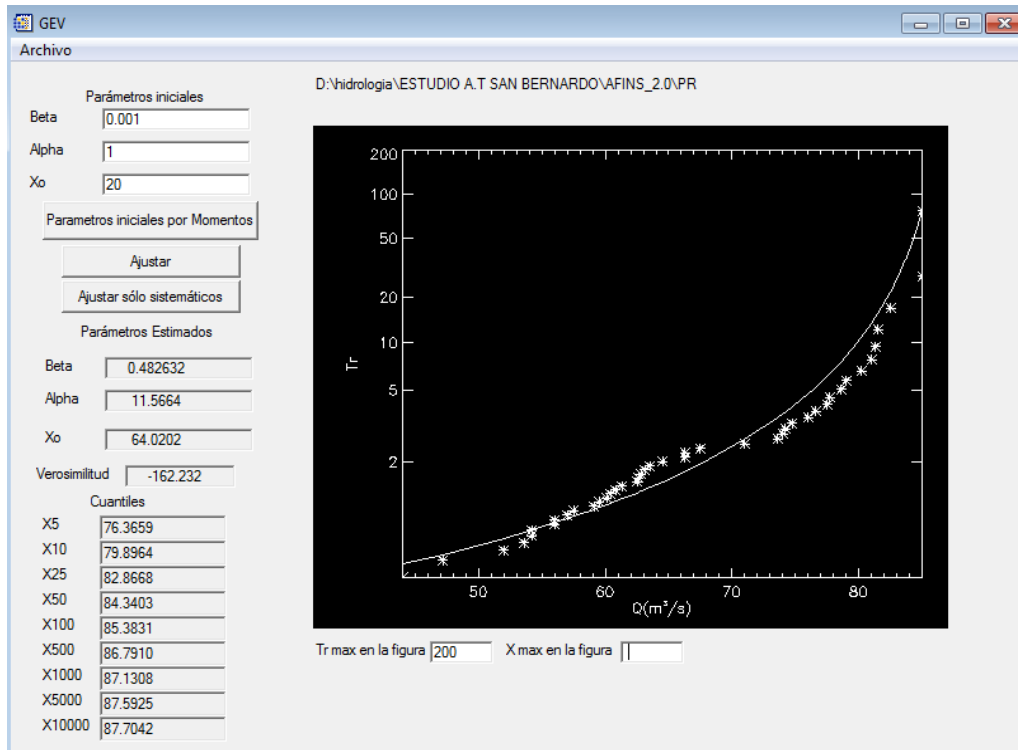


Figura 18. Resultados función de distribución GEV.

3.2.4 Función TCEV.

Esta función asume que las poblaciones de las avenidas máximas anuales ordinarias (X1) y extraordinarias (X2) derivan de poblaciones Gumbel independientes. Por tanto, la avenida máxima anual será la máxima de estas dos, siendo su función de distribución el producto de las funciones de distribución originales (IIAMA, 2019).

$$F_{x(x)} = \exp(-\lambda_1 e^{-\theta_1 x} - \lambda_2 e^{-\theta_2 x})$$

donde λ_1 y θ_1 son los parámetros de forma y escala co-rrespondientes a las avenidas ordinarias, y λ_2 y θ_2 los de las avenidas extraordinaria. De este modo se encontraron los siguientes resultados (figura 19):

Estación San Bernardo

- $\theta_1 = 5.48$
- $\theta_2 = 0.08$
- $\lambda_1 = 1452.13$
- $\lambda_2 = 165.63$

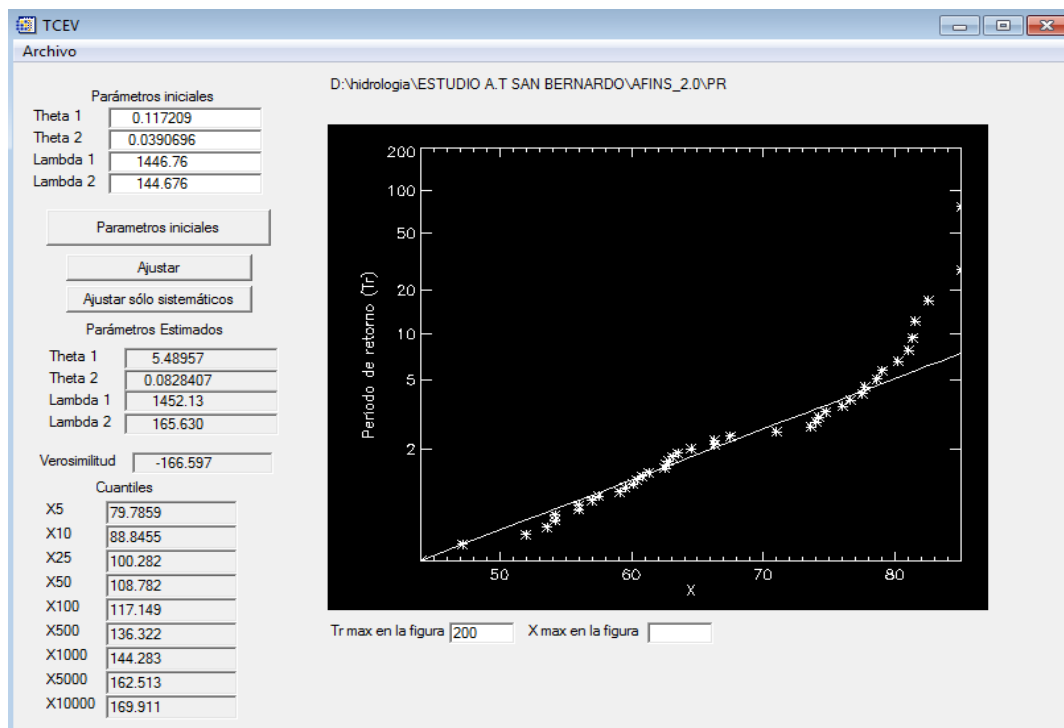


Figura 19. Resultados función de distribución TCEV.

Obtenidos los cuantiles para cada función de distribución, es importante observar el comportamiento de la probabilidad de nuestra serie de datos en relación a nuestras

funciones calculadas y analizar cuál de ellas es la que mejor se ajusta a los datos de precipitación correspondientes.

Al analizar los datos obtenidos por el programa, se nota claramente que las funciones Gumbel, SQRT y TCEV presentan los cuantiles más altos, mientras que la función GEV los valores más bajos y como se ve en el gráfico, la tendencia de los datos de la serie de precipitación es muy similar a esta función de distribución.

Como se mencionó al principio de este apartado, el programa AFINS 2.0 usa el método de Verosimilitud, la cual es una prueba de hipótesis que compara la bondad de ajuste de dos modelos, un modelo no restringido con todos los parámetros libres y su modelo correspondiente restringido por la hipótesis nula a menos parámetros, para determinar cuál ofrece un mejor ajuste para los datos de muestra. De esta manera, para la escogencia de la función de distribución con mayor ajuste, se consideró el valor de la verosimilitud brindada por el programa. En conclusión, se ha considerado los valores de la función GEV como los que más se ajustan al comportamiento de la microcuenca, los cuales presentan los valores de verosimilitud más alta (-163.405).

4 ESTUDIO HIDROLÓGICO

Una de las partes más importantes del estudio tiene que ver con el cálculo de los procesos hidrológicos que se llevan en la microcuenca. En este punto es importante determinar los caudales que aportan cada una de las áreas y encontrar el hidrograma respectivo que nos dé idea de cuánta agua de escorrentía puede producirse como respuesta a un evento de precipitación.

Este estudio partirá de la serie de precipitación máxima diaria anual encontrada en el capítulo anterior, y con ella se calculará los valores de intensidad correspondientes asociados a un periodo de retorno, concluyendo en las curvas IDF de la microcuenca. Después de obtenida esta información, se procederá a calcular el modelo de producción de escorrentía a través del programa Hec- HMS obteniendo los hidrogramas respectivos. Cabe resaltar que para la elaboración del modelo de producción se apoyara de trabajo de campo, uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis geomorfológico e información adicional de entidades gubernamentales como es el caso del IDEAM.

4.1 Cálculo de la curva IDF de la microcuenca

Como se observó en el apartado del análisis de precipitación, se logró obtener los cuantiles para diferentes periodos de retorno según la función de probabilidad GEV, sin embargo, será necesario distribuir ese valor de precipitación máximo durante el día. Esto

se logra haciendo uso de coeficientes de lluvia que representan la distribución de la lluvia máxima en 24 horas durante el día. Para este cálculo se ha considerado dos tipos de coeficientes, aquellos que se usan para cuencas en Perú y otros en Brasil.

Los primeros se los ha tomado de D F. Campos A, 1978 los cuales fueron calculados a partir de estudios de cuencas en ese país (Tabla 11).

Tabla 11. Coeficientes de distribución para cuencas en Peru.

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Estos valores también son bastante usados para estudios hidrológicos en Colombia, por la similitud del área Andina. De este modo los valores de precipitación que se encontraron fueron calculados multiplicando el valor de la precipitación asociada a un periodo de retorno por el valor del coeficiente para cada duración:

Para $t=1$ hora y $T=5$ años: Precipitación (GEV) x Coeficiente lluvia = $76.60 \times 0.30 = 22.98$

De esta manera los valores de precipitación para cada periodo de retorno distribuido durante el día se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 12. Valores de precipitación para la distribución en 24 horas.

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración				
		5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
24 hr	X24 = 100%	76.6039	80.2480	83.3652	84.9375	86.0659
18 hr	X18 = 91%	69.7095	73.0257	75.8623	77.2931	78.3200
12 hr	X12 = 80%	61.2831	64.1984	66.6922	67.9500	68.8527
8 hr	X8 = 68%	52.0907	54.5686	56.6883	57.7575	58.5248
6 hr	X6 = 61%	46.7284	48.9513	50.8528	51.8119	52.5002
5 hr	X5 = 57%	43.6642	45.7414	47.5182	48.4144	49.0576
4 hr	X4 = 52%	39.8340	41.7290	43.3499	44.1675	44.7543

3 hr	X3 = 46%	35.2378	36.9141	38.3480	39.0713	39.5903
2 hr	X2 = 39%	29.8755	31.2967	32.5124	33.1256	33.5657
1 hr	X1 = 30%	22.9812	24.0744	25.0096	25.4813	25.8198

Obtenidos los datos de precipitación ya se puede calcular los valores correspondientes a la intensidad de precipitación para la posterior construcción de las curvas IDF. Para ello, la intensidad será el valor de la precipitación dividido por el tiempo de duración para cada periodo de retorno:

$$I = \frac{P[mm]}{t_{duracion}[h]}$$

Tabla 13. Valores de intensidad para la distribución en 24 horas.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno				
Hr	min	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
24 hr	1440	3.1918	3.3437	3.4736	3.5391	3.5861
18 hr	1080	3.8728	4.0570	4.2146	4.2941	4.3511
12 hr	720	5.1069	5.3499	5.5577	5.6625	5.7377
8 hr	480	6.5113	6.8211	7.0860	7.2197	7.3156
6 hr	360	7.7881	8.1585	8.4755	8.6353	8.7500
5 hr	300	8.7328	9.1483	9.5036	9.6829	9.8115
4 hr	240	9.9585	10.4322	10.8375	11.0419	11.1886
3 hr	180	11.7459	12.3047	12.7827	13.0238	13.1968
2 hr	120	14.9378	15.6484	16.2562	16.5628	16.7829
1 hr	60	22.9812	24.0744	25.0096	25.4813	25.8198

Con los valores de la intensidad para los diferentes periodos de retorno se puede graficar las diferentes curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la serie de precipitación máxima anual en la estación de San Bernardo (figura 20).

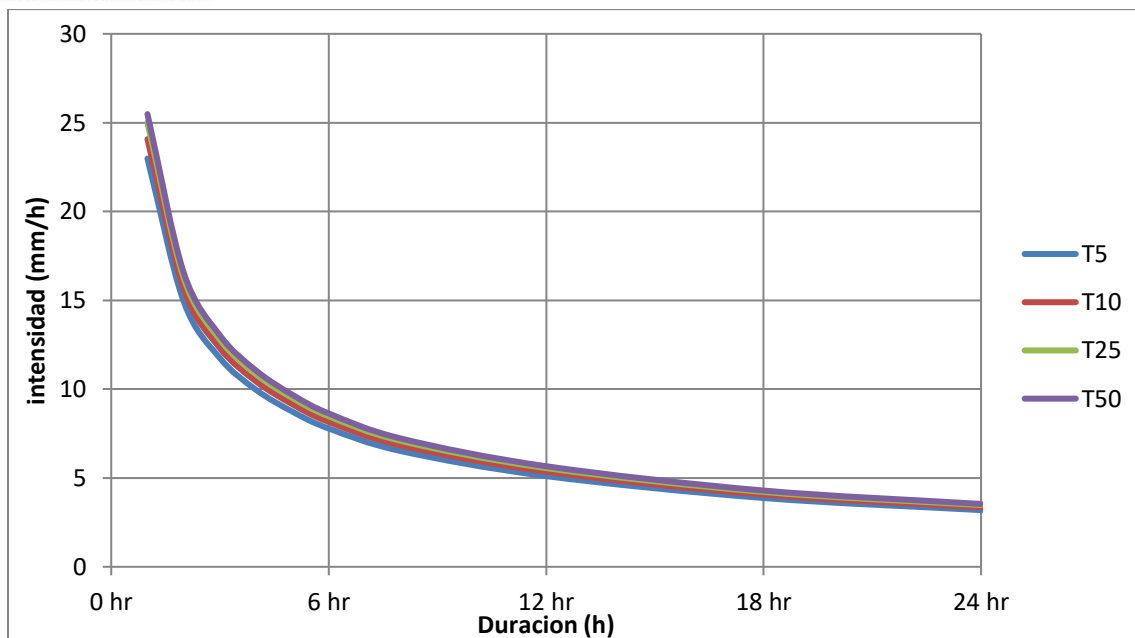


Figura 20. Curva IDF a partir de los coeficientes en Perú.

Del mismo modo que con los coeficientes para cuencas del Perú, también se calculó una distribución de lluvia con el uso de coeficientes usados en Brasil, los cuales tienen los siguientes valores:

Tabla 14. Valores de los coeficientes de distribución para cuencas en Brasil.

Relación	La Suela	Córdoba	Brasil	Denver	U.S. W. Bureau
5 min/ 30 min	0,25	0,35	0,34	0,42	0,37
10 min/ 30 min	0,45	0,57	0,54	0,63	0,57
15 min/ 30 min	0,62	0,72	0,7	0,75	0,72
20 min/ 30 min	0,77	0,84	0,81	0,84	
25 min/ 30 min	0,89	0,93	0,91	0,92	
30 min/ 1 h	0,69	0,79	0,74		0,79
45 min/ 1 h	0,87	0,92	0,83		
1 h / 24 h	0,54	0,60	0,42		
6 h / 24 h	0,88	0,85	0,72		
8 h / 24 h	0,91	0,88	0,78		
10 h / 24 h	0,93	0,90	0,82		
12 h / 24 h	0,95	0,92	0,85		
24 h / 1 día	1,1	1,1	1,1		1,13

Con estos coeficientes, calculamos las intensidades correspondientes, resultando por lo tanto la siguiente tabla de precipitaciones:

Tabla 15. Valores de precipitación para la distribución en 24 horas.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno					
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
24 hr	1440 hr	2.72	3.17	3.47	3.85	4.66	4.40
12 hr	720 hr	4.63	5.39	5.90	6.54	7.92	7.48
1 hr	60 min	27.43	31.97	34.97	38.77	46.99	44.38
0.5 hr	30 min	96.65	112.64	123.23	136.61	146.53	156.38
0.42 hr	25 min	142.63	166.22	181.85	201.59	216.23	230.76
0.33 hr	20 min	158.70	184.95	202.33	224.29	240.58	256.76
0.25 hr	15 min	182.86	213.11	233.14	258.44	277.22	295.85
0.17 hr	10 min	211.59	246.60	269.77	299.05	320.78	342.34
0.08 hr	5 min	266.45	310.53	339.71	376.59	403.94	487.14

Obtenidos estos valores de precipitación para diferentes duraciones, procedemos a calcular las intensidades asociadas a un periodo de retorno correspondiente:

Tabla 16. Valores de intensidad para la distribución en 24 horas.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	1440 hr	2.72	3.17	3.47	3.85	4.66	4.40	5.04
12 hr	720 hr	4.63	5.39	5.90	6.54	7.92	7.48	8.57
1 hr	60 min	27.43	31.97	34.97	38.77	46.99	44.38	50.84
0.5 hr	30 min	96.65	112.64	123.23	136.61	146.53	156.38	179.14
0.42 hr	25 min	142.63	166.22	181.85	201.59	216.23	230.76	298.72
0.33 hr	20 min	158.70	184.95	202.33	224.29	240.58	256.76	332.36

0.25 hr	15 min	182.86	213.11	233.14	258.44	277.22	295.85	382.97
0.17 hr	10 min	211.59	246.60	269.77	299.05	320.78	342.34	443.15
0.08 hr	5 min	266.45	310.53	339.71	376.59	403.94	487.14	558.04

Teniendo ya la tabla de intensidades se procede a construir las curvas IDF correspondientes a los de coeficientes de lluvia en Brasil, resultando las siguientes curvas (figura 21):

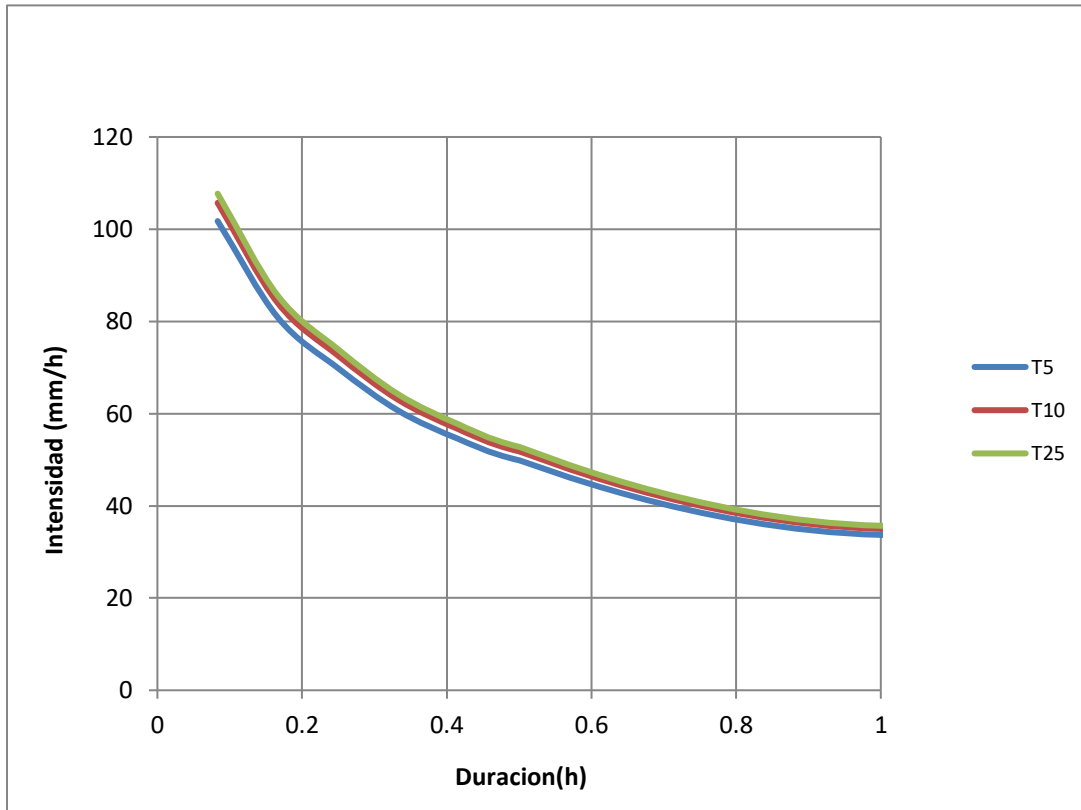


Figura 21. Curva IDF a partir de los coeficientes en Brasil.

4.2 Ajuste a curvas sintéticas

Estos valores de intensidad posteriormente deben ser ajustados a una curva IDF sintética, las cuales existen en gran variedad, no obstante, se ha considerado para el cálculo de ajuste la función de Aparicio (1997) la cual esta expresada como se muestra a continuación:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

Donde **K**, **m** y **n** son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, **T** corresponde al periodo de retorno y en tanto que **I** y **t** corresponden a la intensidad de precipitación y la duración respectivamente. Estos parámetros se los calculo a partir de la ecuación de regresión múltiple, donde se crea un sistema de ecuaciones que dependen del número de incógnitas a encontrar:

$$\begin{aligned} \sum y &= Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ \sum (x_1 y) &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1^2) + a_2 \sum (x_1 x_2) \\ \sum (x_2 y) &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2^2) \end{aligned}$$

Donde **N** es el número de datos y las incógnitas son a_0, a_1, a_2 , x_1, x_2 y y son respectivamente los logaritmos del período de retorno, la duración y la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. Una vez calculados los valores de a_0, a_1, a_2 es posible evaluar los parámetros k, m, n aplicando el antilogaritmo a estos valores.

Para el cálculo con los coeficientes de Perú se tiene la siguiente ecuación y las curvas IDF correspondientes (figura 22):

$$I\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{275.5722 * T^{0.038286}}{t^{0.61639}}$$

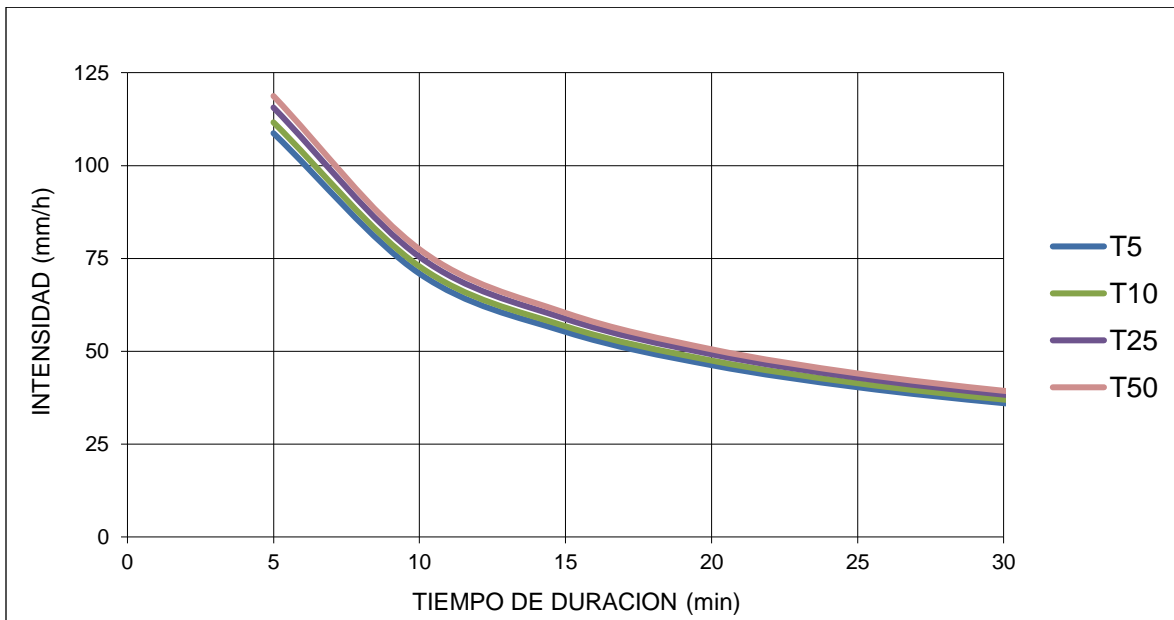


Figura 22. Ajuste de la curva IDF para la distribución de Perú.

De igual modo para el caso de los coeficientes de Brasil, se ha calculado los parámetros de la ecuación IDF mencionada anteriormente y mediante regresión múltiple se obtuvo la siguiente distribución:

$$I\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{2430.1054 * T^{0.105442}}{t^{0.84229}}$$

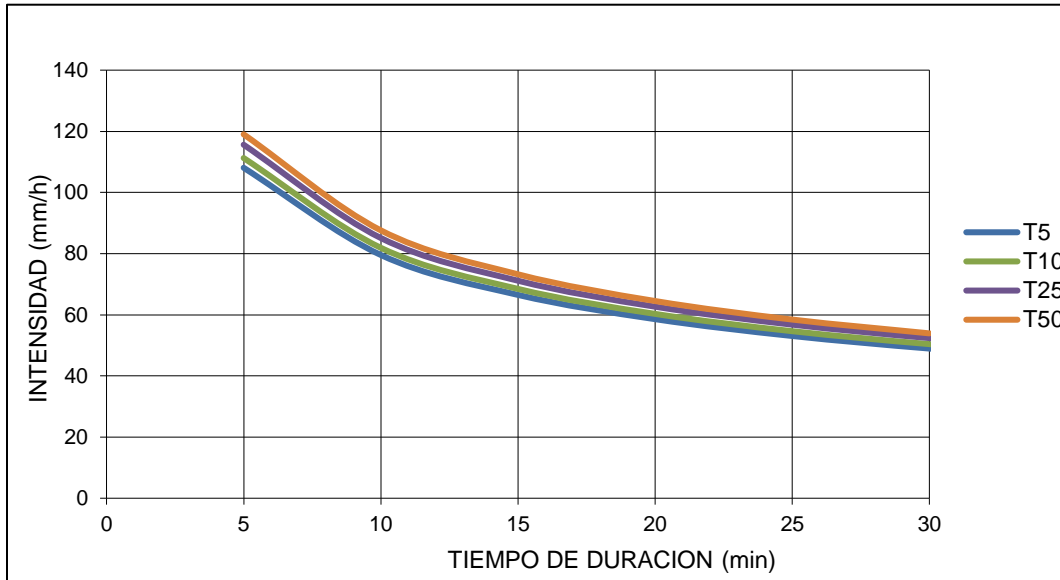


Figura 23. Ajuste de la curva IDF para la distribución de Brasil.

Después de haber calculado las IDF usando tanto los coeficientes de Perú como de Brasil, por otra parte, el IDEAM suministro las curvas IDF de la estación de San Bernardo, las cuales fueron ajustados según la función de distribución GUMBEL y a la siguiente ecuación IDF:

$$I = \frac{C1}{(t + X0)^n}$$

Donde C1, X0 y n son los parámetros de la función y t es el tiempo de duración. Así mismo el IDEAM brinda las siguientes curvas IDF para la estación de San Bernardo y los valores de parámetros correspondientes:

Tabla 17. Valores de la curva IDF (IDEAM).

<i>t</i> (min)	PERIODO DE RETORNO T				
	2	3	5	10	25
5	88.02	99.90	113.22	129.94	151.44
10	72.22	81.92	92.80	106.47	124.06
15	61.7	70	79.3	90.9	105.6
20	53.88	61.04	69.10	79.20	92.24
25	48.04	54.39	61.54	70.51	82.09
30	43	48.8	55.2	63.2	73.4
60	28.7	32.4	36.6	41.8	53.2
120	17.2	19.4	21.8	24.8	31.4
360	7.1	8.1	9.1	10.3	13.2

Tabla 18. Valores de parámetros de la curva IDF para cada periodo de retorno (IDEAM).

TR	C1	X0	C2
2	967.071	13.396	0.823
3	1121.370	13.485	0.829
5	1294.407	13.568	0.834
10	1513.105	13.651	0.839
25	1790.847	13.734	0.843
50	1997.620	13.784	0.846

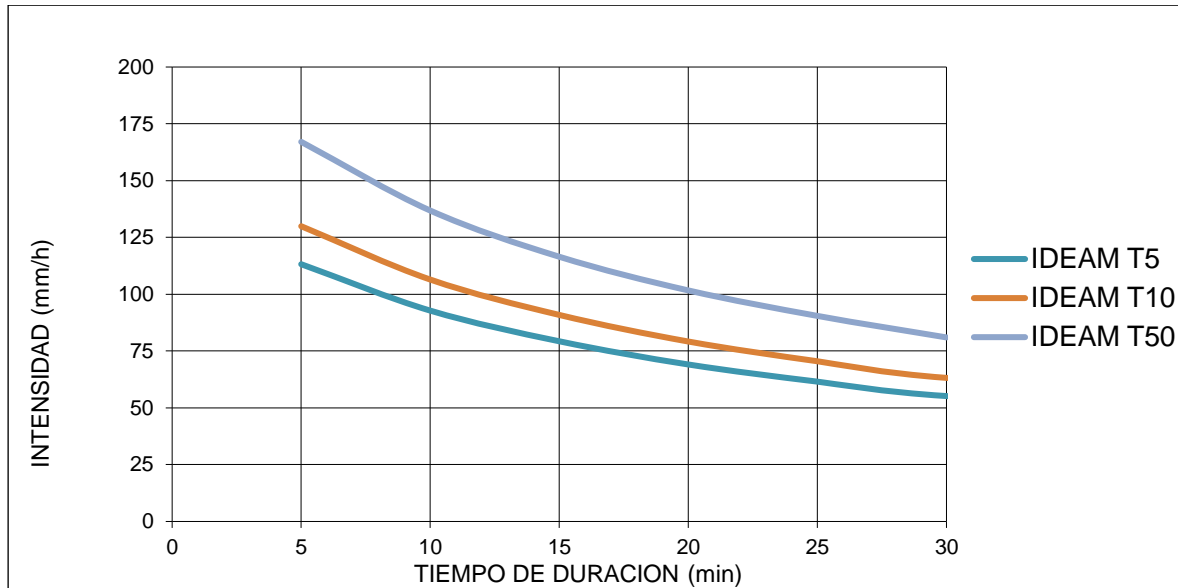


Figura 24. Curva IDF de la estación de San Bernardo proporcionada por el IDEAM.

Como era de esperarse, los valores de intensidad brindados por el IDEAM son más altos que los obtenidos por los coeficientes de distribución de lluvia, esto debido a que el IDEAM ajusta los valores a la función GUMBEL, que como se observó anteriormente, arrojan cuantiles más altos que la función GEV. Para los posteriores cálculos hidrológicos no se tendrá en cuenta los valores IDF proporcionados por el IDEAM.

4.3 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de desagüe. El tiempo de concentración también es importante para el estudio hidrológico porque suministra una idea del tiempo de duración que deberá tener la lluvia de diseño que se usará para el modelamiento. (VELEZ UPEGUI & BOTERO GUTIERREZ, 2010)

Para este procedimiento se ha calculado el tiempo de concentración a partir de varias ecuaciones, aunque algunas son aplicables para ciertas condiciones, se ha hecho el ejercicio como comparativa:

- **Método de Kirpich:** Utilizable en cuencas de tamaño medio, pendiente considerable y diseñada para suelos dedicados al cultivo. La fórmula viene dada por:

$$T_c = 0.06(L^{0.77} S^{-0.385})$$

Dónde:

L: longitud del cauce más largo

S: pendiente media del lecho

tc: Tiempo de concentración en horas

La cuenca de estudio posee una longitud de cauce $L= 4.07$ km y una pendiente media del lecho del 17%. Con esta información, el tiempo de concentración será:

$$T_c = 0.06((4.07)^{0.77} (0.17)^{-0.385})$$

$$T_c = 23 \text{ min}$$

- **Temez:** ampliamente utilizado en la península Ibérica, válido para cuencas de 1 km² hasta 3.000 km² y con tiempos de concentración desde los 15 minutos hasta las 24 horas.

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Dónde:

L: longitud del cauce más largo

i : Pendiente media del lecho

tc: Tiempo de concentración en horas

$$T_c = 73.24 \text{ min}$$

- **Ecuación del SCS:** Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 800 Ha.

$$T_c = \frac{0.0136 * L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{S^{0.5}}$$

Dónde:

L: longitud del cauce

S: Pendiente media de la cuenca

T_c: Tiempo de concentración en horas

CN: Curva número de la cuenca.

$$T_c = 8.8 \text{ horas}$$

Los resultados obtenidos varían considerablemente debido al perfil de la microcuenca, por lo tanto, entendiendo que esta es de tipo rural dedicada al cultivo y ganadería, se decidió que el tiempo de concentración que más se ajusta es el proporcionado por Kirpich. Así mismo, para los cálculos de hietogramas se aproximó este valor de 23 a 30 min.

4.4 Modelo de producción de escorrentía: modelo SCS

Es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos que determina un umbral de escorrentía (P_o) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. El Número de Curva toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad.

El modelo SCS contempla dos hipótesis conceptuales:

1. La existencia de un umbral por debajo del cual la precipitación no produce escorrentía.

$$E(t) = 0 \text{ si } P(t) \leq S_o$$

Dónde:

$E(t)$ es la escorrentía en un tiempo t

$P(t)$ es la precipitación en un tiempo t

S_o es el umbral de abstracción inicial

2. Rebasado el umbral los valores de Filtración y Eschorrentía se igualan:

$$\frac{F(t)}{S} = \frac{E(t)}{P(t) - S_o} \text{ si } P(t)$$

Por continuidad:

$$P(t) = S_o + F$$

$$E(t) = \frac{(P(t) - S_o)^2}{P(t) - S_o + S} \text{ si } P(t) > S_o$$

Siendo S la abstracción potencial del sistema (UPV, 2015).

En cuanto al número de curva (CN), es una variable que depende principalmente de las características lito-edafológicas, características de la cubierta del suelo que se calculan mediante tablas, pendiente del terreno y humedad antecedente. Cabe resaltar que el método fue desarrollado a partir de registros de lluvia y escorrentía en 24 horas, por lo que no considera explícitamente la variación temporal de la escorrentía.

4.4.1 Umbral de escorrentía

El umbral de escorrentía es la precipitación acumulada a partir de la cual, una vez empapado el terreno, el agua empieza a circular por la superficie. Este valor depende del estado inicial del suelo de la cuenca, puesto que un suelo seco absorbe más que uno saturado (UPV, 2015).

Atendiendo a algunas recomendaciones, el SCS ha definido el estado previo de humedad del suelo en tres rangos:

- Suelo tipo I(Seco)
- Suelo tipo II(Medio)
- Suelo tipo III(Húmedo)

4.4.2 Contenido inicial de humedad

La tabla de tipología de usos de suelo proporciona el valor de umbral de escorrentía (P_o), suponiendo un grado de humedad de suelo medio (previo a la precipitación). Si los días anteriores a la precipitación estudiada se produjeron precipitaciones abundantes, las abstracciones (retenciones superficiales, infiltración) serán menores, por lo que el valor real de P_o será menor al proporcionado en la tabla. En sentido contrario, si los días anteriores no ha llovido nada, el suelo estará seco, y todas las abstracciones serán mayores: hay que corregir el valor aumentándolo (Sánchez, 2017).

El estado de humedad se encuentra determinado por la lluvia total en el periodo de 5 días anterior a la tormenta. El S.C.S. usa tres intervalos de condición de humedad antecedente (CHA) denominados: seco, medio o húmedo I, II y III respectivamente (*Villon Bejar, 2002*).

CHA – I, es el límite inferior de humedad o el límite superior infiltración. Hay un mínimo potencial de escurrimiento. Los suelos de la cuenca están lo suficientemente secos para permitir el arado o cultivos.

CHA – II, es el grado medio de humedad del suelo, calculado a partir de los datos de potencial de escorrentía proporcionados en la tabla de tipología de usos de suelo.

CHA – III, es el límite superior de humedad o el límite inferior de infiltración. Hay máximo potencial de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por lluvias anteriores.

Teniendo en cuenta la precipitación antecedente, se calibra el valor de CN considerando los criterios que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 19. Condiciones de humedad según el S.C.S.

<i>Precipitación total en mm en los 5 días anteriores</i>		
CONDICIÓN	ESTACIÓN DE LATENCIA	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO
I SECO	$P \leq 13$	$P \leq 36$
II MEDIO	$13 \leq P \leq 28$	$36 \leq P \leq 53$
III HÚMEDO	$P \geq 28$	$P \geq 53$

Está comprobado que los resultados de caudales son muy sensibles al estado de humedad considerado. Muchos autores calculan para condiciones medias de humedad inicial del complejo suelo-vegetación, no obstante, estos valores pueden modificarse en función de dicha variable.

La relación entre el umbral de escorrentía (P_o) y el Número de Curva (CN) es:

$$CN(II) = \frac{5080}{50.8 + P_o}$$

Las equivalencias de CN entre las distintas condiciones de humedad son:

$$CN(I) = \frac{4.2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 - 0.13 * CN(II)}$$

Para el presente proyecto se asume como más adecuados para la zona los valores de umbral de escorrentía correspondientes a unas condiciones de humedad tipo II (medias), sin embargo, se calculan y comparan los valores para las tres condiciones de humedad definidas por el SCS.

4.4.3 Clasificación hidrológica del suelo.

Un grupo hidrológico de suelo (GHS) es un conjunto de suelos que tiene similar comportamiento frente a la generación de escorrentía y se clasifica en una de las siguientes categorías según el NRCS, 2009 (*Diaz & Teobaldis , 2017*):

- Grupo A: son suelos predominantemente arenosos, donde el agua se transmite libremente a través del perfil y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.
- Grupo B: son suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen un potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando están completamente húmedos.
- Grupo C: Son suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas. El potencial de escorrentía es moderadamente alto cuando están húmedos.
- Grupo D: son suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable.

Para una mejor interpretación, se diseñó la siguiente tabla con la información correspondiente a los grupos hidrológicos del suelo:

Tabla 20. Tipología de suelos hidrológicos según el S.C.S.

GRUPO	INFILTRACIÓN	POTENCIA	TEXTURA	DRENAJE
A	Rápida	Grande	Arenosa Areno-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media grande	Franco-Arenosa Franca Franca-Arcillosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-Arcillosa Franco-Arcillo	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño(litosuelo) u horizontes de arcilla	Limosa Arcillo-arenosa	Pobre o muy pobre

La clase hidrológica del suelo depende de la textura de estos, por lo cual se determinó esta variable del suelo para las diferentes coberturas identificadas, empleando la técnica de percepciones organolépticas, principalmente a través del “tacto” y la “vista”, de esta manera se distribuyeron puntos representativos en toda el área de la microcuenca (figura 25) y se sacaron muestras de suelo aplicando dicha técnica.

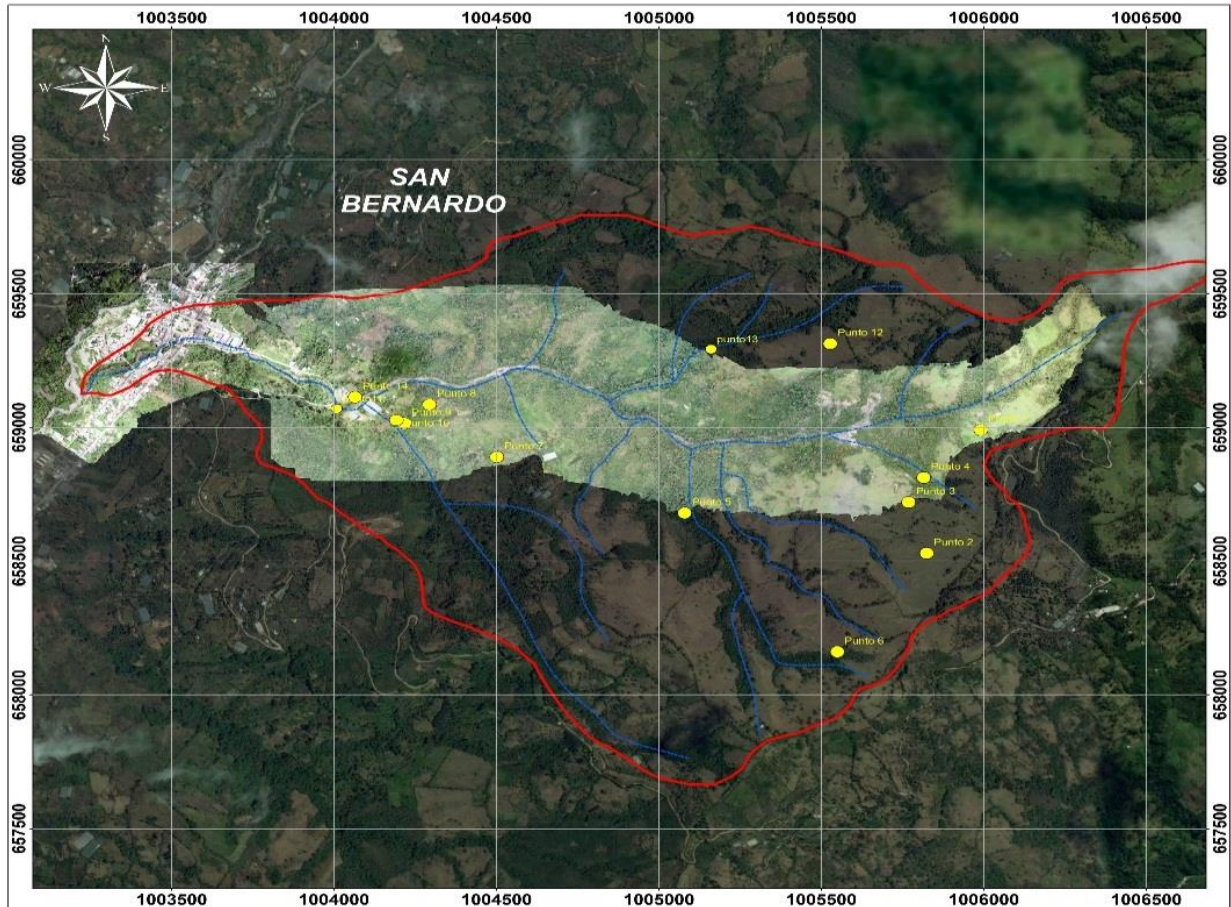


Figura 25. Distribución de puntos para muestreo de suelos

La clasificación del suelo estuvo apoyada en Un esquema orientativo propuesto por el ministerio de obras públicas y urbanismo de España M.O.P.U (figura 26).

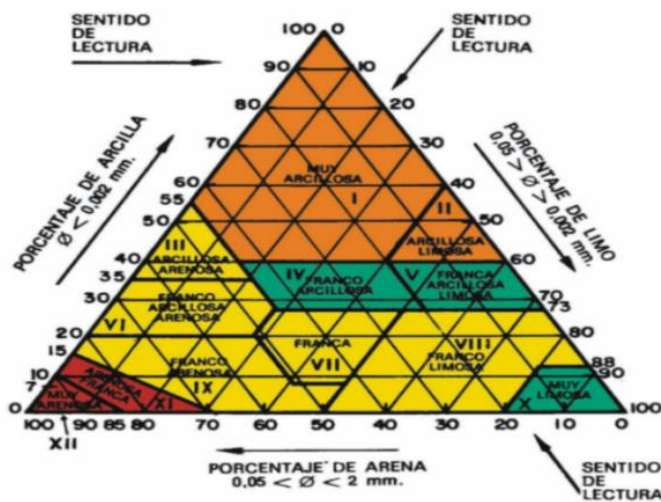


Figura 26. Grupo hidrológico de suelo propuesto ministerio de obras públicas y urbanismo de España M.O.P.U.

En la siguiente tabla se muestra los diferentes tipos de suelo determinados para cada una de las coberturas identificadas en la microcuenca El Rollo.

Tabla 21. Clase hidrológica de suelo según su uso.

Uso de Suelo (SCS)	Área %	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo
Cultivos	0,82	>3	R	A
Cultivos	17,00	>3	R	B
Praderas	38,27	>3	Pobre	B
Praderas	0,64	>3	Pobre	D
Masas forestales	1,47	>3	Clara	D
Masas forestales	40,45	>3	Media	C
Área urbana	1,35			D

N: denota cultivo según las curvas de nivel.

R: denota cultivo según la línea de máxima pendiente

En el mapa de la figura 27 se muestra los diferentes grupos hidrológicos de suelo en la microcuenca el Rollo. El 55,27% pertenece al grupo hidrológico B, presenta texturas de suelo moderadamente finas a moderadamente gruesas, reconocidas como texturas francoarenosas y francolimosas, este tipo de suelos se presenta principalmente para los cultivos y en la mayoría del área en praderas pobres. Las propiedades físicas de este grupo de suelos permiten que estos tengan una capacidad de infiltración moderada y un potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando el suelo está completamente húmedo.

El 41,45% del área total pertenece al grupo hidrológico de suelo C, caracterizado por ser suelos que tienen un índice de infiltración lento por lo cual presenta un alto potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos, su textura es moderadamente fina a fina, reconocidos como suelos francolimosos, lo cual se asocia al alto contenido de materia orgánica en el perfil de suelo, debido a la cobertura boscosa que se encuentra sobre estos suelos.

El 2,11% del área se encuentra dentro del grupo hidrológico D, caracterizados por ser suelos con tasas de infiltración muy bajas y un alto potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos, tienen texturas finas, son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable que presentan capas de arcilla; estos se encuentran en la parte alta de la microcuenca, bajo cobertura de praderas pobres y áreas boscosas con bajas densidades.

El área ocupada por la zona urbana corresponde al 1,35% del área total, representa una capa impermeable que genera escorrentía directa, por lo tanto, se ha clasificado dentro del grupo de suelos D.

Un reducido porcentaje del área de la microcuenca (0.82%) se encuentra dentro de la clasificación de grupo hidrológico de suelo A, suelos que tienen un alto índice de infiltración y por ende un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos. Son suelos arenosos bien drenados, presentan una tasa elevada de transmisión de agua; estos se encuentran hacia la parte baja de la microcuenca, con coberturas de cultivos.

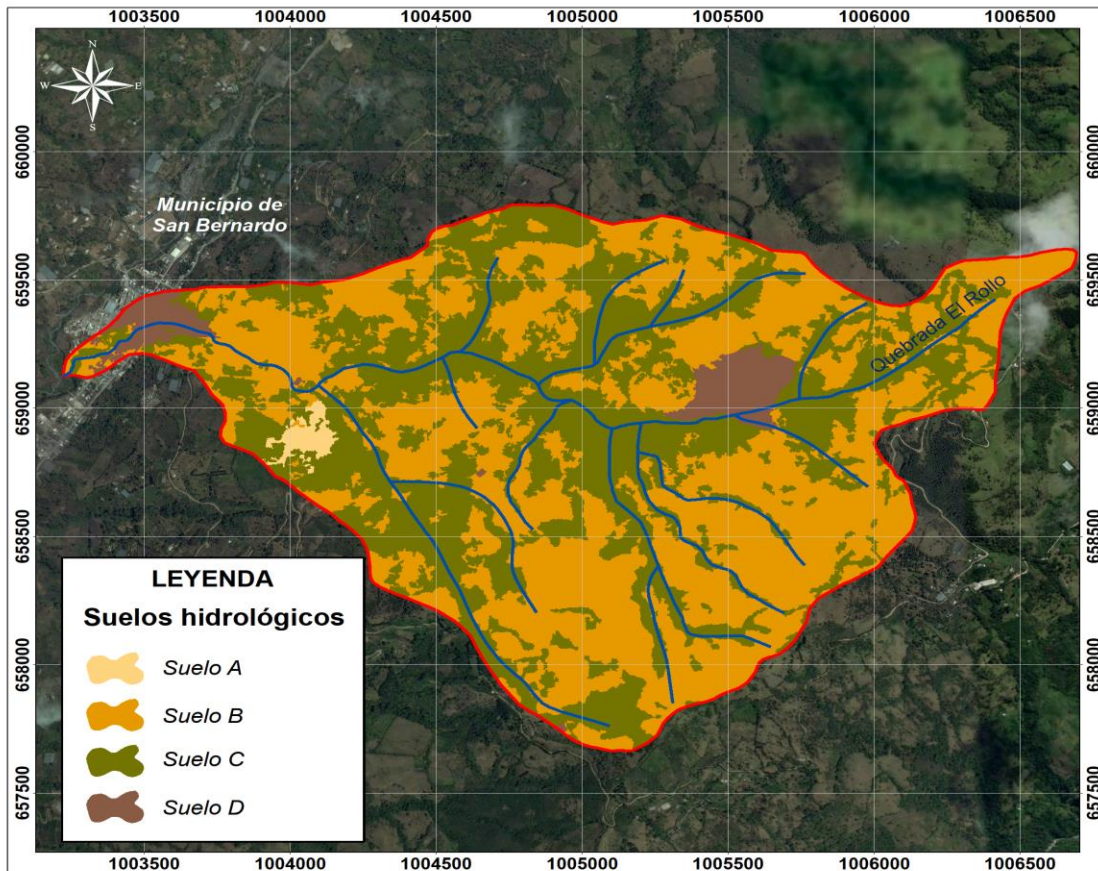


Figura 27. Mapa de suelos hidrológicos de la Microcuenca el Rollo, San Bernardo.

Estos resultados indican que un gran porcentaje del área de la microcuenca El Rollo presenta suelos con un potencial de escorrentía moderado a alto según la clasificación dada por el método del número de curva; es importante mencionar que el grupo de suelos que predomina en la microcuenca es B, el cual se encuentra bajo coberturas de cultivos y praderas con características hidrológicas pobres, este uso de suelo y manejo que se le dé al mismo, contribuye a mejorar o deteriorar las propiedades físicas del suelo, para este caso, el área de pastos es de muy baja densidad y en zonas de pendiente pronunciada se evidencia suelos erosionados a causa de la lluvia y poca cobertura.



Figura 28. Suelo cultivo caña



Figura 29. Suelo Pasturas



Figura 30. Suelos en praderas pobres y áreas boscosas



Figura 31. Suelo bosques

4.4.4 Tipo de uso del terreno.

La clasificación de usos de suelo, tratamiento del terreno para siembra de cultivos, ya sea paralelo a las curvas de nivel o perpendicular a las curvas de nivel y condición hidrológica de los suelos para la aplicación de la metodología del CN, es la propuesta por S.C.S, por lo cual se estableció una equivalencia entre esta clasificación y la clasificación de coberturas establecida de acuerdo con la metodología adaptada para Colombia Corín land cover, Nivel 3 a escala 1:100.000, obtenida para la microcuenca el Rollo. Teniendo en cuenta la metodología del S.C.S, se realizó una clasificación supervisada mediante recorridos de campo para verificar las coberturas de la microcuenca (tabla 22).

Tabla 22. Equivalencia Usos de suelos metodologías Corin Land Cover y S.C.S, Microcuenca El Rollo.

Usos de Suelo (Corine Land Cover)	Uso de Suelo (SCS)	Área (Ha)
Cultivos permanentes arbustivos	Praderas y masas forestales	2,13
Tejido urbano discontinuo	Praderas y área urbana	5,07
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Praderas, masas forestales y cultivos	238,45
Mosaico de pastos y cultivos	Praderas y masas forestales	49,67
Pastos limpios	Praderas, masas forestales y cultivos	79,39

Teniendo en cuenta la tabla 22, según la clasificación de usos de suelo propuesta por el S.C.S., en la microcuenca El Rollo, se distinguen tres usos de la tierra: praderas, masas forestales y cultivos. A continuación, se describe los conceptos dados para cada uso de acuerdo con el NRSC en 2004 (Sánchez, 2017):

4.4.4.1 Masas forestales

Se denominan así las superficies de terreno en las cuales se desarrolla vegetación leñosa arbórea o arbustiva, tales como el monte alto o los bosques. De acuerdo con la densidad de dicha vegetación se divide en a) muy espesas b) espesas; c) medias; d) claras y e) muy claras (árboles o arbustos diseminados). Dentro de la categoría “masas forestales” en la **Tabla tipología de usos de suelo**, no se han establecido diferencias en cuanto a pendiente, por considerar que no es frecuente que exista este tipo de aprovechamiento en terrenos llanos (figura 32 A – B).

4.4.4.2 Praderas

Se agrupan en esta categoría el conjunto de cultivos cuyo aprovechamiento constituye la base de alimentación de ganado (figura 33). A su vez se clasifican en:

Pobres: bajo un intenso régimen de pastoreo o con cobertura vegetal en menos del 50% de la superficie, como son los pastizales.

Medias: bajo un moderado régimen de pastoreo o con cobertura vegetal en un porcentaje de la superficie total comprendido entre el 50 y el 75%.

Buenas: bajo un pastoreo ligero o con cobertura vegetal en más del 75% de la superficie total.

Muy buenas: se consideran dentro de este grupo las praderas artificiales, las praderas naturales mixtas y los prados naturales, cuando están explotados en régimen de pastoreo. La vegetación es densa, abundante, homogénea y de cierta altura.

4.4.4.3 Cultivos

Tierras sembradas de cultivos plantados formando hileras, lo que permite realizar entre ellas determinadas labores agrícolas, destinadas a mullir el terreno, quitar las malas hierbas, etc., mientras que las plantas se desarrollan (Figura 34).



Figura 32. Coberturas de masas forestales - A) densidad boscosa clara B) densidad boscosa media



Figura 33. Coberturas de praderas pobres



Figura 34. Cobertura de cultivo de Fique

El mapa de coberturas de la figura 35 en la microcuenca El Rollo, muestra que la cubierta predominante son pasturas y áreas boscosas, estas últimas ocupan aproximadamente el 41,93 % del área total, se encuentran dispersas en el área de estudio, sin embargo, en los recorridos de campo se evidencia esta vegetación limitada, existiendo únicamente algunos relictos boscosos en partes de difícil acceso; en la parte media de la microcuenca se observa áreas con mayor densidad boscosa tanto al Norte como Sur de la microcuenca, corresponde a un tipo de bosque seco montano, presenta variedad de especies forestales arbóreas y arbustivas nativas como Guarango, Pelotillo, Encino, Laurel de Cera, Motilón silvestre, Mayo, Guayacan, Pichuelo, entre otras. De esta manera se pueden distinguir áreas boscosas con densidades medias y claras.

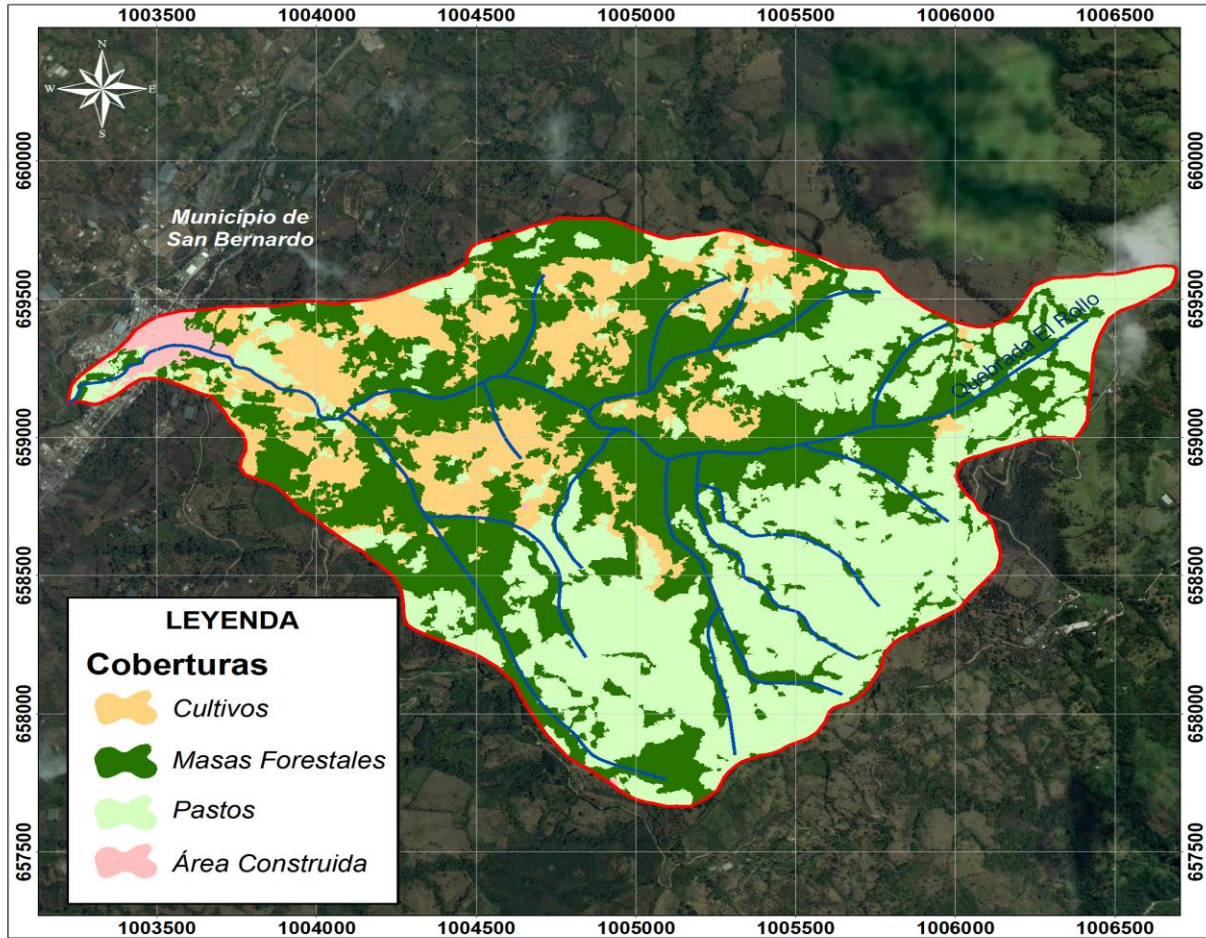


Figura 35. Mapa de Coberturas Vegetales de la Microcuenca el Rollo, San Bernardo.

El área correspondiente a praderas o pasturas pobres ocupan el 38,91 % del área total, caracterizadas por ser pastos naturales con densidad rala sin ningún tipo de manejo destinados al pastoreo de ganado, esta ocupación de suelo se extiende sobre la parte alta del área de estudio. La cantidad de área destinada a pastos permite evidenciar el alto grado de deforestación.

Los cultivos ocupan el 17,82 % del área total, se encuentran principalmente hacia la parte baja de la microcuenca, los sistemas de siembra se encuentran a favor de la pendiente del terreno sin prácticas de conservación de suelos; están representados principalmente por el sector productivo de fique, maíz, café, caña, plátano y frutales. El cultivo de fique es el que ocupa mayor área cultivada, mientras que el área urbana corresponde solo el 1,35 %.

Para cada grupo de suelo, el umbral de escorrentía (P_o) depende de las características hidrológicas del suelo, de la pendiente y del uso al que se destina. Para el cálculo del CN

en una cuenca de superficie total A, se divide ésta en diferentes subáreas A_i correspondientes a combinaciones de tipo y usos del suelo distintos y se obtiene un $P_{o,i}$ asociado a cada subárea.

Para condiciones de humedad media, los valores de P_o habitualmente utilizados se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 23. Tipología de usos de suelos según el S.C.S.

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE (%)	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	GRUPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	>3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	<3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	>3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	<3	R/N	28	19	14	11
Rotación de cultivos pobres	>3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	<3	R/N	30	19	13	8
Rotación de cultivos densos	>3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	<3	R/N	47	25	16	13
Praderas	>3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
		Muy buena	*	41	22	15
	<3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10

		Buena	*	*	22	14
		Muy buena	*	*	25	16
Plantaciones regulares	>3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
		Buena	*	42	22	15
	<3	Pobre		34	19	14
		Media		42	22	15
		Buena		50	25	16
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc)		Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
		Muy espesa	*	65	43	33

1. *N*: denota cultivo según las curvas de nivel.
2. *R*: denota cultivo según la línea de máxima pendiente.
3. *: denota que esa parte de cuenca debe considerarse inexistente a efectos de cálculo de caudales
4. Las zonas abancaladas se incluyen entre las de pendiente menor del 3%.

Para el cálculo del CN en una cuenca de superficie total A , se divide ésta en diferentes subáreas A_i correspondientes a combinaciones de tipo y usos del suelo distintos y se obtiene un $P_{o,i}$ asociado a cada subárea. La media ponderada del CN de cada área será por lo tanto el valor final encontrado.

4.5 Cálculo de P_o y CN para la microcuenca el Rollo

El umbral de escorrentía depende de los siguientes factores:

- Tipo de suelo
- Grado de desarrollo y tipo de cubierta vegetal
- Pendiente del terreno
- Estado de humedad inicial del complejo suelo-vegetación

Obtenidos los mapas de coberturas y suelos se procede a calcular el valor del Número de Curva de la microcuenca, asociando a cada cobertura su respectivo tipo de suelo. De esta manera, por tablas se obtiene el valor del umbral de escorrentía P_o para cada masa forestal y se calcula por lo tanto la curva número respectiva. En la siguiente tabla se ha calculado el CN (II) para toda la microcuenca:

Tabla 24. Valores de la curva Numero para las diferentes áreas.

Uso de Suelo (SCS)	Área (Ha)	Área (%)	Área por cobertura (%)	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo	Umbral de escorrentía (mm)	Umbral de escorrentía ponderado (mm)	CN
Cultivos	3,06	0,82	17,82	>3	R	A	23	13,46	79,06
Cultivos	63,7	17,00		>3	R	B	13		
Praderas	143,39	38,27	38,91	>3	Pobre	B	14	14,74	77,51
Praderas	2,4	0,64		>3	Pobre	D	6		
Masas forestales	5,52	1,47	41,93	>3	Clara	D	10	21,58	70,19
Masas forestales	151,58	40,45		>3	Media	C	22		
Área urbana	5,06	1,35	1,35			D	2	2	96,21
Promedio									74,97

El cálculo del CN (II) general de toda la microcuenca se realizó a partir de la media ponderada de todos los valores encontrados en la tabla anterior:

$$CN(II) = 74.97$$

Así mismo se calculó los demás valores del CN considerando las condiciones de humedad inicial, resultando los siguientes valores:

$$CN(I) = 56.23$$

$$CN(III) = 87.55$$

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra las diferentes combinaciones de cobertura y grupo hidrológico de suelo que fueron encontradas en la microcuenca El Rollo. A cada combinación corresponde un número de curva que representa su potencial de escorrentía. Los valores más bajos de CN, se encuentran en los suelos del grupo C y D cubiertos por bosques, mientras que los valores más altos se dan en los suelos del grupo A y B con cobertura de cultivos; el número de curva correspondiente al área urbana es el más alto debido a que esta área se limita a cubierta totalmente impermeable.

Los resultados obtenidos señalan que a medida que aumenta la densidad de la vegetación, menor es la escorrentía. El efecto de la vegetación sobre la respuesta hidrológica se relaciona con retardar el flujo de agua sobre el terreno mediante las abstracciones que hace la estructura aérea de las plantas, así mismo se ve la influencia de la materia orgánica, la cual permite mayor retención de humedad. Sin embargo, se evidencia que aún bajo las mismas condiciones de vegetación, las características propias del suelo tienen un efecto importante sobre la producción de escorrentía.

Las variaciones del número de curva corresponden a la distribución de las coberturas y grupos hidrológicos de suelo; en la mayor parte de la microcuenca El Rollo predomina el CN 70,19 con un área de 41,93% correspondiente a áreas boscosas y CN 77,51 que ocupan un 38,91% con áreas de praderas.

El número de curva promedio ponderado para la microcuenca El Rollo tuvo un valor de 74,97, por lo cual se evidencia que las condiciones de la microcuenca en general, tienden a favorecer la escorrentía por encima de la infiltración.

El modelo depende de un único parámetro P_o , por lo que los resultados son altamente sensibles a la estimación de dicho parámetro. Este asume la existencia de un umbral por debajo del cual las precipitaciones no provocan escorrentía. Una vez rebasado este umbral, que actúa como intercepción inicial, comienza el encharcamiento y la escorrentía en superficie. En el modelo S.C.S. la capacidad de abstracción de un suelo y por lo tanto de generación de escorrentía depende de los mismos factores que afectan la infiltración de los suelos.

Por otro lado, el modelo utilizado para simular la transformación de la lluvia en escorrentía es el modelo del S.C.S: (S.C.S. Unit Hydrograph). Simplemente requiere conocer el área de cada area, el número de curva del SCS, el porcentaje impermeable del total de la superficie y el tiempo T_{lag} (Tiempo de desfase al Pico). Por lo tanto, para cada una de las áreas se ha calculado el CN, para distintas condiciones de humedad.

• **ÁREA 1**

Tabla 25. Resultados cálculo del CN para el Área 1.

Uso de Suelo (SCS)	Área (Ha)	Área (%)	Área por cobertura (%)	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo	Umbral de escorrentía (mm)	Umbral de escorrentía ponderado (mm)	CN
Cultivos	2,84	3,79	16,45	>3	R	A	23	15,3	76,85
Cultivos	9,48	12,66		>3	R	B	13		
Praderas	25,88	34,55	34,55	>3	Pobre	B	14	14	78,40
Masas forestales	36,59	48,85	48,85	>3	Media	C	22	22	69,78
Área urbana	0,12	0,16	0,16	>3		D	2	2	96,21
Promedio									73,96

$$CN(II) = 73,96$$

El valor del número de curva promedio para la microcuenca 1, fue de 73,96. Este valor permite ver que en esta área existe una alta capacidad de generar escorrentía superficial, lo cual representa condiciones de permeabilidad baja. Los valores de umbral de escorrentía obtenidos por cada uso de suelo presente en el área, muestran el mayor valor para la cobertura con masas forestales y el menor para el área urbana, estos valores a su vez determinan el valor de CN, el cual resulta inversamente proporcional al umbral de escorrentía. Se observa que en el 48,85% del área se encuentra suelos tipo C, con características físicas que limitan la infiltración del agua ocasionando un potencial de escorrentía moderadamente alto cuando se encuentran húmedos, sin embargo, al encontrarse bajo área boscosa, la cual presenta un umbral de escorrentía alto, se obtiene un número de curva de menor valor en relación con los otros usos de suelo presentes en el área.

Las coberturas de cultivos y praderas que representan el 50% del área, en donde los valores de CN son más altos en comparación con la cobertura de masas forestales; predomina el tipo de suelo B, cuyas características físicas ocasionan un potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando están completamente húmedos, por lo cual se debería obtener un menor valor de CN, sin embargo, se evidencia la influencia del uso de suelo con cultivos y praderas en los cuales se tiene un umbral de escorrentía inferior, lo cual se atribuye a las características hidrológicas de dichos usos de suelo. Para el 0.16% del área, correspondiente al área urbana se tiene el menor valor de umbral de escorrentía y por ende el mayor valor de número de curva, lógicamente por ser una capa impermeable.

- **ÁREA 2**

Tabla 26. Resultados cálculo del CN para el Área 2.

Uso de Suelo (SCS)	Área (Ha)	Área (%)	Área por cobertura (%)	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo	Umbral de escorrentía (mm)	Umbral de escorrentía ponderado (mm)	CN
Cultivos	41,98	15,67	15,67	>3	R	B	13	13	79,62
Praderas	112,8	42,10	43,00	>3	Pobre	B	14	13,83	78,60
Praderas	2,4	0,90		>3	Pobre	D	6		
Masas forestales	5,52	2,06	41,33	>3	Clara	D	10	21,40	70,36
Masas forestales	105,21	39,27		>3	Media	C	22		
Promedio									75,35

$$CN(II) = 75,35$$

En el área 2, se obtuvo un valor de CN 75,35 similar al del área 1. El 41.33 % del área corresponde a masas forestales dentro de las cuales se distingue claras y medias, según sus características hidrológicas, con grupos de suelo D y C respectivamente, el primero genera un alto potencial de escorrentía y el segundo genera un potencial de escorrentía moderadamente alto cuando el suelo está completamente húmedo; la combinación de las coberturas boscosas con dichos grupos de suelos permiten calcular un umbral de escorrentía alto con relación a los demás usos de suelo presentes en el área y

consecuentemente resulta el menor valor de CN. En el 43% de esta área, correspondiente a praderas con características hidrológicas pobres al tener densidades muy ralas; se distinguen dos tipos de suelo, B y D, con lo cual se tiene un bajo umbral de escorrentía ponderado y por ende un alto número de curva. Las praderas y las masas forestales son las coberturas que abarcan mayor extensión dentro de esta área y por tanto son los valores de CN que tienen mayor peso en determinar el promedio general de CN dentro del área 2.

En el 15.67% del área, representada por cultivos, bajo los cuales se encuentran suelos tipo B, se obtuvo el mayor valor de CN, sin embargo, no afecta significativamente el valor ponderado debido a que su área no tiene un peso considerable.

En esta área que representa la mayor extensión de la microcuenca, se evidencia la influencia de la cubierta vegetal en la producción de escorrentía superficial; la cubierta forestal abarca el mayor porcentaje de área, se encuentra bajo suelos con capacidad de generar un alto potencial de escorrentía, sin embargo, el valor de CN es inferior respecto a los demás usos de suelo que se encuentran en un tipo de suelo con menor capacidad para generar escorrentía, observándose así una diferencia considerable.

- **ÁREA 3**

Tabla 27. Resultados cálculo del CN para el Área 2.

Uso de Suelo (SCS)	Área (Ha)	Área (%)	Área por cobertura (%)	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo	Umbral de escorrentía (mm)	Umbral de escorrentía ponderado (mm)	CN
Cultivos	0,22	0,69	39,07	>3	R	A	23	13,18	79,40
Cultivos	12,24	38,38		>3	R	B	13		
Praderas	4,69	14,71	14,71	>3	Pobre	B	14	14	78,40
Masas forestales	9,8	30,73	30,73	>3	Media	C	22	22	69,78
Área urbana	4,94	15,49	15,49	>3		D	2	2	96,21
Promedio									78,90

$$CN(II) = 78,90$$

El área 3 situada en la parte baja de la microcuenca, muestra un alto potencial de escorrentía representado por el mayor valor de número de curva en comparación con el

área 1 y 2; resultado obtenido por los altos valores de CN de cada uso de suelo presente en el área, los cuales corresponden a área urbana (15,49 %) cuyo umbral de escorrentía es mínimo debido a que no hay infiltración; cultivos (39,07 %) y praderas (14,71%) que también presentan un bajo umbral de escorrentía, lo cual se atribuye a las condiciones hidrológicas de dichas coberturas, pues los tipos de suelo que en estas predominan, tipo A que permiten la infiltración del agua libremente, generando bajo potencial de escorrentía y B con propiedades para generar escorrentía moderadamente baja al estar completamente húmedos. Las masas forestales (30,73 %) presentan un mayor umbral de escorrentía y por ende una menor capacidad de escorrentía en relación a los demás usos de suelo, aquí se puede notar la influencia de la cobertura vegetal boscosa, puesto que a pesar de encontrarse en tipo de suelo C con propiedades físicas que limitan la infiltración de agua, el potencial de escorrentía es menor reflejando así un valor de CN menor que los demás usos de suelo.

Cabe mencionar que el número de curva calculado para las anteriores áreas tuvo en cuenta humedad del suelo media, no obstante, dependiendo de las condiciones de humedad de la zona de estudio, la metodología propuesta por S.C.S plantea realizar ajustes para determinar el CN. Así mismo, en la siguiente tabla se recogen los valores del Número de Curva para las áreas en las distintas condiciones de humedad antecedente:

Tabla 28. Valores CN para las Áreas de la Microcuenca.

Área	CN(I)	CN(II)	CN(III)
1	54.40	73.96	86.72
2	56.11	75.27	87.50
3	61.10	78.90	89.58

Otro parámetro importante para la modelación, es el tiempo de desfase al pico, el cual se puede estimar con la siguiente expresión:

$$T_{lag} = 0.6T_c$$

Siendo T_c el tiempo de concentración. De este modo los tiempos de concentración y de Lag en cada una de las Áreas son:

Tabla 29. Valores de los tiempos de concentración (T_c) y desfase al pico (T_{Lag}).

CUENCA	Tc(min)	TLag(min)
1	10.21	6.13
2	23.18	14
3	18.66	11.2

5 MODELACIÓN PSEUDODISTRIBUIDA DE CRECIDAS CON HEC-HMS

A partir de los datos elaborados, se realiza a continuación un análisis exhaustivo de las crecidas a partir del software informático HEC- HMS. Se trata de un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico), a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa.

Es un programa complejo, el cual permite el cálculo del hidrograma producido por una cuenca mediante inputs como: datos físicos de la cuenca, datos de precipitaciones...etc; además, permite establecer varias subcuencas, realizando los cálculos de escorrentía directa particularizados donde finalmente es capaz de componer los hidrogramas generando un hidrograma de salida de la cuenca.

Debido a que la microcuenca la conforman tres áreas, se ejecuta el programa HEC- HMS para cada una de ellas, de este modo, se analizara los caudales proporcionados por todas las áreas aportantes, como los causantes de la avenida torrencial descargada sobre el casco urbano.

Por otro lado, en cuanto a la escogencia del periodo de retorno adecuado para las simulaciones del programa, se debe considerar que la microcuenca tiene una superficie pequeña y por lo tanto un tiempo de concentración corto, de este modo es recomendable diseñar para tiempos de concentración medios y cortos (*Ponce, 2008*). Atendiendo esta recomendación, se decidió trabajar con los valores concernientes a 50 años de periodo de retorno.

5.1 Componentes del sistema

U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System es un software diseñado para simular procesos de precipitación-escorrentía en

sistemas hidrológicos. El programa prosee un completo entorno de trabajo integrado: base de datos, utilidades de entrada de datos, simulación y herramientas interactivas de consulta de resultados.

El programa consta de tres partes principales:

- Modelo de cuencas
- Modelo Meteorológico
- Especificaciones de control

En el modelo de cuencas, se debe especificar las características físicas de la cuenca; en la segunda, modelo meteorológico, se introducen los datos pluviométricos y en la tercera, especificaciones de control, los tiempos computacionales. A continuación, se expone brevemente en qué consiste este software y los modelos que simula. (Orio, 2011)

- a) **Modelo de cuenca (Basin Model):** Esta es la parte más importante del programa, donde se definen las características hidrológicas y geomorfológicas de las cuencas y los métodos de cálculo. En él se conceptualiza el sistema hidrológico (cuencas, subcuencas, cursos fluviales, etc.).

Los elementos disponibles son: Subcuencas (subbasin), Tramos de propagación (reach), Embalses (reservoir), Confluencias de flujo (junction), Divergencias de flujo (diversion), Fuentes (source) y Sumideros (sink).

Los componentes básicos de la modelación son: Submodelo de precipitación (precipitation model), Submodelo de generación o infiltración (loss rate method), Submodelo de transformación de lluvia neta en escorrentía (runoff transformation method), Submodelo de propagación en cauces (routing reach method).

- b) **Modelo Meteorológico (Precipitation Model):** Implementa el análisis de datos meteorológicos, incluyendo precipitación y evapotranspiración.

Los componentes básicos son: Submodelo de precipitación (precipitation model) y Submodelo de evapotranspiración (evapotranspiration method).

Entre los modelos de precipitación se encuentran los siguientes: User Hyetograph, User Gage Weighting, Inverse-Distance Gage Weighting, Gridded Precipitation, Frequency Storm, Standard Project Storm- Eastern U.S, S.C.S. Hypothetical Storm.

- c) **Parámetros de control de simulación (Control Specifications):** En esta utilidad se especifican los parámetros temporales de la simulación. Fecha y hora de inicio de la simulación, Fecha y hora de fin de la simulación, Lapso de tiempo computacional.

5.1.1 Modelo de cuenca

La geometría del modelo de cuenca se elabora a partir de la disposición relativa entre las subcuencas. A cada area se le asocia un elemento tipo subbasin y se conectan entre sí respetando su posición en la cuenca.

El programa calcula el hidrograma de cada una de las Áreas en su punto de desagüe, sin considerar la propagación por el recorrido de su cauce principal. El desagüe de la cuenca se representa por un elemento tipo confluencia.

Con estas consideraciones el modelo que representa a la cuenca en estudio es el siguiente:

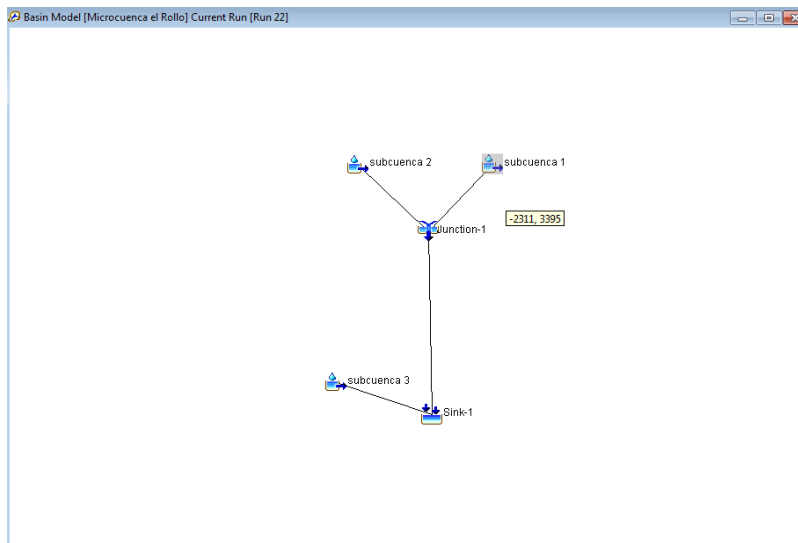


Figura 36. Esquema de las Áreas en Hec- HMS.

5.1.1.1 Método de Modelación (Modelos de infiltración S.C.S. Curve Number)

El modelo que se utiliza para simular la infiltración en la cuenca es el modelo del número de curva del S.C.S. (S.C.S. Curve Number). La formulación original del S.C.S. fue desarrollada a partir del número de curva (CN) pero en algunos países suele utilizarse dicho método en función de un parámetro diferente, P_o (Umbral de escorrentía). En general, Números de curva $CN = 0$ indican permeabilidad total mientras que $CN = 100$ corresponden al caso totalmente impermeable.

En cuanto a la propagación en cauces, en Hec-HMS se pretende determinar el hidrograma de caudal en un punto de un curso de agua, para lo cual se tiene en cuenta los hidrogramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba.

El modelo de mayor aceptación para la propagación de hidrogramas en cauces naturales es el de Muskingum. El método de Muskingum fue presentado por McCarthy (1938) y maneja relaciones caudal-almacenamiento variable.

Este método modela el almacenamiento en un cauce mediante la combinación de dos tipos de almacenamientos:

- Un almacenamiento prismático, formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo del cauce prismático.
- Un almacenamiento en cuña, formado por la diferencia entre los caudales de entrada y salida, o bien, por la pendiente de la lámina de agua en el tramo considerado. (Orio, 2011)

5.2 Hietogramas de tormenta

Obtenido el valor del tiempo de concentración, se puede considerar ya la duración de la tormenta para el cálculo de los caudales de la microcuenca. El tiempo de concentración nos marca la duración crítica en la cual toda la microcuenca está aportando escorrentía al desagüe, dando idea sobre el tiempo que puede tardar una crecida en llegar a ese punto y provocar una emergencia. El tiempo de duración para la lluvia se tomó como 30 minutos como anteriormente, de este modo todos los hietogramas tendrán esta duración.

Obtenidas las curvas IDF, se puede elaborar los hietogramas de precipitación de diseño. A continuación, se muestra la comparativa de las curvas, donde se comprueba que los valores de la curva IDF para la distribución de Brasil son un poco más altos que los de Perú (figura 37).

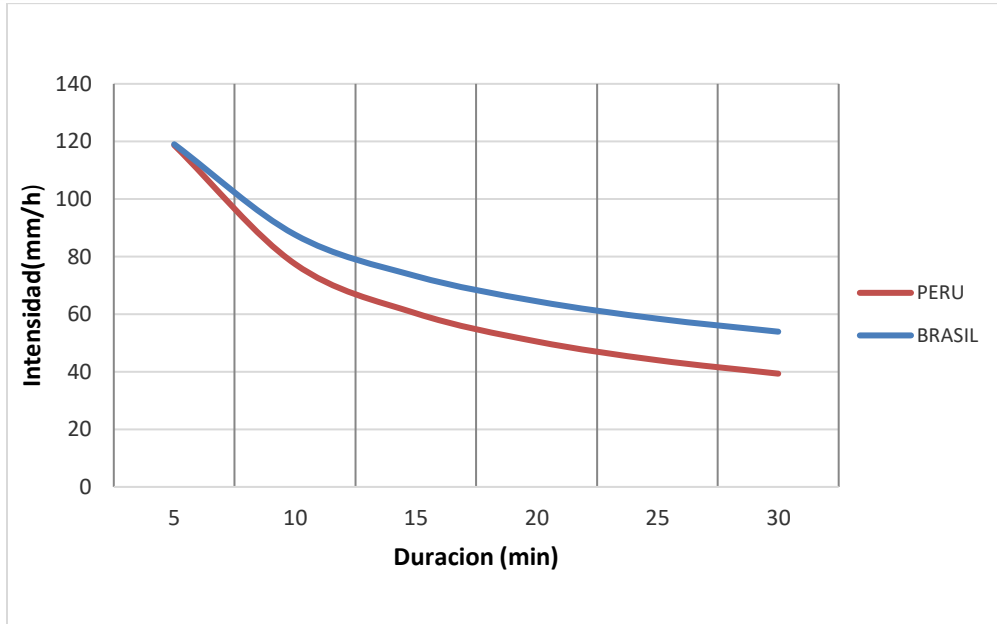


Figura 37. Comparativa de Curvas IDF para T=50 años.

El programa requiere como input el hietograma de precipitación, para lo cual los valores de la distribución de Perú son los que se muestra en la siguiente figura:

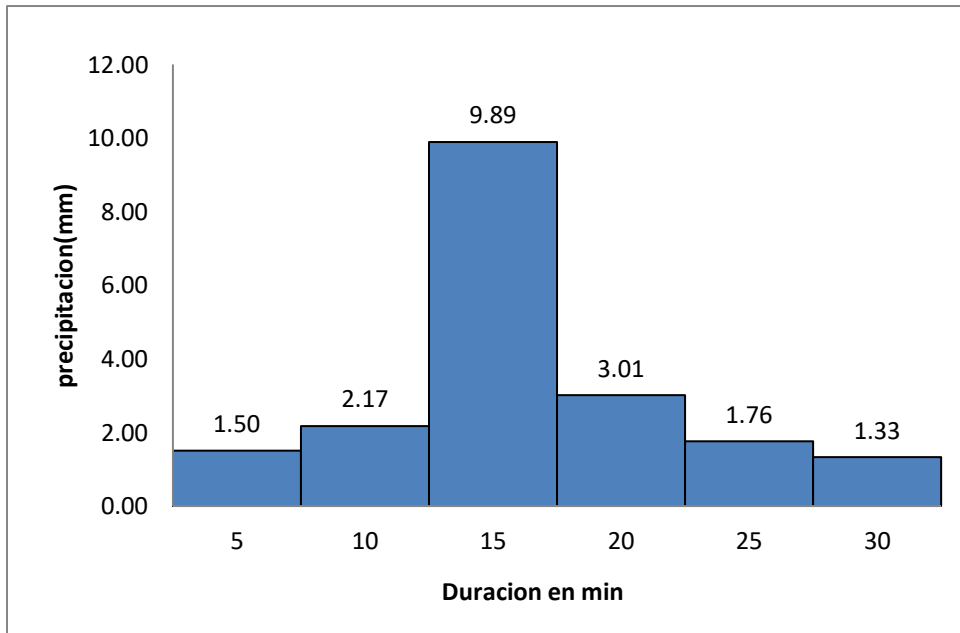


Figura 38. Hietograma de precipitación usando coeficientes de Perú.

Así mismo para la distribución de Brasil, se encontró el siguiente hietograma con tiempo de duración 30 min y discretización 5 minutal:

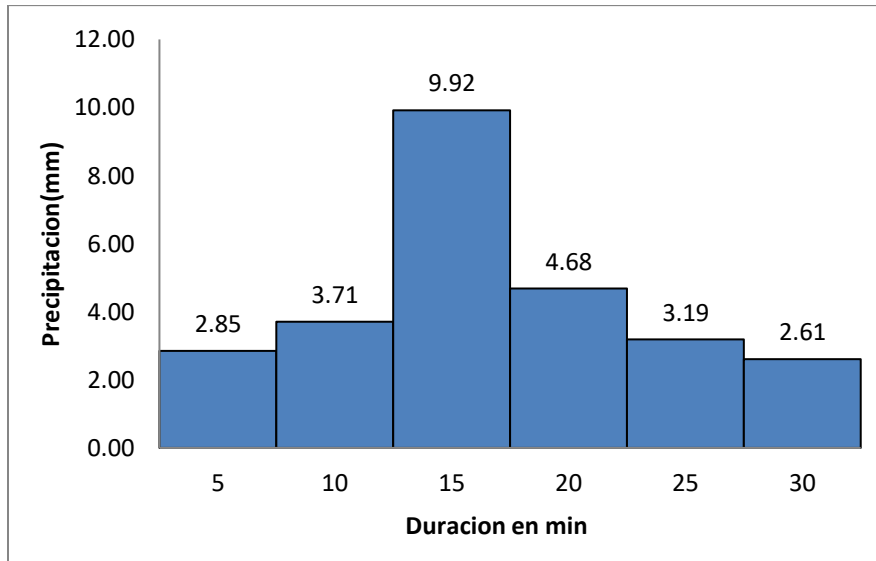


Figura 39. Hietograma de precipitación usando coeficientes de Brasil.

5.3 Resultados obtenidos en Hec-HMS

Ingresados los valores al programa, éste calculo los caudales generados por las areas 1 y 2 que se desean saber como insumo para el calculo hidraulico de la avenida torrencial. En la siguiente figura se presenta el hidrograma de las Áreas usando el hietograma para la distribucion Brasil y sus respectivos valores:

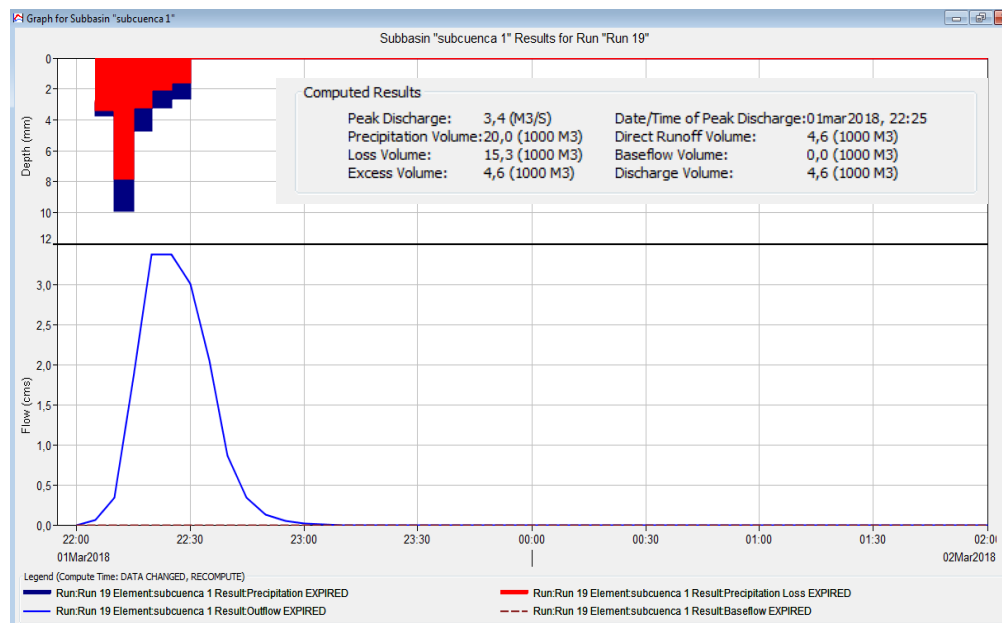


Figura 40. Hidrograma del área 1.

El caudal pico de descarga del área 1 para un periodo de retorno 50 años es 3.4 m³/s a los 25 min del inicio de la tormenta, generando así un volumen total de 4.600 m³.

En cuanto a el área 2 el valor del caudal es mucho más alto debido a que el área es mayor que el área 1. El caudal pico esta sobre los 10.1 m³/s a los 35 min de empezada la tormenta, generando un volumen de 17.600 m³ como se muestra a continuación:

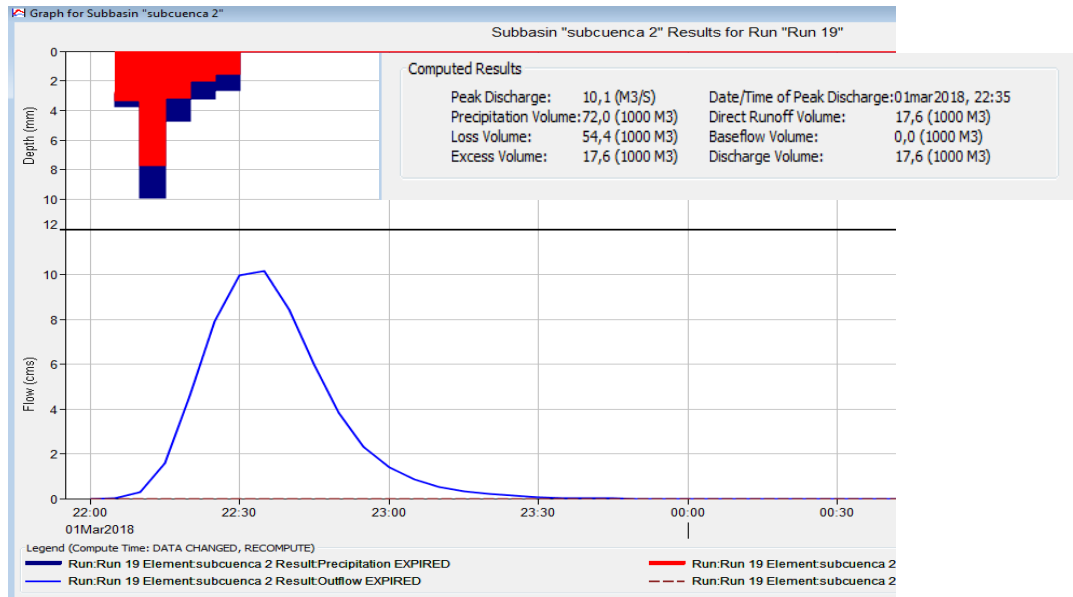


Figura 41. Hidrograma del área 2.

Observando los dos hidrogramas desde la confluencia, se puede detallar mejor el comportamiento de los caudales de salida.

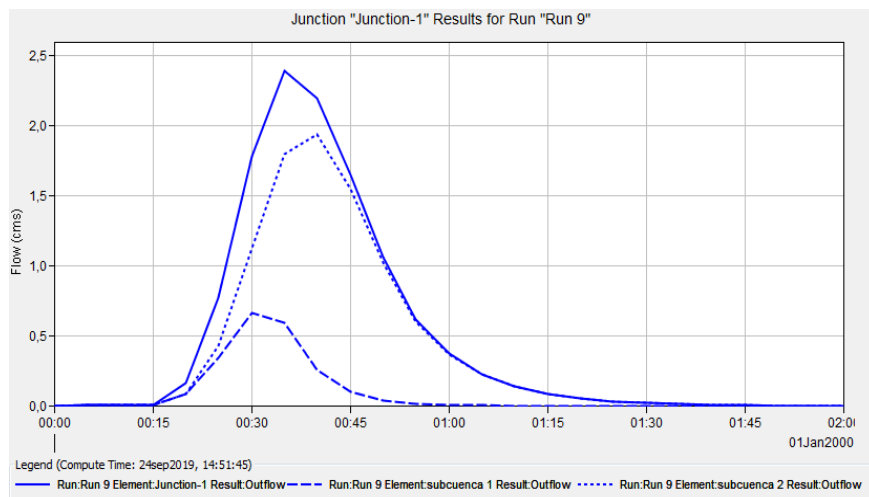


Figura 42. Suma de Hidrogramas en el punto de confluencia del área 1 y 2.

A la salida de las dos Áreas, se ve claramente que el caudal aumenta hasta los 2.4 m³/s entre los 30 y 45 minutos de empezada la tormenta, extendiéndose hasta la hora y media donde termina de escurrir en el punto de desagüe. El volumen generado por las dos áreas será la sumatorias de cada una de ellas, en total 22.200 m³.

Por último, el área 3 de la microcuenca que recoge toda la escorrentía de la zona urbana posee caudales elevados, con un caudal al pico de $13.7 \text{ m}^3/\text{s}$ y un volumen total de 21.400 m^3 (figura 43).

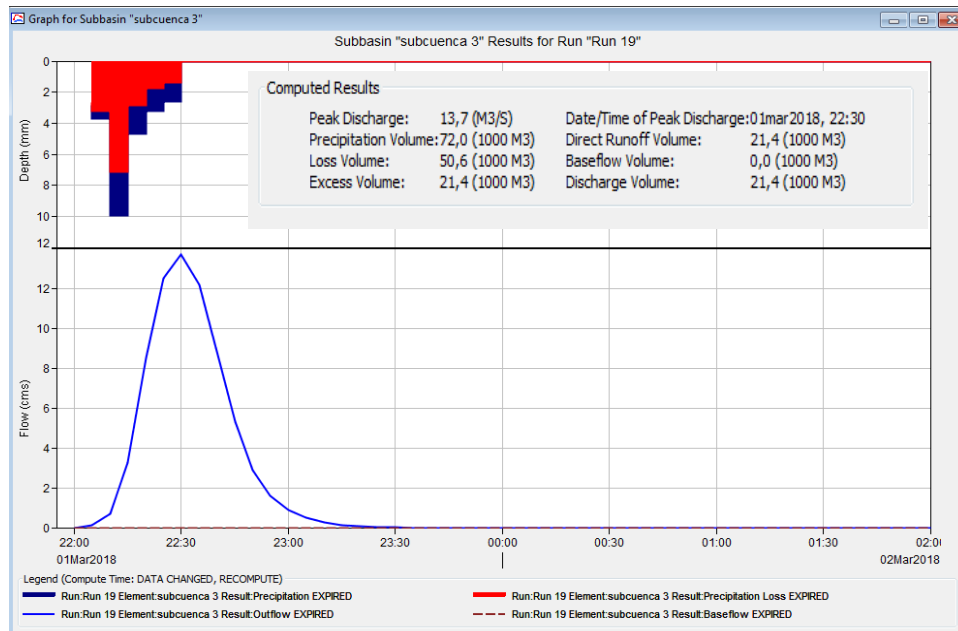


Figura 43. Hidrograma del área 3.

Por último, el hidrograma al final del punto de desagüe que recoge todo el caudal de la microcuenca será la suma del caudal de cada área, resultando un caudal pico a la media hora de empezado el evento de $26.6 \text{ m}^3/\text{s}$ como se muestra a continuación:

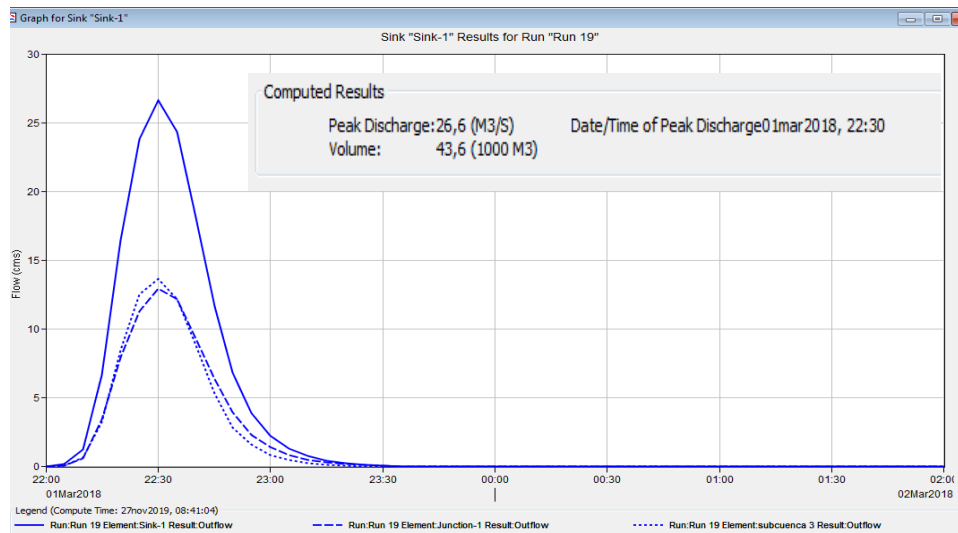


Figura 44. Hidrograma del punto de desagüe de la Microcuenca

5.4 Comparativa de resultados con otros CN

Aplicando la metodología proporcionada por el S.C.S para los diferentes Numero de Curva, se ha creado una tabla recogiendo los caudales e información importante para estos escenarios en el punto de desagüe de la microcuenca.

Tabla 30. Comparativa de resultados de distintos CN para T50.

TIPO CN	VOLUMEN(m3)	TIEMPO AL PICO	CAUDAL PICO(m3/s)
CN(I)	22.300	00:30	13.6
CN(II)	43.600	00:30	26.6
CN(III)	73.800	00:30	45

Es evidente que, para condiciones secas, la microcuenca produce poco caudal de escorrentía, sobrepasando apenas los 13 m³/s. No obstante, si se va al otro extremo, se nota claramente que en condiciones de humedad tipo III, el caudal se dispara y pasa de 26.6 (Humedad media) a 45 m³/s. Es evidente que, para las condiciones morfológicas y climatológicas de la microcuenca, el tipo de humedad que más se ajusta es el tipo II, por lo cual para los posteriores cálculos se tomara el caudal encontrado a partir de la Curva Numero II.

6 MOVIMIENTOS EN MASA Y TIPOS DE FLUJO ASOCIADOS A AVENIDAS TORRENCIALES – MODELO FLO 2D

El aporte de material sólido ya sean rocas, sedimentos o suelos residuales, es de gran importancia puesto que es uno de los factores que determina el tipo de flujo que se puede generar en una avenida torrencial y, por tanto, las características de esta, como su velocidad, magnitud y peligrosidad. Las características de los sedimentos involucrados en eventos torrenciales son de gran importancia para el modelamiento en Flo2D, puesto que define la clasificación de los flujos y su comportamiento.

6.1 Clasificación de flujos según Hunger et al. 2001.

En una avenida torrencial se puede generar diferentes tipos de flujo y su comportamiento, velocidad y magnitud, depende en gran parte de las características reológicas del suelo o roca que se mezcla con el agua. Como se lo menciono anteriormente el aporte de sólidos se da en su mayoría por la ocurrencia de movimientos en masa, por ello para

entender de una u otra manera este fenómeno natural, es importante conocer los principales y posibles flujos torrenciales en relación con movimientos en masa, para lo cual se toma la clasificación y descripción que hace Hunger, et. al. 2001 donde involucra las características de los deslizamientos que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante a un fluido, puede ser lento o rápido, saturado o seco; de este modo Hunger et al. (2001), clasifican los flujos de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral, entre otras (Tablas 31 y 32). Cabe aclarar que de la amplia clasificación que hacen estos autores, se toma los más relevantes para el objeto del presente estudio.

Tabla 31. Clasificación de deslizamientos de tierra según Hunger et al 2001.

Classification of Landslides

Table 3. *Material involved in landslides of the flow type.*

Origin	Character	Condition ¹	Name
SORTED (marine, lacustrine, fluvial, eolian, volcanic, anthropogenic)	Non-cohesive (Plastic Limit < 5%)	Dry or Saturated	- Gravel - Sand - Silt
	Cohesive (Plastic Limit > 5%)	- Plastic ($I_L < 0.5$) - Liquid ($I_L > 0.5$)	- Clay - Sensitive Clay
UNSORTED (residual, colluvial, glacial, volcanic, anthropogenic)	Non-cohesive (Plastic Limit < 5%)	Dry or Saturated	- Debris ²
	Cohesive (Plastic Limit < 5%)	- Plastic ($I_L < 0.5$) - Liquid ($I_L > 0.5$)	- Earth - Mud
PEAT	Organic	Saturated	- Peat
ROCK	Fragmented	Dry or Saturated	- Rock

¹ Related to the material found in the vicinity of the rupture surface at the time of failure, if it can be determined. In many cases, the material condition must be deduced from the behavior of the landslide, especially velocity.

² Debris may contain a considerable proportion of organic material.

Tabla 32. Clasificación de deslizamiento de acuerdo al tipo de flujo.

Table 4. Classification of landslides of the flow type.

Material	Water Content ¹	Special Condition	Velocity	Name
Silt, Sand, Gravel, Debris (talus)	dry, moist or saturated	- no excess pore-pressure, - limited volume	various	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Silt, Sand, Debris, Weak rock ²	saturated at rupture surface content	- liquefiable material ³ , - constant water	Ex. Rapid	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Sensitive clay	at or above liquid limit	- liquefaction <i>in situ</i> , ³ - constant water content ⁴	Ex. Rapid	Clay flow slide
Peat	saturated	- excess pore-pressure	Slow to very rapid	Peat flow
Clay or Earth	near plastic limit	- slow movements, - plug flow (sliding)	< Rapid	Earth flow
Debris	saturated	- established channel ⁵ , - increased water content ⁴	Ex. Rapid	Debris flow
Mud	at or above liquid limit	-fine-grained debris flow	> Very rapid	Mud flow
Debris	free water present	- flood ⁶	Ex. Rapid	Debris flood
Debris	partly or fully saturated	- no established channel ⁵ , - relatively shallow, steep source	Ex. Rapid	Debris avalanche
Fragmented Rock	various, mainly dry	- intact rock at source, - large volume ⁷	Ex. Rapid	Rock avalanche

¹ Water content of material in the vicinity of the rupture surface at the time of failure.

² Highly porous, weak rock (examples: weak chalk, weathered tuff, pumice).

³ The presence of full or partial *in situ* liquefaction of the source material of the flow slide may be observed or implied.

⁴ Relative to *in situ* source material.

⁵ Presence or absence of a defined channel over a large part of the path, and an established deposition landform (fan). Debris flow is a recurrent phenomenon within its path, while debris avalanche is not.

⁶ Peak discharge of the same order as that of a major flood or an accidental flood. Significant tractive forces of free flowing water. Presence of floating debris.

⁷ Volume greater than 10,000 m³ approximately. Mass flow, contrasting with fragmental rock fall.

6.1.1 Flujo de detritos (debris flow)

Es un flujo de rápido a extremadamente rápido de escombros no saturados en un canal escarpado, tiene una plasticidad menor a 5% en arenas y fracciones más finas. Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos. Sus depósitos tienen rasgos característicos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de u, trenes de bloques rocosos y grandes bloques individuales. Los flujos de detritos desarrollan pulsos usualmente con acumulación de bloques en el frente de onda. Como resultado del desarrollo de pulsos, los caudales pico de los flujos de detritos pueden exceder en varios niveles de magnitud a los caudales pico de inundaciones grandes. Esta característica hace que los flujos de detritos tengan un alto potencial destructivo.

6.1.2 Flujo de lodo (mud flow)

Flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad mayor al 5%). El carácter de este tipo de movimiento es similar al del flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material. También se distingue de los deslizamientos por flujo de arcilla, en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el movimiento, mientras que el deslizamiento por flujo ocurre por licuación in situ, sin un incremento significativo del contenido de agua (Hungry et al., 2001). En algunos países de Sudamérica se denomina flujo o torrente de barro.

También se conoce los flujos torrenciales como sedimentos hiperconcentrados que se definen como eventos de inundación con concentraciones de sedimentos que exceden el 20% en volumen; mientras que los flujos con concentraciones de sedimento inferiores al 20% en volumen son esencialmente inundaciones de agua. Los sedimentos hiperconcentrados son completamente turbulentos, inestables y no uniformes, y se caracterizan por oleadas, cese de flujo, bloqueo y ondas de balanceo y caen dentro de un rango de concentración de 20 % a 55 % en volumen y la mayoría están asociados con la escorrentía de lluvia. Un pequeño porcentaje de estos flujos se inicia por la escorrentía del deshielo y un número aún menor está asociado con rupturas de presas, deslizamientos de tierra y volcanes.

6.2 Clasificación de Flujos – Flo2D

El modelo Flo 2D define cuatro categorías diferentes de flujos torrenciales o de sedimentos hiperconcentrados inundación de agua, inundación de lodo, flujo de lodo y flujo granular o deslizamiento, la distinción entre estos flujos depende de la concentración de sedimento medida en peso o volumen (tabla 33)

Tabla 33. Tipos de Flujo y concentración en peso y volumen.

Tipo de Flujo	Concentración de Sedimento		Características del Flujo
	En Volumen	En peso	
Deslizamiento	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques

(landslide)	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de falla.
Flujo de barro (Mudflow)	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido del flujo de barro; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie.
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla
Inundación de barro (mud Floods)	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas, pero se disipan rápidamente
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi completamente sobre la superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases de fluido; las olas viajan en la superficie
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo.
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Se distinguen claramente las olas y ondas; todas las partículas descansando en el fondo en condición fluida móvil
Inundación de agua (wáter floods)	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo.

6.2.1 Inundación de agua

Inundación de agua con carga suspendida y arrastre de sedimento, donde la carga de lecho puede verse afectada por la alta concentración de carga suspendida (es decir, carga de lavado de sedimento fino).

6.2.2 Inundaciones de lodo

Este tipo de flujo pueden ser difíciles de distinguir de las inundaciones de agua y se ven muy similares en el comportamiento del flujo, pero las propiedades fluidas de las inundaciones de lodo son definitivamente diferentes de las inundaciones de agua con

mucha mayor viscosidad y densidad. El rango general de concentración en volumen de sedimentos en las inundaciones de lodo es del 20% al 40-45%.

6.2.3 Flujos de lodo

Son eventos de inundación transitorios no homogéneos, no newtonianos cuyas propiedades de fluido cambian significativamente a medida que fluyen por canales empinados de cuencas hidrográficas o a través de abanicos aluviales. Un flujo de lodo consistirá en una fina matriz de fluido de sedimento que puede soportar el transporte de rocas. Su comportamiento es una función de las propiedades de la matriz de fluidos, la geometría del canal, la pendiente y la rugosidad. La concentración de sedimento fino (limo, arcilla y arenas finas en la matriz del fluido) controla las propiedades del fluido, incluida la viscosidad, la densidad y el límite elástico. La propiedad dominante de un flujo de lodo es la alta viscosidad que dará como resultado velocidades lentas; mucho más lento que las inundaciones de agua en la misma pendiente.

La alta densidad de la matriz de fluido puede aumentar la flotabilidad de los sedimentos con grandes partículas desde la grava hasta los cantos rodados que generalmente se encuentran a lo largo del recorrido, a menudo transportadas cerca de la superficie del flujo. El límite elástico es una medida de la resistencia interna del fluido al flujo y afectará tanto el inicio como el cese del flujo.

6.2.4 Deslizamientos de tierra o Flujos granulares

Por su parte, los flujos granulares son fenómenos de flujo únicos que comprenden principalmente partículas de sedimento no cohesivas con un volumen de agua limitado. Los flujos granulares también se denominan flujos dispersivos porque el momento de las partículas se transfiere por colisión similar al contacto con la bola de billar. La matriz de fluido (agua y sedimento fino) se comprime entre las partículas y actúa como fluido lubricante. Los flujos granulares en la naturaleza son relativamente raros. Requiere movilizar sedimentos no cohesivos en laderas empinadas, donde generalmente las dos condiciones son mutuamente excluyentes. Es difícil generar un gran volumen de sedimento mal consolidado porque las fallas ocurren con frecuencia en pendientes pronunciadas. Los flujos granulares resultarán en depósitos muy empinados, distancias cortas de desviación y eventos de volumen relativamente pequeño.

Finalmente, los deslizamientos de tierra son movimientos de masa del suelo que se caracterizan por fallas de deslizamiento en bloque. A medida que los deslizamientos de tierra se transforman en flujos de lodo, la deformación interna se vuelve más prominente. Los deslizamientos de tierra requieren una superficie de falla inicial y un factor de seguridad que se ha reducido a uno.

Existen varias relaciones importantes de concentración de sedimentos que ayudan a definir la naturaleza de los flujos torrenciales o de sedimentos hiperconcentrados. Estas relaciones corresponden a la concentración de sedimentos en volumen, la concentración de sedimentos en peso, la densidad de sedimentos, la densidad de la mezcla de flujo de lodo y el factor de volumen. Al examinar los parámetros relacionados con los flujos de lodo, es importante identificar la concentración de sedimentos informada, ya sea en peso o en volumen. La concentración de sedimento en volumen C_v viene dada por:

$$C_v = \frac{\text{volumen de sedimento}}{\text{volumen de sedimento más agua}}$$

C_v está relacionado con la concentración de sedimento en peso C_w por:

$$C_v = \frac{C_w \gamma}{\{\gamma_s - C_w (\gamma_s - \gamma)\}}$$

Dónde: γ = peso específico del agua y

γ_s = peso específico del sedimento.

La concentración de sedimento también se puede expresar en partes por millón (ppm) dividiendo la concentración por peso C_w por 106. El peso específico de la mezcla de flujo de lodo γ_m es una función de la concentración de sedimento por volumen:

$$\gamma_m = \gamma + C_v (\gamma_s - \gamma)$$

De manera similar, la densidad de la mezcla de flujo de lodo ρ_m viene dada por:

$$\rho_m = \rho + C_v (\rho_s - \rho) \quad \text{y} \quad \rho_m = \frac{\gamma_m}{g}$$

donde g es la aceleración gravitacional. Finalmente, el volumen de la mezcla total de agua y sedimento en un flujo de lodo se puede determinar multiplicando el volumen de agua por el factor de volumen. El factor de volumen es simplemente:

$$BF = 1./(1. - C_v)$$

Es evidente que el factor de volumen es 2 para una concentración de sedimento en volumen del 50%. Incluso pequeños volúmenes de sedimento en una inundación aumentan el volumen total de la inundación. Una concentración de 7% en volumen para

una carga de lecho de río convencional y suspendida da como resultado un factor de aumento de volumen de 1.075 que indica que el volumen de la inundación es 7.5% mayor que si la inundación se considerara solo agua.

Estas relaciones básicas serán valiosas al analizar simulaciones de flujo de lodo. La mayoría de los estudios de flujo de lodo requieren estimaciones de la concentración de sedimentos por volumen y el factor de volumen para describir la magnitud del evento. Las concentraciones promedio y pico de sedimentos para el hidrograma de inundación son variables importantes para el diseño de mitigación (figura 45).

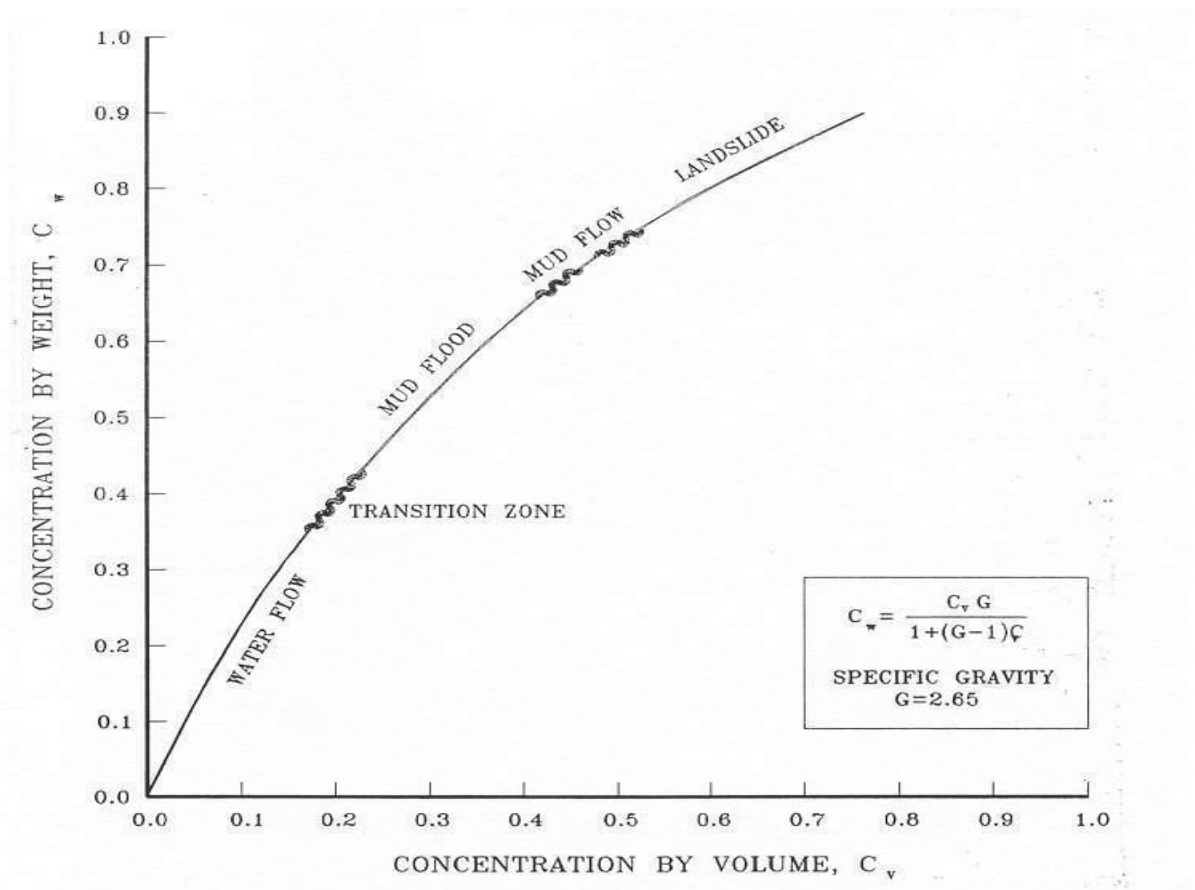


Figura 45. Concentración por Volumen, C_v

6.3 Deslizamientos en la quebrada El Rollo:

A continuación, con base en el “*Libro de Movimientos en Masa en la Región Anadina*” (INGEOMINAS, 2007), se realiza una descripción de los tipos de movimientos en masa que se presentan en la microcuenca El Rollo y los tipos de flujo que se dan, de acuerdo a la clasificación descrita anteriormente.

En primera instancia es importante conocer que los movimientos en masa ocurren como deformaciones del terreno, movimientos de tipo viscoso y otros desplazamientos de masas en cualquier parte de la tierra (SGC, 2017), e incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Crozier, 1999a, en Glade y Crozier, 2005).

6.3.1 Deslizamientos rotacionales

Un deslizamiento rotacional es aquel donde la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva o cóncava. Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la corona del deslizamiento hacia el escarpe principal. Este tipo de deslizamiento pueden ocurrir lenta a rápidamente, con velocidades menores a 1 m/s (figura 46).

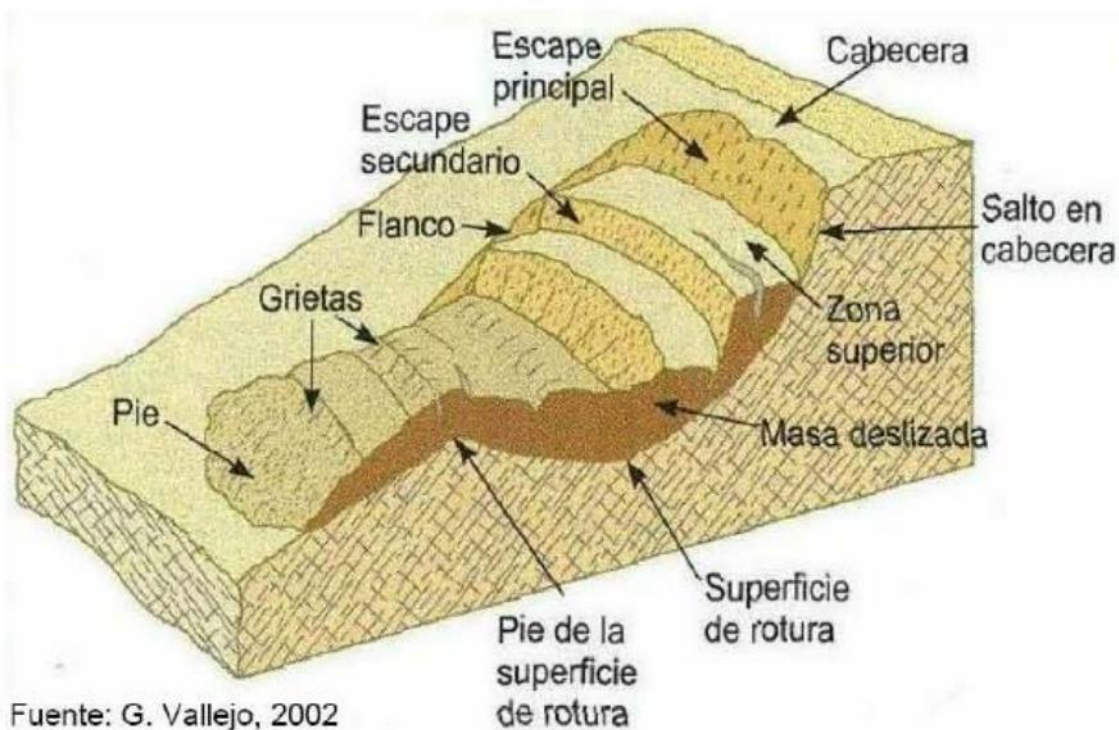


Figura 46. Esquema general de un deslizamiento rotacional.

En los flancos de la quebrada El Rollo se presentan diversos deslizamientos, unos con mayor área y magnitud que otros, en general se observa que los movimientos en masa se encuentran latentes y en época de lluvia se activan aportando gran volumen de material al cauce de la quebrada.

Los deslizamientos más grandes y con mayor actividad se ubican en la parte alta de la microcuenca en las coordenadas N: 658994 – E: 1005585 a una altura de 2.399 m.s.n.m como punto de referencia; estos deslizamientos son de tipo rotacional retrogresivo, geológicamente afloran intercalaciones de esquistos grafitosos y cuarzo-micáceos que corresponden al complejo Quebradagrande, estas rocas se encuentran altamente fracturadas, donde se distinguen algunos planos entre 20° y 40° de inclinación; presentan grados moderados a altos de meteorización, que dan como resultado suelos limo-arenoarcillosos de color gris, humedad media y baja consistencia; estas características hacen que en época de altas precipitaciones esta zona tenga una alta amenaza por movimientos en masa, puesto que el agua circula entre las fracturas saturando el material rocoso y el suelo haciendo que estos colapsen, aportando gran cantidad de volumen al cauce de la quebrada.

En trabajo de campo se identificó y caracterizó 4 deslizamientos en la parte alta de la microcuenca, de los cuales 3 presentan actividad latente donde el material está altamente fracturado, se presenta una escorrentía de agua continua y se encuentran desnudos es decir con poca o nula cantidad de material vegetal; y uno de ellos presenta poca actividad, tiene un mayor recubrimiento vegetal, sin embargo, el material está altamente fracturado, se observa algunas grietas con presencia de agua. El material rocoso que se desplaza de estos deslizamientos es de diferentes tamaños desde bloques (2 m de diámetro) hasta gravas y arenas (64 a 2 mm), en ocasiones el material más grueso ha represado la quebrada ocasionando que se acumule gran cantidad de material y agua colapsando, bajando con mayor fuerza y magnitud agua abajo como un flujo torrencial, el cual representa una amenaza por avenidas torrenciales, teniendo en cuenta que la quebrada pasa por el casco urbano hasta desembocar al Río San Bernardo y que de esta fuente hídrica se toma el agua, ubicándose la bocatoma en la parte baja de la microcuenca.

6.4 Reptación o Creep

La reptación se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla. La reptación puede ser de tipo estacional, cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno, y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo (figura 47).

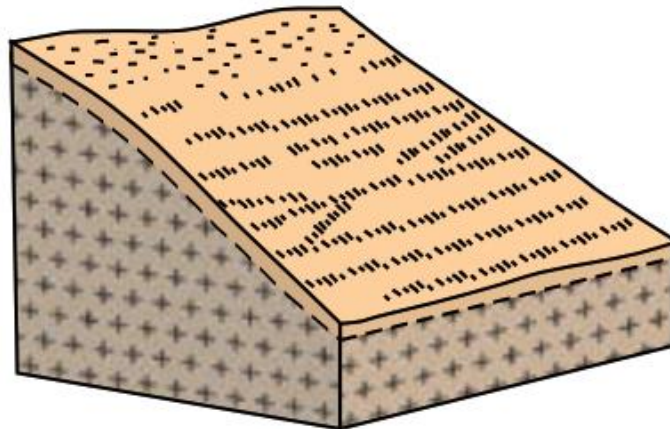


Figura 47. Esquema de reptación.

En las laderas de la microcuenca se observa procesos de reptación que indican movimientos lentos del terreno, donde en varios sectores se observa que este fenómeno se ubica cerca de las coronas de los deslizamientos activos en la parte alta de la microcuenca, indicando que estos procesos son uno de los factores que puede generar nuevos movimientos en masa o acelerar los ya existentes teniendo en cuenta que para la zona de estudio los deslizamientos son de tipo retrogresivo.

7 GENERALIDADES SOFTWARE FLO 2D

El propósito de este programa es el tránsito de crecidas en forma bidimensional constituyéndose en una herramienta de estimación de zonas de riesgo por las crecidas extremas y el diseño de obras de atenuación de sus efectos.

Es versátil, tanto para transitar flujos en canales de sección variable y predecir desbordamientos, así como para simular flujos en llanuras de inundación con topografía compleja. La simulación de las crecidas en áreas urbanas ubicadas en abanicos aluviales y áreas de inundación es relevante; los componentes del modelo se diseñaron para evaluar el flujo en las calles y considerar obstrucciones tales como edificios. Sus aplicaciones principales son:

- Predecir inundaciones, definiendo sus áreas y profundidades, de acuerdo con el período de retorno del evento seleccionado.
- Diseño de obras de mitigación de daños en las áreas de inundación, tales como encauzamiento de corrientes, bordos de protección, canales de drenaje y desvío para conducir los flujos de inundación.

Los procesos físicos que se simulan son:

- Cálculo de flujos sobre topografía y rugosidad compleja.
- Bifurcaciones de flujos.
- Flujo de lodos y escombros.
- Flujo superficial en zonas urbanas.

En el modelo FLO-2D se aplican las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en dos dimensiones (onda dinámica) y enruta los flujos de lodo como un continuo de fluidos al predecir el movimiento del fluido viscoso en función de la concentración de sedimentos. Se emplea un modelo reológico cuadrático para predecir tensiones viscosas y de rendimiento en función de la concentración de sedimentos y se observa la continuidad del sedimento. A medida que cambia la concentración de sedimentos para un elemento de grilla determinado, se simulan los efectos de dilución, el cese del flujo de lodo y la removilización de depósitos. Cabe señalar que los componentes de transporte de sedimentos y flujo de lodo no se pueden utilizar juntos en una simulación FLO-2D.

El esfuerzo cortante en los flujos con altas concentraciones de sedimentos, incluyendo los flujos de lodos y escombros, se calcula como la suma de los esfuerzos cortantes que lo componen.

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d$$

Donde T_c es el esfuerzo cohesivo de fluencia, T_{mc} el esfuerzo cortante de Mohr-Coulomb, T_v el esfuerzo cortante viscoso, T_t el esfuerzo cortante turbulento y T_d el esfuerzo cortante dispersivo.

En términos de la relación cortante, el modelo propone el siguiente modelo reológico cuadrático:

$$\tau = \tau_y + \mu_0 \left(\frac{du}{dy} \right) + C \left(\frac{du}{dy} \right)$$

Donde μ_0 es la viscosidad dinámica del fluido, du/dy es la rapidez de deformación del fluido y C el coeficiente de esfuerzo cortante inercial, calculado en función de la concentración del fluido.

Para definir todos los términos de tensión de cizallamiento para su uso en el modelo FLO-2D, se adoptó el siguiente enfoque. Por analogía, a partir de la obra de Meyer-Peter y M'ller (1948) y Einstein (1950), la relación de tensión cortante es la profundidad integrada y reescrita en la siguiente forma como una pendiente sin dimensiones:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td}$$

donde S_f es la pendiente de fricción total, S_y la de fluencia, S_v la de viscosidad y S_{td} la turbulento-dispersiva.

El flo2d formuló una solución de ecuación cuadrática para la ecuación de pendiente de fricción anterior. La velocidad estimada representa la velocidad de flujo calculada en cada cuadrícula o límite de elemento de canal utilizando la profundidad de flujo promedio entre los elementos. Se pueden suponer valores razonables del valor n de Manning y K para el canal y la resistencia al flujo terrestre.

El peso específico de la matriz de fluido γ_m , el límite elástico τ_y y la viscosidad η varían principalmente con la concentración de sedimento. A menos que esté disponible un análisis reológico del material deposicional del sitio de flujo de lodo, se pueden usar las siguientes relaciones empíricas para calcular la viscosidad y el límite elástico:

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$$

y

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

donde α_i y β_i son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio por O'Brien y Julien en 1988. Se muestra que la viscosidad y el límite elástico son funciones de la concentración volumétrica de sedimento C_v de limos, arcillas y, en algunos casos, arenas finas y no incluyen material clástico más grande en balsa junto con el flujo (Tabla 34). La viscosidad de la matriz de fluido también es una función del porcentaje y tipo de limos y arcillas y la temperatura del fluido. Los flujos de lodo muy viscosos tienen altas concentraciones de sedimento y, en consecuencia, tensiones de alto rendimiento y pueden dar lugar a un flujo laminar, aunque los flujos laminares en la naturaleza son extremadamente raros. Los flujos menos viscosos (inundaciones de lodo) son siempre turbulentos.

Tabla 34. Relaciones T, μ Vs. C_v .

Source	$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ (dynes/cm ²)		$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ (poises)	
Field Data				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
gGlenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relationships Available from the Literature				
lida (1938)*	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-
*See O'Brien (1986) for the references.				
Conversion: Shear Stress: 1Pascal (PA) = 10 dynes/cm ²				
Viscosity: 1Pas = 10 dynes-sec/cm ² =10 poises				

Finalmente cabe mencionar que el modelo FLO-2D requiere como datos principales de entrada información topográfica, hidrológica, geotécnica y reológica. Estos últimos debido a que el comportamiento de los flujos de lodos y escombros es en general no newtoniano, requiriéndose incluir funciones de los parámetros reológicos, tales como relaciones de viscosidad y esfuerzo de cedencia con la concentración volumétrica de sedimentos obtenidos a partir de estudios experimentales.

8 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una “función objetivo”. (*Cabrera, 2019*)

Para llevar a cabo este procedimiento, se pueden usar dos formas:

- a) Prueba y error: Es el método más usado y a la vez más recomendado. Se realiza el ajuste manual de los parámetros teniendo en cuenta el criterio del investigador.
- b) Automática: En este método se optimiza los valores de los parámetros usando herramientas numéricas. A diferencia del método anterior, este es mucho más rápido y efectivo, no obstante, es numéricamente más complejo cuanto más número de parámetros se requiera optimizar. Entre algunas técnicas están: escalamiento (hill-climbing techniques), reconocido simulado (simulated annealing), algoritmos genéticos, etc.

Por otro lado, según Beven (1989) la calibración deber realizarse bajo un punto de vista físico, de tal forma que pueda interpretarse adecuadamente los parámetros y darle una correcta interpretación a la variabilidad espacial. De este modo, la calidad de los resultados de salida del modelo hidrológico no solo depende de los datos de entrada, del proceso y estructura del modelo, sino también de la calibración (*Vélez, 2003*).

8.1 Metodología de Calibración.

Como se mencionó anteriormente, para la elaboración de este procedimiento, es necesario la comparación del modelo hidrológico con la realidad de un evento registrado y así comprobar que el modelo este reproduciendo lo más cercana posible la realidad de la microcuenca. De este modo, fue necesario realizar un trabajo investigativo sobre eventos producidos en la quebrada el Rollo asociados a avenidas torrenciales.

La primera información obtenida fue de parte del cuerpo de Bomberos del municipio de San Bernardo, que pudo brindar un informe sobre crecidas de la quebrada el Rollo del año 2018. En este documento se menciona que la quebrada cuenta con un sistema de monitoreo de inundaciones, instalado el 22 de febrero de 2018 en compañía del personal de la Dirección Administrativa de Gestión del Riesgo de Desastres de la Gobernación de Nariño y Radiocom. Así mismo, se reportan cuatro eventos importantes de crecida:

- 1 de marzo 2018: se presenta alerta por cambio de nivel, con incremento de 1,66 mts presentándose un deslave en la quebrada haciendo que su cauce cambie de curso, el deslave causo rompimiento de la línea de alerta por avenida torrencial y de la base de soporte al extremo de la línea de ruptura.



Figura 48. Fotografía crecida 1 de marzo de 2018

- 23 de marzo 2018: El software de monitoreo y telemetría por radio informa a cerca de un cambio de nivel, con incremento de 1,61 metros, sobre lámina de agua llegando a alerta naranja posteriormente a roja. Una vez se realiza visita de verificación se encuentra que la creciente de la quebrada arrastro material de la base de las losas de concreto que soportan las estructuras.



Figura 49. Fotografía crecida 23 marzo de 2018.

- 4 de mayo de 2018: A las 4:40 pm, nuevamente se presenta alerta por incremento de nivel y alerta por ruptura de sensor de avenida torrencial, con incremento de 1,67 metros sobre lámina de agua, pasados 49 minutos después 5:29 pm de reportado el incremento, el sistema reporta a la plataforma sensor de ruptura por avenida torrencial y un decremento en el nivel no justificado de – 4,79 metros.



Figura 50. Fotografía crecida 4 de mayo de 2018.

- 13 de mayo de 2018, el sistema del software de monitoreo y telemetría por radio digital informa a las 4:56 p.m. un incremento de nivel en alerta roja inmediata, y ruptura de sensor de avenida torrencial, con aumento de 1,69 metros sobre lámina de agua. Se activan los protocolos de acuerdo a la emergencia incluyendo activación de la sirena ubicada en el colegio mediante telemetría por radio, se recibe únicamente reportes del sensor hasta las 5:07 p.m. con un incremento de nivel de 1,73. Posterior e esa novedad no se obtiene respuesta ni reportes del sensor, antes de la visita, se presume que algo debió pasar el punto de monitoreo.



Figura 51. Fotografía crecida 13 de mayo de 2018

Considerando la información anterior, es necesario igualmente analizar la lluvia de estos días, las cuales originaron estas crecidas que en algunos casos dañaron el sistema de alerta instalado en la quebrada. Para ello se solicitó al IDEAM los pluviogramas respectivos, donde se evidencia en algunos de ellos intensidades muy altas (ver anexo 1).

De esta manera, se escogió el evento registrado el día 1 de marzo de 2018 para elaborar la calibración, no obstante, es necesario una referencia física del evento que pueda dar idea de los efectos producidos por la crecida, por lo cual se realizó trabajo de campo en el municipio de San Bernardo con el objetivo de recopilar información adicional para elaborar la comparativa respectiva (figura 52).



Figura 52. Visita de campo realizada por el equipo de Gestión del Riesgo.

Gracias a la información suministrada por los habitantes del municipio, se logró registrar que durante ese día el nivel del agua en el puente principal del pueblo alcanzo los 1.90 metros desde la base del puente hacia la parte superior, encontrándose aun señales del impacto de las rocas en el muro del puente (figura 53).



Figura 53. Puente principal San Bernardo

Paso a seguir, se ingresa los valores de la lluvia al modelo Hidrológico ya elaborado en HEC- HMS. El tiempo de la lluvia escogido para la simulación fue desde las 22:00 del 1 de marzo hasta las 00:00 del 02 de marzo, debido a que durante ese periodo se evidencio

los mayores valores de precipitación. A continuación, se presenta los valores de la lluvia durante estas dos horas:

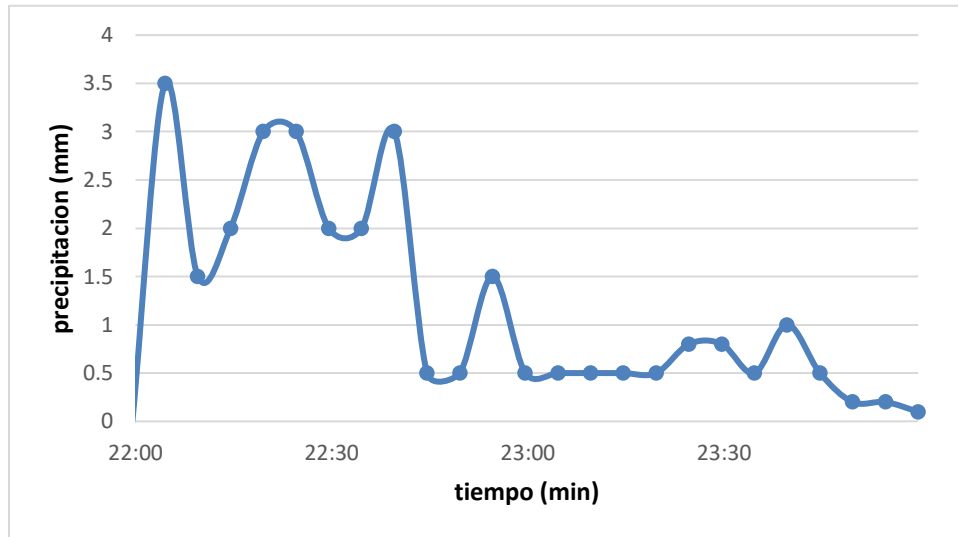


Figura 54. Lluvia real para la calibración

Ingresados los valores de la lluvia al modelo, se calcula el caudal resultante en la microcuenca, resultando entonces el siguiente hidrograma en el punto de desagüe de las tres áreas correspondientes:

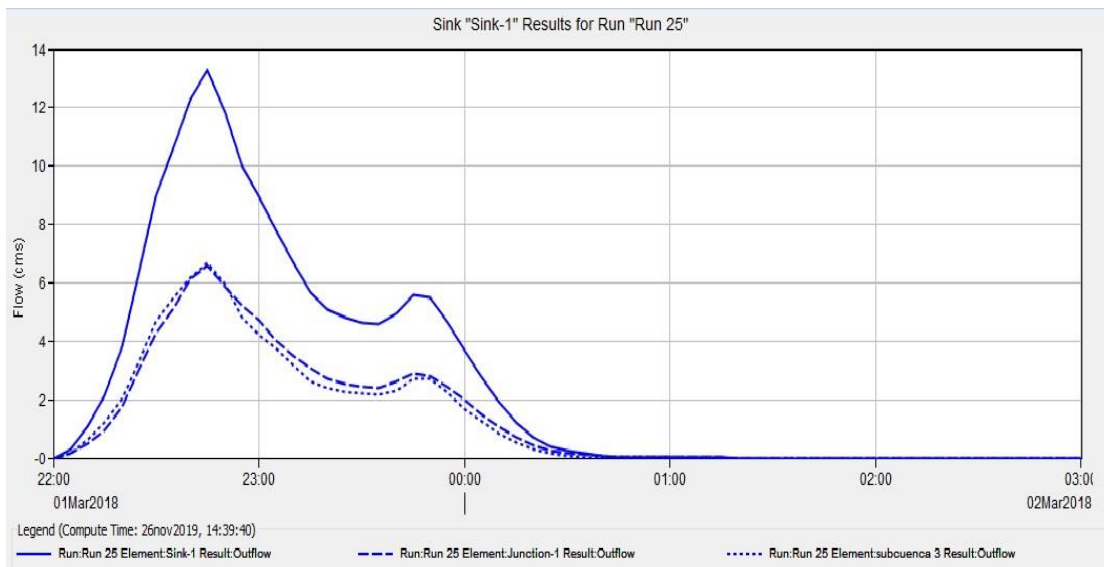


Figura 55. Hidrograma de crecida del evento real de calibración

El hidrograma presenta un caudal pico de $13.3 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 22:45 de la noche, finalizando el evento aproximadamente a las 00:30 de la mañana. Así mismo el volumen generado en toda la microcuenca es de 48.200 m^3 .

8.2 Levantamiento topográfico.

Para realizar la comparación de los resultados del hidrograma de la lluvia real encontrado anteriormente, es necesario contar con un levantamiento topográfico en la zona de referencia del evento, en este caso, el del puente principal. Para ello se realizó este procedimiento en la zona que corresponde al casco urbano, comprendida desde el punto de desagüe de la microcuenca hasta 500 m aguas arriba, teniendo en cuenta igualmente que esta área es considerada la de mayor afectación, porque en el caso de presentarse una emergencia ocasionada por avenidas torrenciales, el impacto directamente se representaría en la infraestructura y vidas humanas de este sector, como se muestra en la siguiente figura:

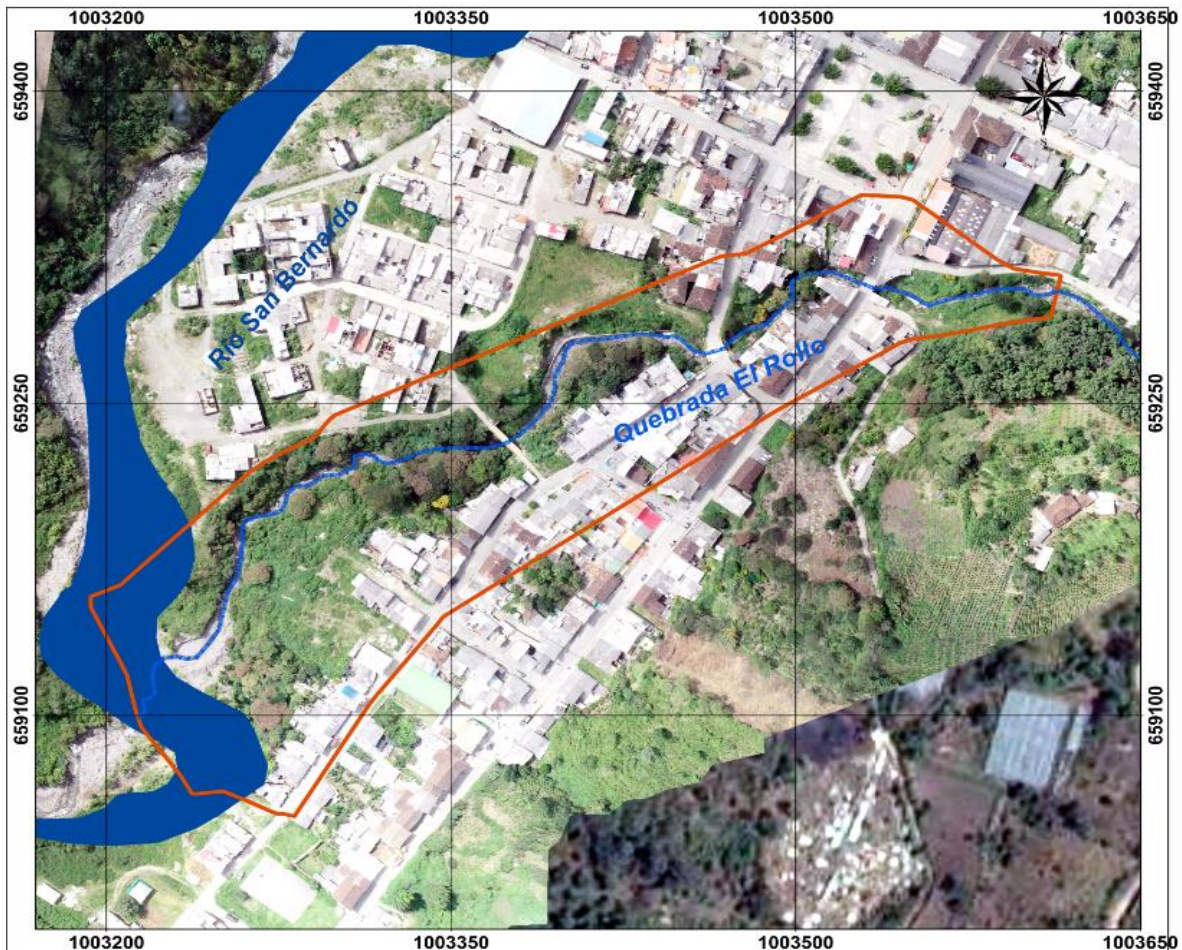


Figura 56. Área del levantamiento topográfico.

Se planteó que el levantamiento debería generar perfiles transversales a lo largo del río para la respectiva modelación (figura 57), curvas cada 50 cm (figura 58) y un perfil longitudinal de la quebrada, con la cota del nivel de la lámina de agua y así usarlos como insumos para el modelamiento hidráulico. De este modo se obtuvo un modelo en AutoCAD que posteriormente se exportó a ArcGis con la información completa.

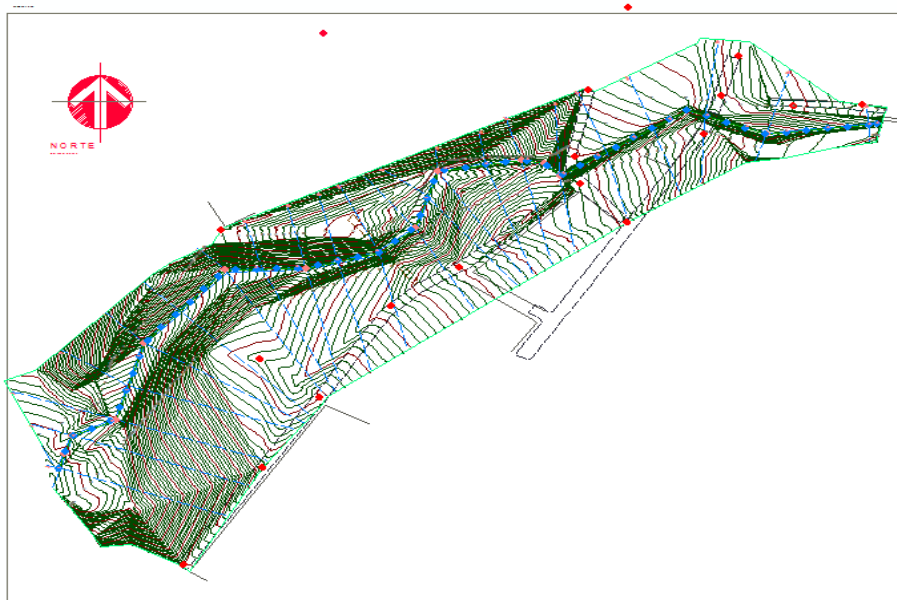


Figura 57. Curvas de Nivel del Levantamiento Topográfico

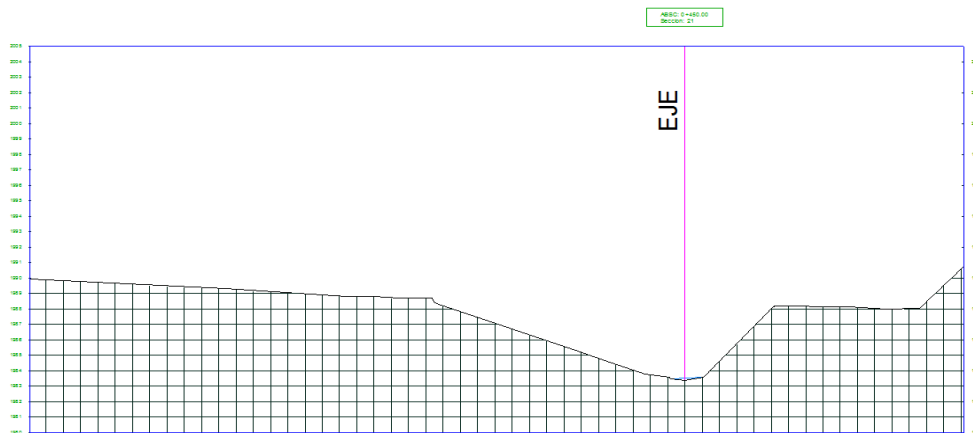


Figura 58. Ejemplo de perfiles generados por la Topografía.

De este modo, se logró obtener 22 secciones transversales a lo largo del río, con datos reales sobre la posición y elevaciones respectivas. Cabe resaltar, que en principio se consideró el valor de 30 metros como la distancia adecuada desde el eje del río hacia los lados, sin embargo, debido a las edificaciones y morfología del terreno en algunos puntos

fue imposible obtener esta información. No obstante, en otros puntos se logró extender este valor y se consiguió información adicional valiosa.

Modelo Digital de Elevaciones

Como insumo final de este procedimiento, se logró obtener un DEM de la zona en cuestión, que de la misma forma como se mencionó en el apartado Modelo Digital de Elevación (DEM)., nos muestra las elevaciones correspondientes al área del levantamiento topográfico, el cual servirá como insumo para la modelación hidráulica.

8.3 Calibración con Modelación en HEC-RAS

Con esta información y los resultados del levantamiento topográfico, se puede modelar la lluvia producida durante este evento y observar si el nivel resultante coincide con la altura obtenida en campo. Para ello, se usará el Software HEC-RAS, el cual permite la modelación hidráulica de un río natural, encauzamiento o canal artificial con flujo unidimensional, permanente, gradualmente variado con geometría prismática o no.

La aplicación del modelo responde a un esquema iterativo de paso directo, en el que se resuelve progresivamente entre sucesivas secciones del río, la ecuación de conservación de la energía para fluidos, considerándose las pérdidas de energía entre secciones por efecto de las contracciones y expansiones y por efecto de la fricción. Además, en particular, el modelo está capacitado para evaluar las pérdidas de carga ocasionadas por la presencia de puentes y otras infraestructuras hidráulicas que se interpongan al paso de la corriente.

Para resolver la ecuación de conservación de la energía, el modelo precisa de la definición geométrica del cauce por el cual tiene lugar el tránsito hidráulico. Se introducen en el modelo tantas secciones como sean necesarias hasta conseguir una adecuada definición geométrica del tramo a modelar. Transversalmente, la ordenación de valores de cota y distancia a uno de los extremos de referencia se hace en orden creciente iniciándose en la margen izquierda y finalizando en la margen derecha, mirando corriente abajo.

Longitudinalmente, se enumeran de aguas abajo hacia aguas arriba, introduciéndose preferentemente los perfiles transversales en la dirección perpendicular a la corriente, abarcándose todo el perímetro mojado (Orio, 2011).

Por otro lado, entre las limitaciones del modelo tenemos:

- El flujo es permanente.

- El flujo es gradualmente variado, excepto en estructuras hidráulicas tales como puentes, vertederos y compuertas. En estas secciones, donde el flujo puede ser rápidamente variado, se utiliza la ecuación de momentos u otra ecuación empírica.
- El flujo es unidimensional.
- Las pendientes de los ríos y canales deben ser pequeñas, es decir menores de 1:10.

Para el desarrollo de la modelación primeramente se ingresaron los perfiles a partir de la creación de un tramo del río en el modelo geométrico del programa, en total fueron 22 los perfiles ingresados cada 22 metros en una longitud de cauce de 500 m. Posterior a eso se introdujo el hidrograma de la lluvia en el modelo de flujo permanente y se simuló para obtener los resultados respectivos.

8.3.1 Resultados obtenidos en HEC-RAS

Es evidente que el punto clave en la calibración es la medida de la altura del agua en el puente, por lo tanto, el análisis se centrara en mirar la altura que alcanzara la simulación en este punto. A continuación, se muestra el perfil #20 que corresponde a este sitio, presentándose el siguiente nivel:

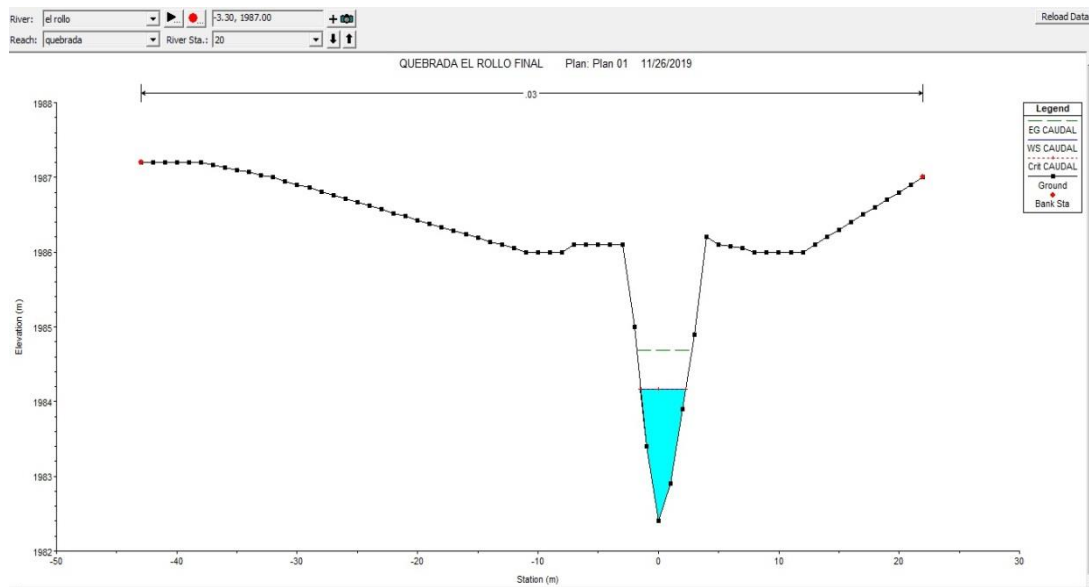


Figura 59. Perfil y nivel en el puente.

El nivel encontrado en esta sección fue de 1.77 metros desde el fondo y en comparación al nivel registrado en campo de 1.90 metros, la medida es muy similar. Es importante mencionar que la simulación en este software contempla solo agua como fluido en la simulación, por lo tanto, aun no se ha contemplado la adición del material arrastrado por la quebrada, lo cual hace a la avenida particularmente torrencial. En este sentido, el nivel

encontrado debía ser menor que el observado en campo, lo cual evidentemente sucedió. No obstante, el programa HEC-RAS no nos arroja resultados reales debido al tipo de fluido que considera en los cálculos y que no coincide con la realidad del estudio; por lo tanto, es necesario considerar un programa distinto para evaluar este tipo de avenidas.

8.4 Calibración con el modelo Flo 2D.

Como se mencionó anteriormente el modelo Hec – Ras no contempla un tipo de flujo torrencial para las simulaciones hidráulicas, de modo que es necesario utilizar el modelo Flo 2D para simular estos tipos de flujos y así reproducir la realidad del objeto de este estudio.

Así como se realizó la simulación en Hec ras para la lluvia real del 1 de marzo, para realizar la calibración en el modelo Flo2D, se ingresó los caudales generados por la lluvia real en la microcuenca, de tal forma que se puedan obtener los niveles en la quebrada El Rollo, de igual manera teniendo en cuenta que un flujo torrencial contiene un porcentaje de volumen sólido, se tomó una concentración en volumen de 0.51, calculada tomando el volumen de líquido que se obtuvo en Hec – Ras y el volumen sólido de uno de los deslizamientos más recurrentes de la quebrada El Rollo (tabla 35).

Tabla 35. Cálculo de Cv hidrograma sólido real.

Volumen lluvia real	Volumen solido	Cv
26100	27972	0.51

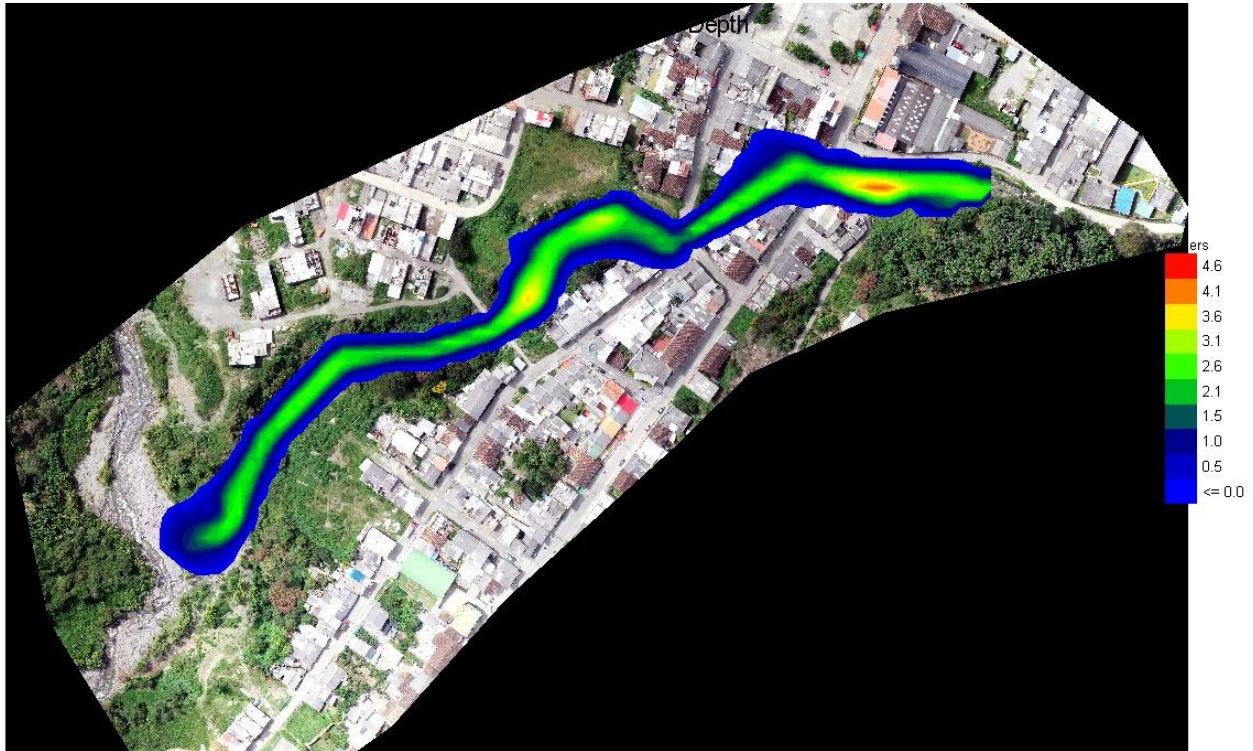


Figura 60. Resultados de la simulación en el modelo Flo2D.

Como se observa en la figura 60, los niveles que se presentan en un evento torrencial con cierta cantidad de volumen se encuentran en un rango desde 1 metro hasta 4.3 metros, no obstante, el punto de referencia para la calibración es el nivel del puente como se observa en la figura, donde tiene un nivel entre 2 y 2.4 metros.

Comparando los valores encontrados con el nivel registrado el 1 de marzo en el puente, se concluye que los valores de caudal y concentración de sólidos están en el orden correcto debido que el nivel de ese día fue de 2 metros.

9 METODOLOGÍA E INSUMOS PARA LA SIMULACIÓN DE AVENIDA TORRENCIAL EN LA MICROCUENCA EL ROLLO - MODELO FLO 2D.

Para realizar la simulación de flujos torrenciales se requiere los siguientes datos, los cuales fueron calculados de las características de físicas, geomorfológicas e hidrológicas de la microcuenca El Rollo, a partir de información secundaria y de campo obtenida a lo largo de la ejecución del estudio.

9.1 Topografía:

Para la simulación en flo2d se realizó un levantamiento topográfico en la parte baja de la microcuenca, del cual se obtuvo un modelo digital de elevación (DEM) que cubre un área de 4.15 hectáreas, curvas de nivel cada 0.5 m con una altitud mínima de 1.933 m.s.n.m y una máxima de 1994,5 m.s.n.m. La longitud del cauce en esta zona es de 0.5 km².

9.2 Hidrología:

Las características hidrológicas de la cuenca son necesarias para conocer el comportamiento cuando se dan las máximas precipitaciones, este fenómeno hidrológico se representa con una lluvia o tormenta de diseño a partir del cual se crea un hidrograma líquido en base al modelo hidrológico HEC-HMS y la metodología del Soil Conservation Service (SCS). Con este modelo hidrológico se obtuvo los siguientes datos de caudal pico, teniendo en cuenta los tiempos de retorno y que la microcuenca se divide en 3 áreas:

Tabla 36. Valores de caudales de las Áreas aportantes de la Microcuenca El Rollo

TR	Caudal (Área 1+ Área 2 en m ³)	Caudal (Área 3 en m ³)	Caudal Total (Área 1+ Área 2+ Área 3 en m ³)
2	10.2	10.9	21.1
25	12.3	13	25.3
50	13	13.7	26.7

9.3 Cálculo de volúmenes:

Para conocer la cantidad de material desplazado se calculó el volumen de los deslizamientos identificados en campo, utilizando el método del prismoide o fórmula exacta, que consiste en calcular el volumen de un corte en este caso un deslizamiento con base en las áreas extremas y media del mismo, asumiendo la figura geométrica de un prismoide cuyos lados extremos son paralelos y sus superficies laterales son planas o alabeadas.

$$V = \frac{V}{6} (A_1 + 4A_m + A_2)$$

Dónde:

A1 y A2: Áreas de las secciones transversales extremas.

Am: Área de la sección transversal en el punto medio entre A1 y A2.

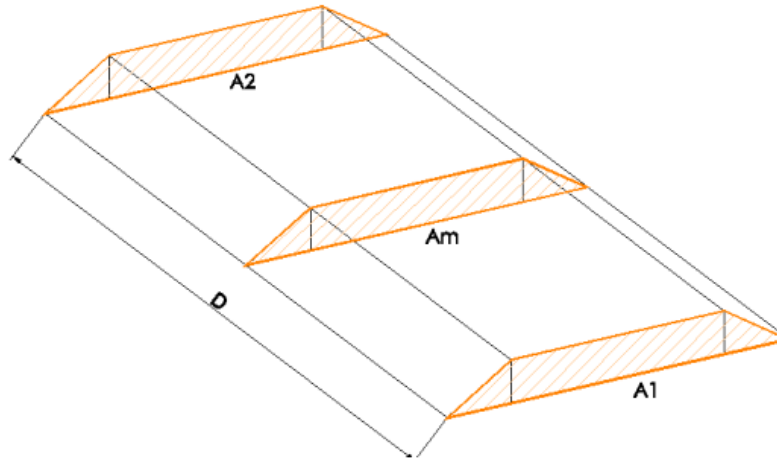


Figura 61. Diagrama del método del prismoide.

Para aplicar la fórmula se requiere en primera instancia dividir el prisma en tres secciones transversales como se indica en la figura 61, y calcular el área para cada sección, donde el área media será el promedio de las dimensiones de las secciones extremas, mas no el promedio de las áreas. En la figura 62 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se indica las dimensiones de cada sección transversal y la fórmula para cada una de las áreas:

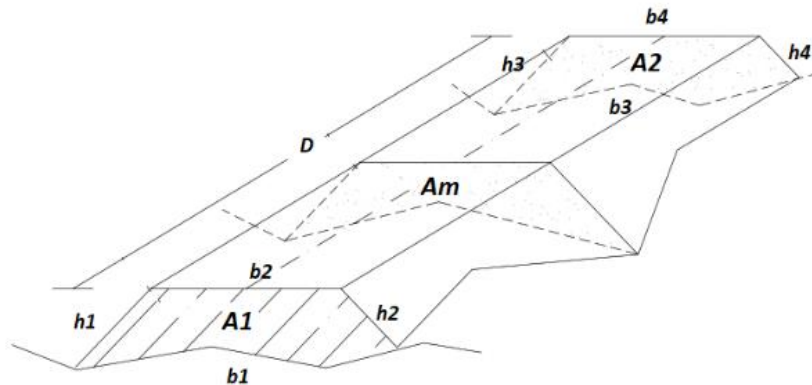


Figura 62. Esquema dimensiones de cada sección transversal de un prismoide para el cálculo de áreas.

Fórmula para calcular las áreas extremas:

$$(1) A1 = h1 * b1 - \frac{1}{2} * (b1 - b2)(h1 - h2)$$

$$(2) A2 = h3 * b3 - \frac{1}{2} * (b3 - b4)(h3 - h4)$$

(3) Fórmulas para el cálculo de área media:

Alturas medias

$$hm1 = \frac{h1 + h3}{2}$$

$$hm2 = \frac{h2 + h4}{2}$$

Bases medias

$$bm1 = \frac{b1 + b3}{2}$$

$$hm2 = \frac{b2 + b4}{2}$$

$$Am = hm1 * bm1 - \frac{1}{2} * (bm1 - bm2)(hm1 - hm2)$$

Cabe aclarar que para la zona de estudio se midió en campo las dimensiones de los deslizamientos en el pie de cada talud, para la corona se utilizó imágenes satelitales y herramientas del SIG, por el difícil acceso a las partes más altas del talud.

Tabla 37. Áreas de las secciones transversales extremas.

DESLIZAMIENTO	D	h1	h2	b1	b2	h3	h4	b3	b4
D1	120	4.1	3.8	78	57	3.2	3.8	48	36
D2	138	3	3.2	253	238	4.3	4	127	118
D3	63	2.8	2.6	40	34	3.2	2.7	61	54
D4	110	4	3.4	61	50	5	3	42	36

Tabla 38. Áreas Medias.

DESLIZAMIENTO	hm1	hm2	bm1	bm2	Am
D1	3.65	3.8	63	46.5	231.1875
D2	3.65	3.6	190	178	693.2
D3	3	2.65	50.5	44	150.3625
D4	4.5	3.2	51.5	43	226.225

Tabla 39. Volumen deslizamientos microcuenca El Rollo calculado por el método del prismoide.

DESLIZAMIENTO	VOLUMEN m3
D1	27972
D2	93795.15
D3	9516.15
D4	24742.66

9.4 Cálculo de Cv para el modelo en Flow 2D:

Para el cálculo del Cv y la construcción del hidrograma sólido que requiere el modelo en Flo 2D, se tomó los volúmenes de los deslizamientos que presentaran mayor recurrencia y susceptibilidad a deslizamientos de la microcuenca El Rollo, para ello se calculó el factor de seguridad utilizando el software de estabilidad de taludes Slide que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo del factor de seguridad (FS) y por tanto la estabilidad de los taludes.

Un análisis de límite de equilibrio permite obtener un factor de seguridad, determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento. Para el análisis de estabilidad se requiere determinar principalmente las siguientes propiedades geotécnicas de los suelos y del talud:

- Peso Unitario seco (kN/m³)
- Peso unitario saturado (Si hay presencia nivel freático) (kN/m³)
- Cohesión (kN/m²)
- Angulo de Fricción (grados)
- Nivel Freático

El factor de seguridad es empleado para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$FS = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud (figura 63). En los métodos de límite de equilibrio el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie.

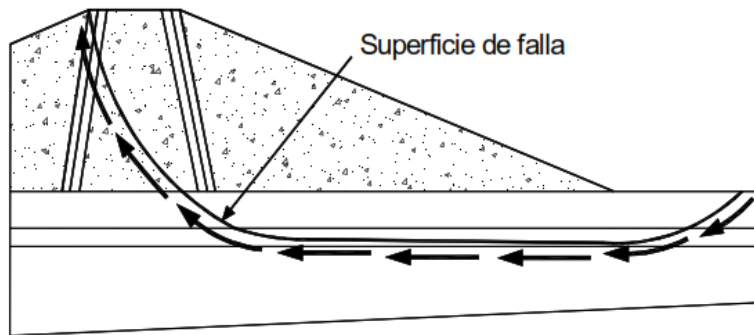


Figura 63. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante (U. S. Corps of Engineers, 2003)

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Algunos métodos son precisos y otros, solamente aproximados, sin embargo, los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos ayudados de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión.

Este sistema supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

Para realizar el análisis de estabilidad de taludes en la microcuenca El Rollo en el programa slide, se tomó las propiedades geomecánicas de los ensayos de laboratorio del POMCA JUANAMBÚ (2019) de acuerdo con las unidades geológicas superficiales que afloran en el sector, también se tuvo en cuenta los *“Estudios de suelo para la Construcción de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Central de Beneficios Animal – Municipio de San Bernardo”*, dado que esta se localiza en el área donde se presentan los deslizamientos de la zona de estudio.

En la tabla 40 se muestra los datos tomados para el cálculo del FS de los taludes y de acuerdo con lo observado en campo se determinó las capas de material rocoso, suelo residual, la cantidad de material vegetal presente y la tabla de agua, que se encuentra a

aproximadamente 1 metro de acuerdo con los estudios de suelo disponibles de la zona en el municipio de san Bernardo.

Tabla 40. Parámetros Geomecánicos de material solido de la Microcuenca El Rollo.

Capa	Peso unitario seco Kn/m ³	Peso unitario húmedo Kn/m ³	Cohesión kN/m ³	Angulo de fricción °
Roca	22	24.28	99.9	34.86
Suelo	18.29	19.2	15.8	27.57

En las siguientes imágenes se muestra los FS para cada deslizamiento que se identificó en campo, donde se puede observar que los deslizamientos 1 y 4 presentan un FS menos a 1, indicando que son más inestables y que de acuerdo, tanto de lo observado en campo como de los eventos históricos, son más recurrentes, además son los que presentan menor cantidad de cobertura vegetal y están más expuestos a procesos erosivos; mientras que los deslizamientos 2 y 3 presentan un FS mayor a 1 indicando mayor estabilidad, los cuales presentan mayor cobertura vegetal y son menos recurrentes, sin embargo son altamente susceptibles a presentar movimientos en masa.



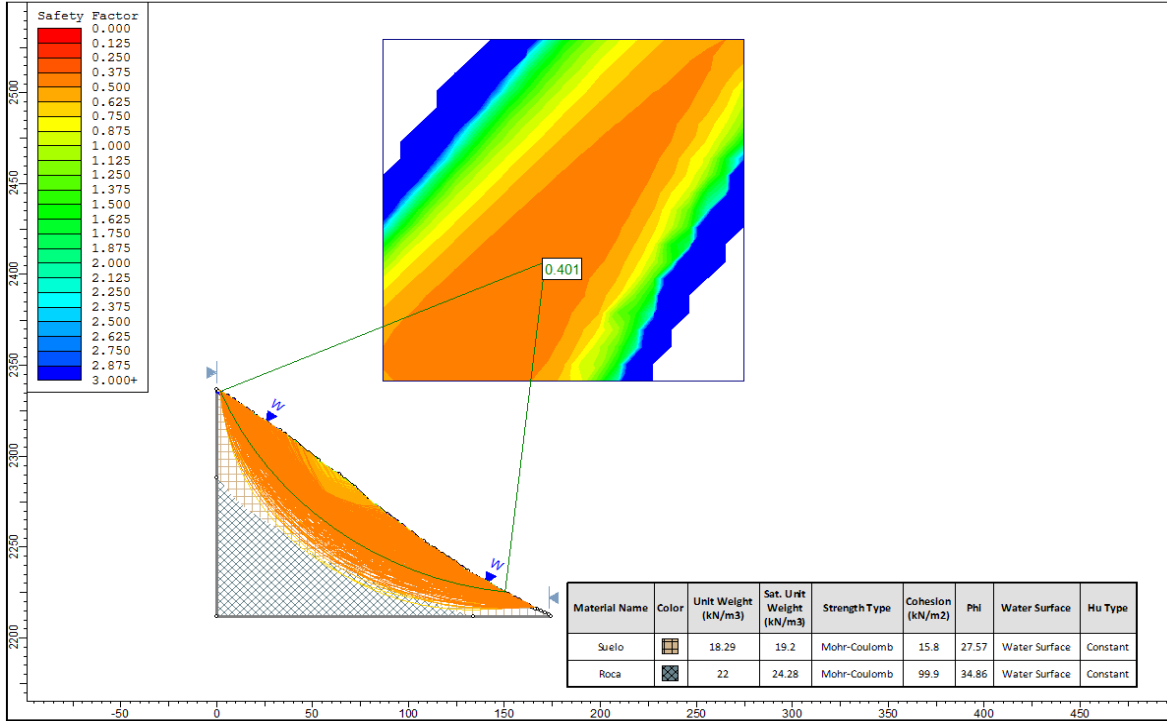


Figura 64. Deslizamiento 1. Coordenadas

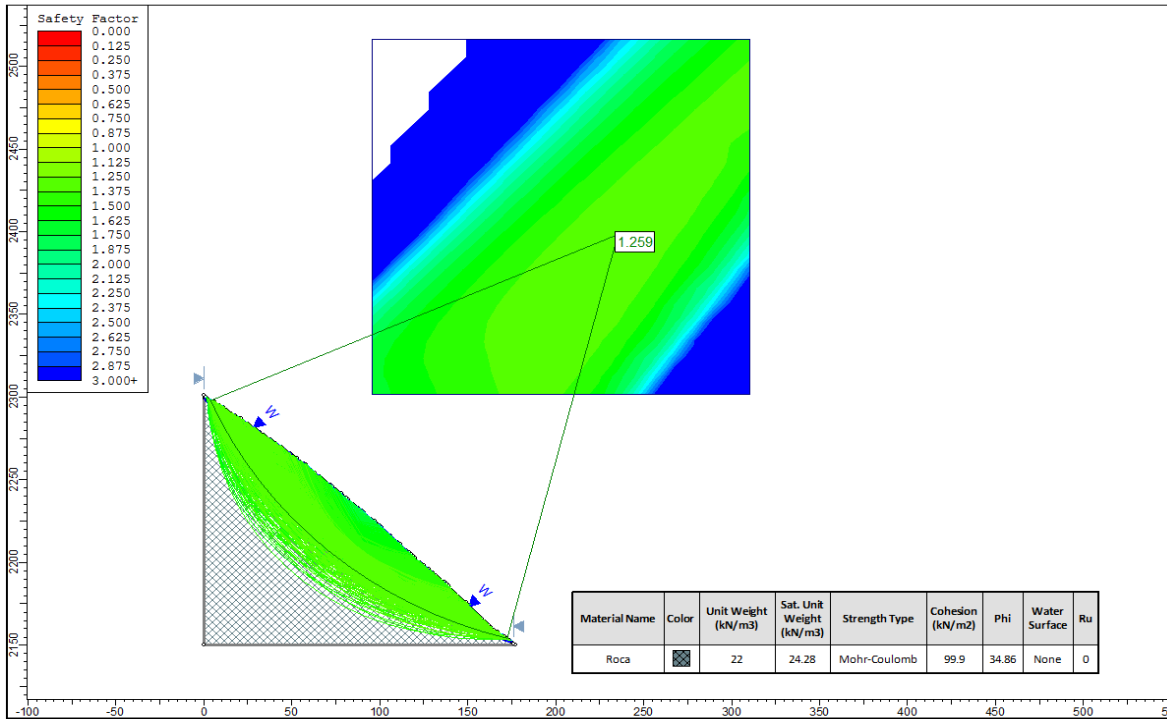


Figura 65. Deslizamiento 2. Coordenadas.

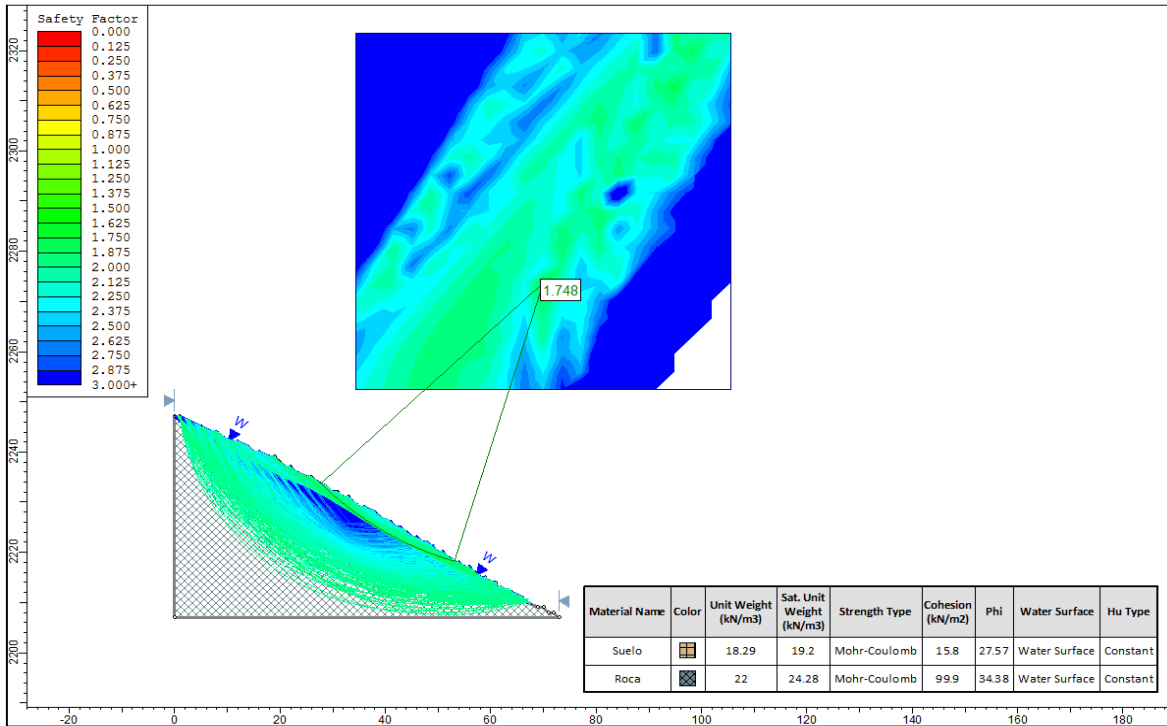


Figura 66. Deslizamiento 3. Coordenadas.

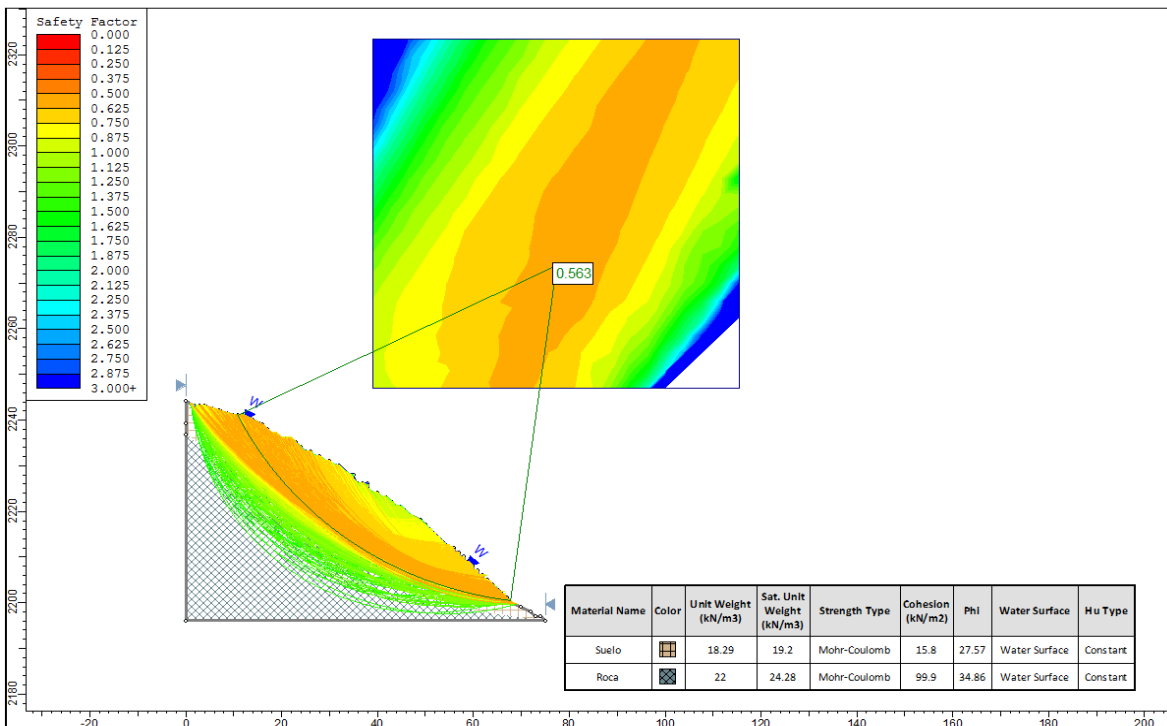


Figura 67. Deslizamiento 5. Coordenadas.

Teniendo en cuenta las características hidromorfométricas de la microcuenca El Rollo, se calculó un Cv para las áreas 1 y 2 y un Cv para un área total, tomando los volúmenes líquidos calculados en el modelo HEC-HMS para cada respectiva área; sin embargo el volumen sólido se asume el mismo en todas las áreas puesto que no se puede predecir su concentración en volumen a diferentes tiempos de retorno; por lo tanto se tomó los volúmenes sólidos de la siguiente manera: para 2 años la cantidad de los sedimentos del lecho, mientras que para 25 y 50 años se tomó la suma del volumen de los deslizamientos 1 y 3, teniendo en cuenta que son los taludes que tiene un FS menor a , presentan mayor inestabilidad, están más descubiertos de vegetación y son los más recurrentes cuando las precipitaciones son altas. En este orden de ideas el Cv se calculó con la siguiente fórmula para cada área:

$$Cv = \frac{cv \text{ sólido}}{cv \text{ sólido} + cv \text{ líquido}}$$

Tabla 41. Valores de Cv para las áreas 1 y 2 de la Microcuenca El Rollo.

	Volumen líquido	V Sólido	Cv
TR2	17500	14893.75	0.46
TR25	21100	27972	0.57
TR50	22200	27972	0.56

Tabla 42. Valores de Cv para el área total de la Microcuenca El Rollo.

	Volumen líquido	V Sólido	Cv
TR2	34500	14893.75	0.30
TR25	41400	52714.6667	0.56
TR50	43600	52714.6667	0.55

10 SIMULACIÓN FLO 2D

Como se ha mencionado anteriormente, no existen metodologías descritas que permitan conocer el comportamiento y magnitud de una avenida torrencial, esto debido que en este tipo de fenómeno se tiene un porcentaje líquido y cierta concentración de material sólido, por tanto, se comporta como flujos que requiere de cierto esfuerzo para que este se ponga en movimiento.

El modelo bidimensional de diferencias finitas Flo – 2D permite simular flujos con concentración de material sólido, como es el caso del presente estudio, donde se presenta flujos de escombros, aclarando que este fenómeno es complejo y que el modelo es solo una aproximación al problema, puesto que las concentraciones de material sólido y líquido (caudales) pueden variar y ser mayores o menores a los datos tomados tanto en campo y/o los calculados bajo las diferentes metodologías empleadas tanto para el componente sólido como líquido (Caudales).

10.1 Categorización de la amenaza modelo flo 2d

La categorización de la amenaza por inundación se realizará con base en la metodología desarrollada por García et al. (2003, 2005). Los criterios del mapa de delineación de la amenaza se propusieron por primera vez en el proyecto PREVENE, 2001, donde se aplicaron a dos abanicos aluviales en Caracas, Venezuela. El enfoque sigue los problemas suizos y austriacos que determinan tres zonas (Alto, medio y bajo) para delinear el nivel de amenaza de inundación.

La intensidad de la inundación está definida por la profundidad y el producto de profundidad por la velocidad del flujo. La probabilidad de ocurrencia es inversamente proporcional a la magnitud de la inundación. Por eso, los grandes eventos ocurren con menor frecuencia, pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad y a la velocidad del flujo, mientras que los eventos pequeños son más frecuentes, pero menos dañinos, (tabla 43).

Tabla 43. Nivel de Intensidad por flujo torrencial.

DEFINICIÓN DE LA INTENSIDAD ANTE FLUJOS TORRENCIALES			
Intensidad	Máxima profundidad h(m)		Producto de la máxima profundidad h (m) por la máxima velocidad v (m²/s)
Alta	$h > 1.0 \text{ m}$	ó	$v h > 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$0.2 \text{ m} < h < 1.0 \text{ m}$	y	$0.2 \text{ m} < v h < 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$0.2 \text{ m} < h < 1.0 \text{ m}$	y	$v h < 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$

El nivel de la amenaza se define, entonces, como una función discreta que combina la intensidad (magnitud del evento) y el periodo de retorno (frecuencia).

Para fenómeno de avenidas torrenciales el mapa de amenaza se presenta en tres colores para definir el nivel de amenaza: nivel alto (rojo), nivel medio (Amarillo) y nivel bajo (Verde), (tabla 44).

Tabla 44. Nivel de amenaza por flujo torrencial.

INTENSIDAD	Alta			
	Media			
	Baja			
FRECUENCIA		Alta	Media	Baja
Periodo de Retorno		2	20	100
Probabilidad de ocurrencia		50%	5%	1%

Los colores de los mapas se traducen en áreas con características específicas de amenaza potencial por avenidas torrenciales descritas en la tabla 45.

Tabla 45. Categorización de Amenaza por Fenómeno de Avenidas Torrenciales.

NIVEL DE AMENAZA	COLOR	DESCRIPCIÓN
Alta		Las personas están en peligro tanto dentro como fuera de sus casas. Las estructuras están en peligro de ser destruidas.
Media		Las personas están en peligro fuera de sus casas. Los edificios pueden sufrir daños y posible destrucción dependiendo de Características constructivas.
Baja		El peligro para las personas es bajo o inexistente. Los edificios pueden sufrir pequeños daños, pero las inundaciones o la sedimentación pueden afectar a la estructura interior.

10.2 Escenarios de amenaza propuestos

Con base en la delimitación de áreas de drenaje, se plantea dos escenarios hipotéticos para determinar la amenaza, donde se toma como información base el levantamiento topográfico del cauce principal de la quebrada El Rollo con una longitud de 0.5 km, con curvas de nivel cada 0.5 m, obteniendo un DEM con celdas de 1 m, un drenaje principal y los datos de C- Manning. En este sentido se plantea un primer escenario con los hidrogramas de las áreas 1 y 2 y un segundo escenario con los hidrogramas del total de áreas de drenaje. Para cada escenario se toma los caudales de a tiempos de retorno a 2, 25 y 50 años calculados en dos horas con una discretización temporal cada 5 minutos, donde la concentración en volumen (Cv) se asigna a los picos más altos de la serie, considerando que en estos hay mayor capacidad del caudal de transportar sedimentos y por tanto hay mayor concentración de los mismos.

10.2.1 Escenario de Amenaza 1: Áreas de drenaje 1 y 2.

Para plantear este primer escenario, se considera para los tiempos de retorno de 2 y 25 años solo el volumen de material sólido del deslizamiento 1, teniendo en cuenta la cantidad de volumen líquido y suponiendo la capacidad que tienen tanto la precipitación como del caudal, de que colapsen los deslizamientos y se transporten los sedimentos, además el deslizamiento que se toma en este escenario es el más susceptible a movimientos en masa y en los eventos torrenciales es el que aporta mayor cantidad de volumen sólido.

En la siguiente tabla se muestra los datos de caudal y Cv que se tomaron para crear el hidrograma sólido que condiciona al modelo para realizar la simulación del flujo torrencial

Tabla 46. Datos para simular el escenario 1.

Tiempo de Retorno	Tr2	Cv	Tr25	Cv	Tr50	Cv
Volumen	17500	14893	21100		22200	
Tiempo						
0:00	0		0		0	
0:05	0.1		0.1		0.1	
0:10	0.5		0.6		0.6	

0:15	2.7		3.2		3.4	
0:20	6.2		7.5		8	
0:25	8.9		10.7		11.3	
0:30	10.2		12.3		13	
0:35	9.6		11.6		12.2	
0:40	7.4		8.8		9.3	
0:45	5		6		6.4	
0:50	3.1		3.8		4	
0:55	1.8		2.2		2.3	
1:00	1.1		1.3		1.4	
1:05	0.7		0.8		0.9	
1:10	0.4		0.5		0.5	
1:15	0.3		0.3		0.3	
1:20	0.2		0.2		0.2	
1:25	0.1		0.1		0.1	
1:30	0.1		0.1		0.1	
1:35	0		0		0	
1:40	0		0		0	
1:45	0		0		0	
1:50	0		0		0	
1:55	0		0		0	
2:00	0		0		0	

10.2.1.1 Resultados simulación escenario 1.

Se realizó la simulación con los hidrogramas y los Cv calculados para cada tiempo de retorno, obteniendo los siguientes resultados.

- **Tiempo de retorno 2 años.**

Se tomó los caudales calculados en dos horas con una discretización temporal cada 5 minutos, donde el pico más alto corresponde a un caudal de 10.2 m³/s, considerando en los picos más bajos un Cv constante de 0.25 y en el momento que empiezan a ascender los caudales se asigna un Cv de 0.45, asumiendo que en los picos más altos hay mayor concentración y transporte de material sólido; de igual manera cuando desciende el hidrograma el Cv vuelve a ser constante, por tanto la concentración de sedimentos también disminuye (Figura 68).

Los resultados de la simulación indican que el flujo alcanza unas profundidades de 0.5 a 0.8 metros en las partes más distantes del eje de la quebrada y de 1.3 a 2.1 metros sobre el cauce de la quebrada a una velocidad promedio de 3.3 m/s como se observa en las figuras 69 y 70.

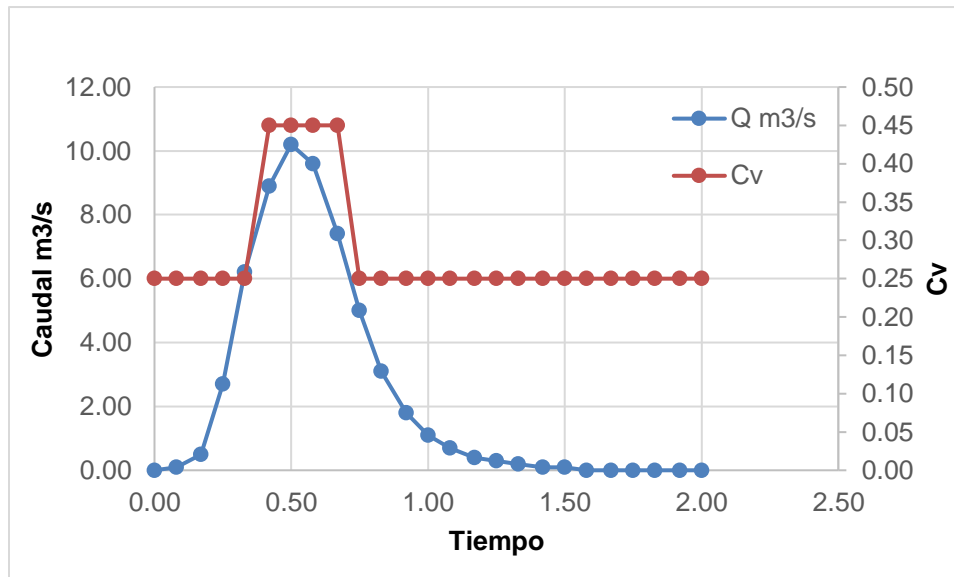


Figura 68. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – TR2.

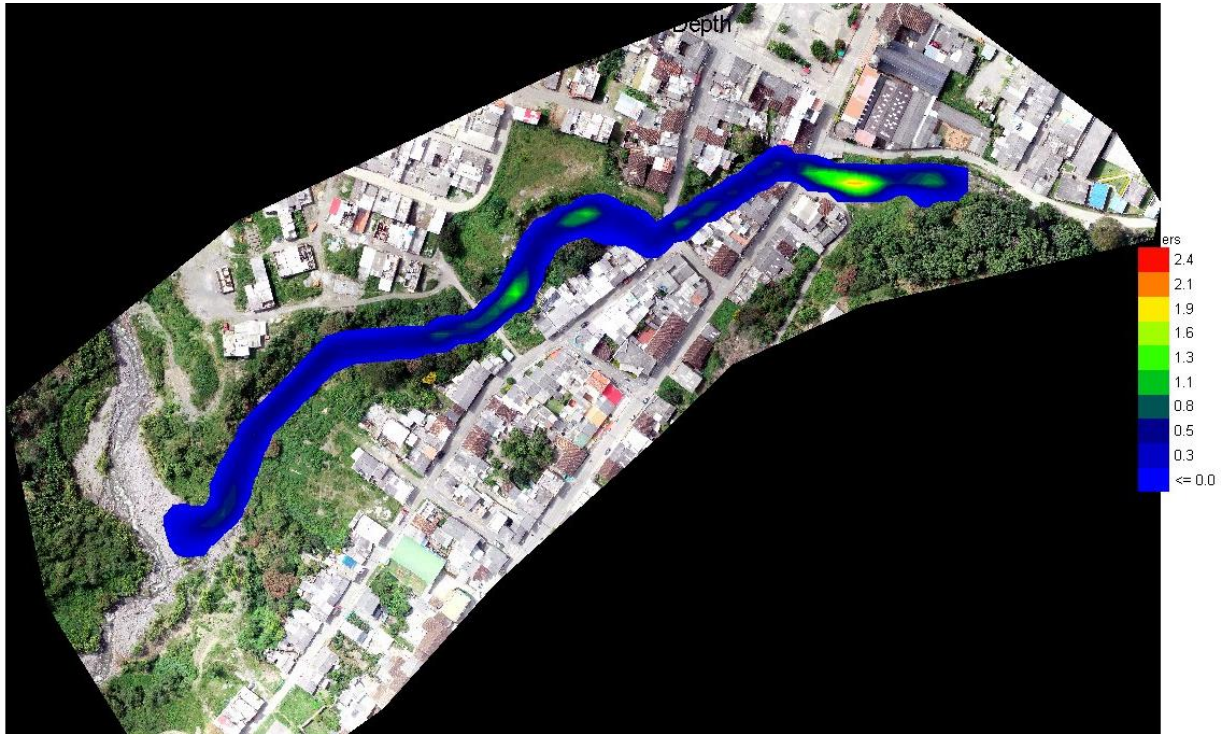


Figura 69. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 2 años.

Figura 70. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 2 años.

- **Tiempo de retorno 25 años.**

En un tiempo de retorno de 25 años el caudal máximo de la serie es de 12.3 m³/s, donde el Cv es 0.30 hasta el momento que asciende el hidrograma que se asigna un Cv de 0.57 y cuando disminuyen los caudales el Cv vuelve a ser de 0.30 (figura 71), dando como resultado un flujo con profundidades entre 3.2 y 5.1 sobre el cauce de la quebrada, desbordando hasta 1.3 m sobre el casco urbano, con una velocidad de 4.5 m/s (figuras 72 y 73).

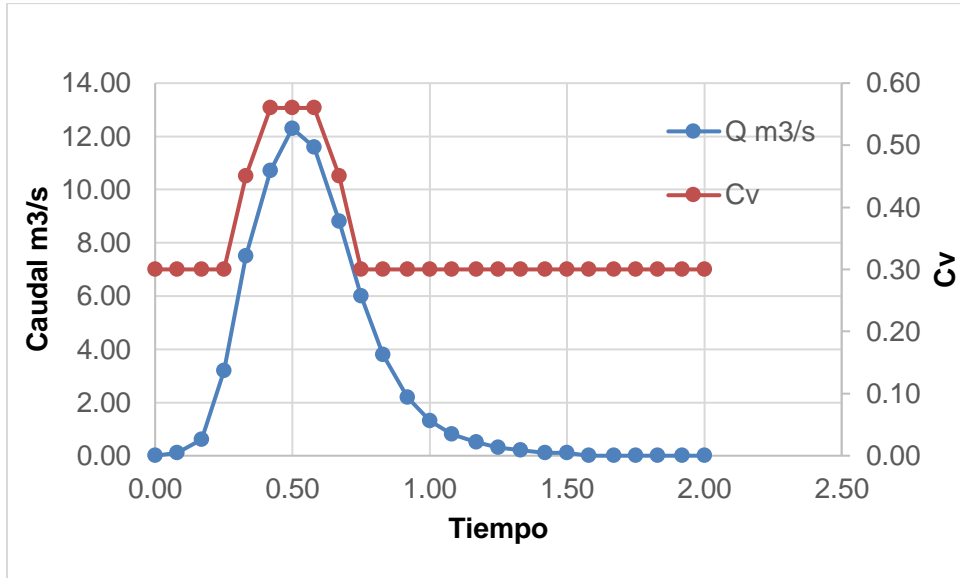


Figura 71. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 25 años.

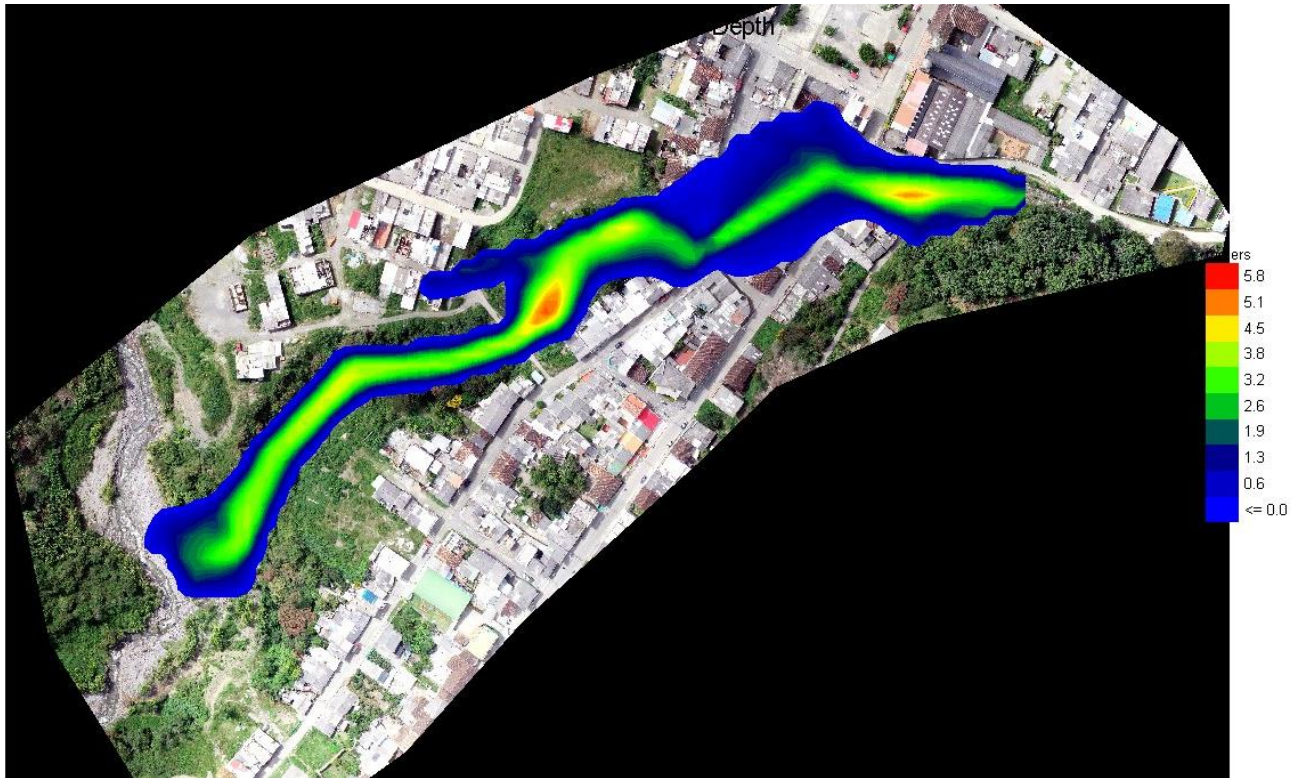


Figura 72. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años.

Figura 73. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 25 años.

- **Tiempo de retorno 50 años.**

En la serie calculada a 50 años se obtiene un caudal máximo de 13 m³/s, considerando en los caudales iniciales un Cv constante de 0.30 y en los picos más altos, donde comienza a ascender el hidrograma un Cv de 0.56, es decir que hay mayor concentración y transporte de material sólido, y en el momento que comienza a descender o cesar la lluvia el Cv vuelve a ser constante de 0.30, disminuyendo de igual manera la cantidad de material sólido (figura 74).

Los resultados de la simulación en un tiempo de retorno a 50 años, el flujo tiene unas profundidades de 0.5 a 0.8 en las partes más distales de la quebrada y de 3.2 a 5.8 sobre el cauce de la quebrada. El flujo viaja a una velocidad aproximada de 3.8 m/s sobre el cauce de la quebrada (figura 75 y 76).

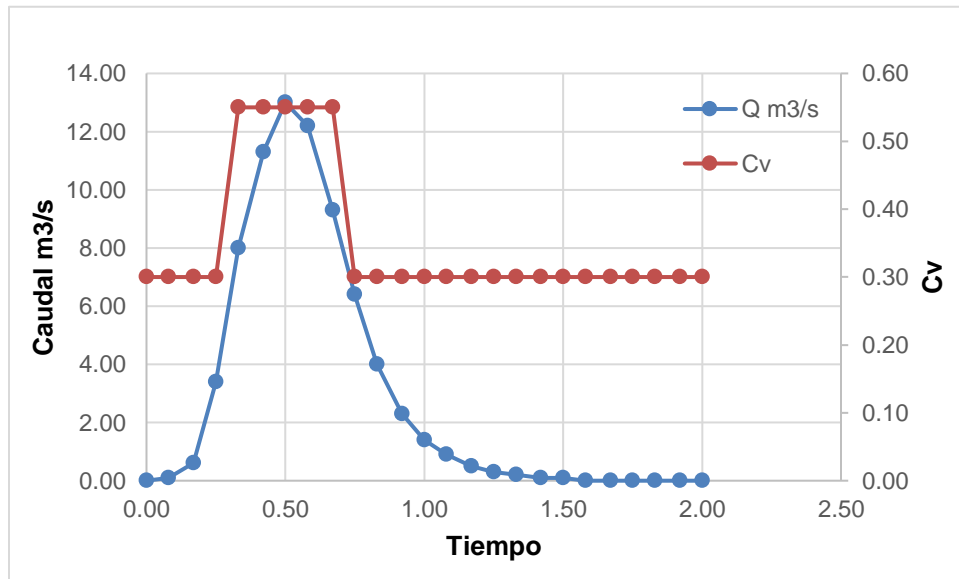


Figura 74. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 50 años.

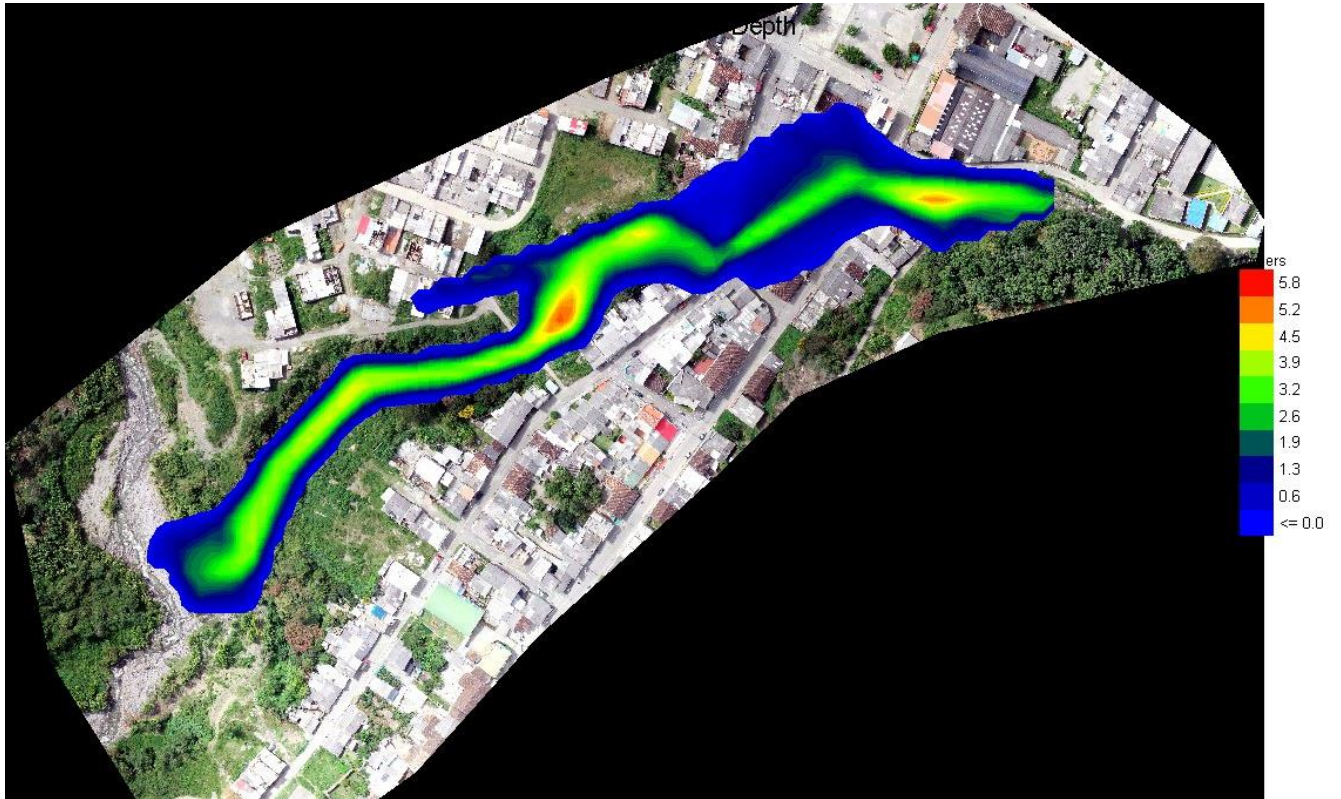


Figura 75. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años.

Figura 76. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 50 años.

- Amenaza por avenidas torrenciales – Escenario 1.

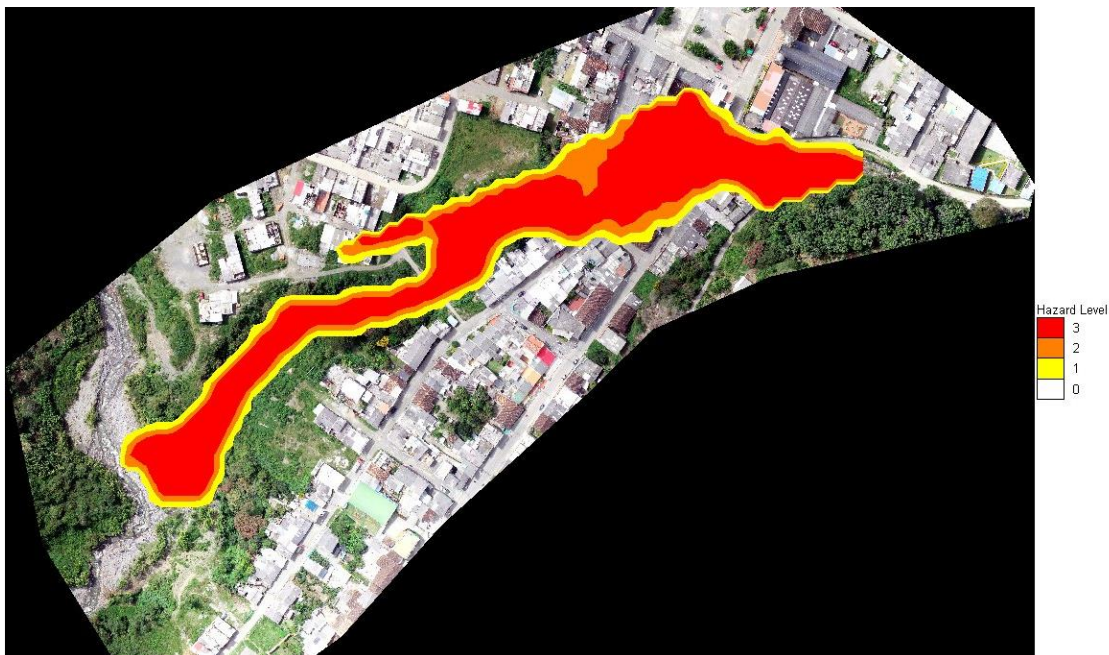


Figura 77. Zonas de amenaza escenario 1.

10.2.2 Escenario de amenaza 2: áreas de drenaje 1, 2 y 3.

En este escenario para los tiempos de retorno de 2 y 25 años, se considera el volumen de los deslizamientos 1 y 3 que presentan mayor susceptibilidad a la generación de movimientos en masa, esto teniendo en cuenta que tanto los caudales como el volumen líquido, son mayores que los que se utilizan en el escenario 1.

En la siguiente tabla se muestra los datos de caudal y Cv que se tomaron para crear el hidrograma sólido que condiciona al modelo para realizar la simulación del flujo torrencial

Tabla 47. Datos para simular el escenario 2.

Tiempo de Retorno	Tr2	Cv	Tr25	Cv	Tr50	Cv
Volumen	17500	14893	21100		22200	
Tiempo						
0:00	0		0		0	
0:05	0.2		0.2		0.2	
0:10	1		1.2		1.3	

0:15	5.3		6.3		6.7	
0:20	12.9		15.6		16.5	
0:25	18.8		22.6		23.8	
0:30	21.1		25.3		26.7	
0:35	19.3		23.2		24.4	
0:40	14.5		17.2		18.1	
0:45	9.3		11.1		11.7	
0:50	5.4		6.5		6.9	
0:55	3.1		3.7		3.9	
1:00	1.8		2.1		2.3	
1:05	1.1		1.3		1.4	
1:10	0.6		0.8		0.8	
1:15	0.4		0.4		0.4	
1:20	0.3		0.3		0.3	
1:25	0.1		0.1		0.1	
1:30	0.1		0.1		0.1	
1:35	0		0		0	
1:40	0		0		0	
1:45	0		0		0	
1:50	0		0		0	
1:55	0		0		0	
2:00	0		0		0	

- **Tiempo de retorno 2 años**

En la serie calculada para un tiempo de retorno de 2 años, el pico más alto corresponde a un caudal de 21.1 m³/s, considerando en los picos más bajos un Cv constante de 0.28 y en el momento que empiezan a ascender caudales se asigna un Cv de 0.30, asumiendo que en los picos más altos hay mayor concentración y transporte de material sólido; de igual manera cuando desciende el hidrograma el Cv vuelve a ser constante, y la concentración de sedimentos disminuye (Figura 78).

Los resultados de la simulación para un Tr2 indican que el flujo alcanza unas profundidades de 0.7 a 1.1 metros en las partes más distantes del eje de la quebrada y de 1.8 a 2.5 metros sobre el cauce de la quebrada a una velocidad promedio de 4.1 m/s como se observa en las figuras 79 y 80.

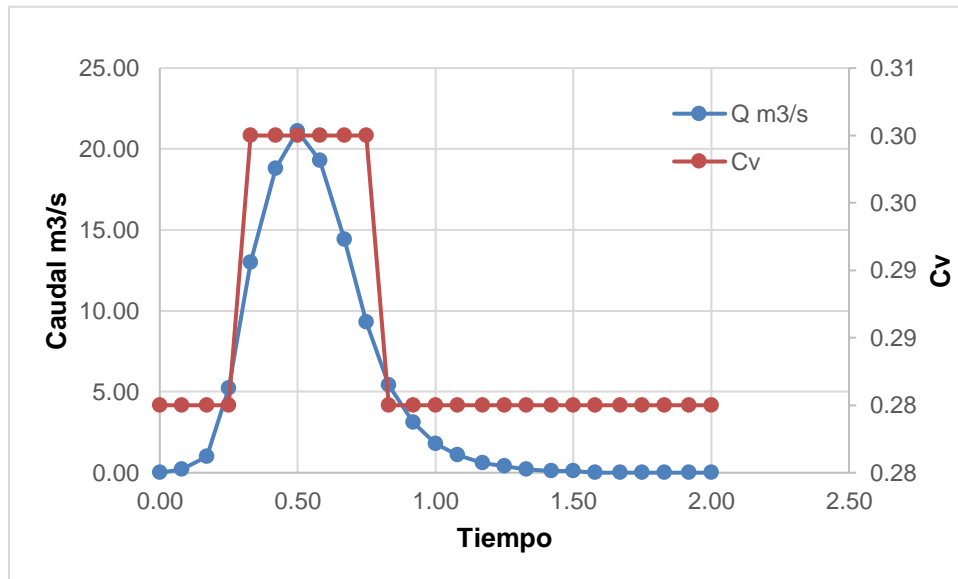


Figura 78. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 2 años.

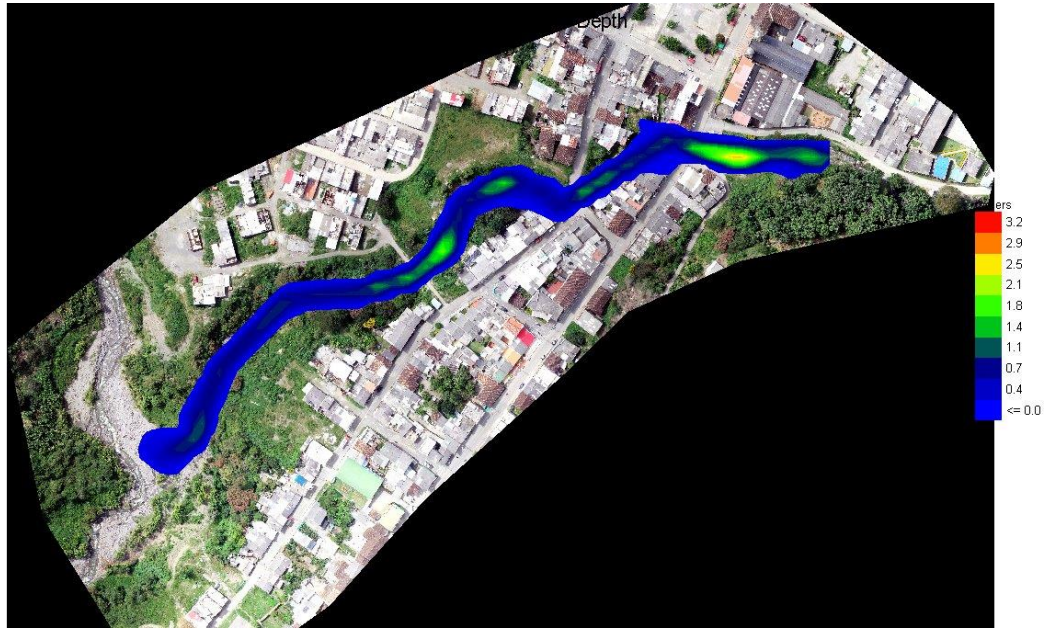


Figura 79. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 2 años.

Figura 80. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 2 años.

- **Tiempo de retorno 25 años**

Para la serie de 25 años el caudal máximo es de 25.3 m³/s, considerando en los caudales iniciales un Cv constante de 0.30 y en los picos más altos, donde comienza a ascender el hidrograma un Cv de 0.56, es decir que hay mayor concentración y transporte de material sólido, y en el momento que comienza a descender o cesar la lluvia el Cv vuelve a ser constante de 0.30, disminuyendo de igual manera la cantidad de material sólido (figura 81).

En los resultados de la simulación, el flujo tiene unas profundidades de 0.7 a 1.4 metros en las partes donde el flujo inunda algunas viviendas del casco urbano y de 3.6 a 6 metros sobre el cauce de la quebrada. El flujo se transporta a una velocidad aproximada de 4.7 m/s sobre el cauce de la quebrada (figura 82 y 83).

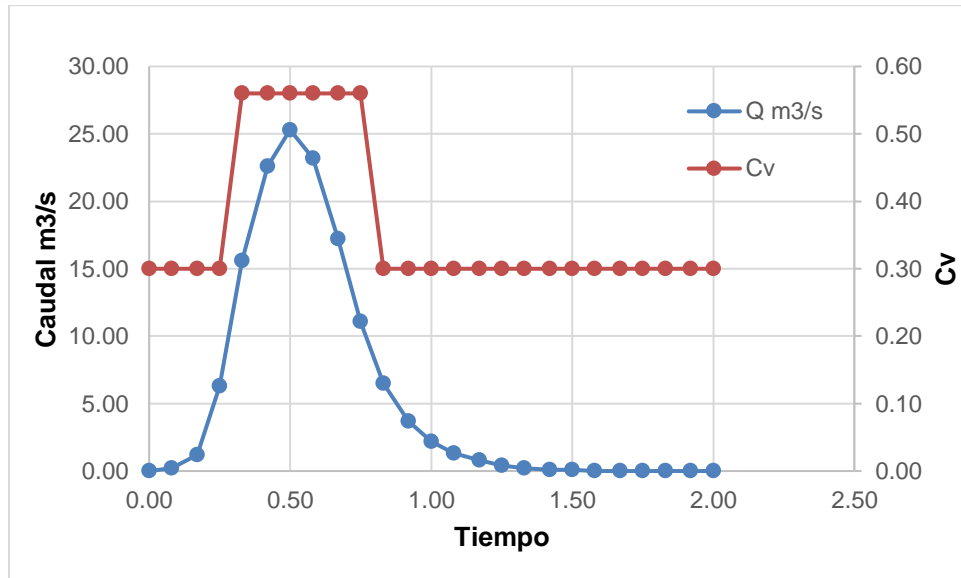


Figura 81. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 25 años.

Figura 82. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años.

Figura 83. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 25 años.

- **Tiempo de retorno 50 años**

En la serie de 50 años se obtiene un caudal máximo de 26.7 m³/s, asignando en los caudales iniciales un Cv constante de 0.30 y en los picos más altos, donde comienza a ascender el hidrograma un Cv de 0.55, donde se supone que hay mayor concentración y transporte de material sólido, y en el momento que comienza a descender el hidrograma el Cv vuelve a ser constante de 0.30, disminuyendo igualmente la cantidad y transporte de material sólido (figura 84).

La simulación en este tiempo de retorno, el flujo tiene unas profundidades de 1.4 a 2 metros en las partes más distales de la quebrada donde el flujo inunda algunas viviendas del casco urbano y de 3.4 a 6.2 metros sobre el cauce de la quebrada. En este caso el flujo viaja a una velocidad aproximada de 3.8 m/s sobre el cauce de la quebrada (figura 85 y 86).

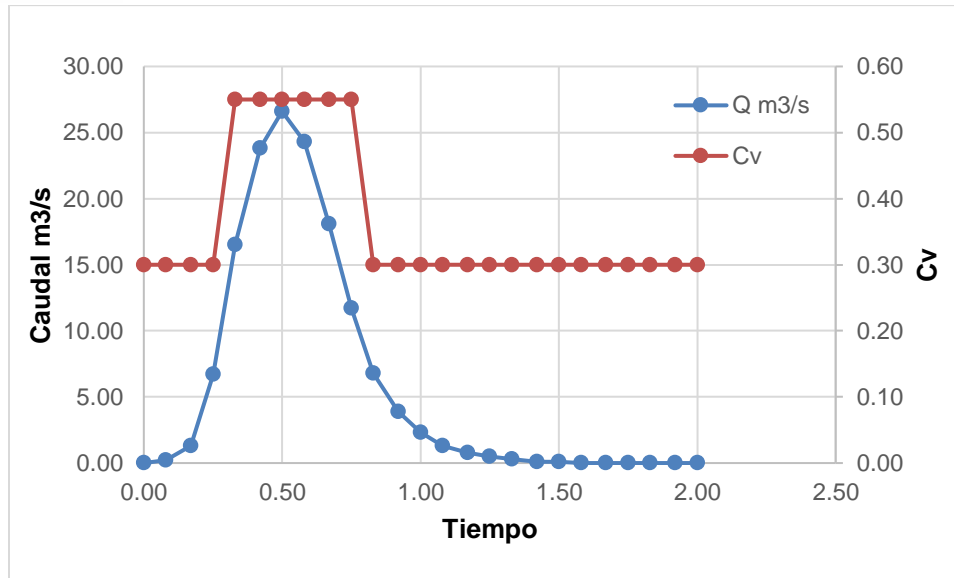


Figura 84. Hidrograma de caudal líquido y su relación con la concentración en volumen – Tiempo de retorno 50 años.

Figura 85. Profundidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años.

Figura 86. Velocidad del flujo a tiempo de retorno de 50 años.

11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las avenidas torrenciales son una de las amenazas naturales más destructivas e impredecibles y que a nivel nacional no han sido estudiadas a profundidad, por lo que no existe ninguna metodología establecida a escala detallada, a pesar que es un fenómeno muy recurrente. En el presente estudio, se evaluó la amenaza con base en los parámetros e insumos que establece y requiere el programa Flo 2D, para simular este tipo de fenómenos, así mismo se toma la clasificación de flujos torrenciales que se determinan en el mismo.

Se realizó la descripción y análisis de cada una de las características físicas y morfológicas de cuenca, para tener como resultado los insumos básicos que requiere el modelo Flo 2d, en este sentido se tuvo en cuenta las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas para determinar la cantidad de material sólido que se puede depositar en el cauce. Se elaboró un modelo hidrológico para determinar los caudales a tiempos de retorno de 2, 25 y 50 años, no considerando las curvas IDF brindadas por el IDEAM debido a la obtención de un mejor ajuste a través de otra función de distribución, la cual garantizo una mayor precisión al modelo. De este modo se planteó una tormenta de diseño de dos horas con una discretización temporal de 5 minutos, se calculó el Numero de Curva (CN) que permite conocer el potencial de escorrentía de las coberturas y el grupo hidrológico del suelo de la microcuenca, se determinó el coeficiente

de rugosidad (Manning) y finalmente se realizó un levantamiento topográfico de 0.5 Km de longitud del cual se obtuvo un DEM de 1x1.

El parámetro hidrológico número de curva (CN) representa el efecto de las condiciones del territorio sobre la hidrología superficial de una cuenca. El uso de las tablas del NC permitió transformar información cualitativa sobre el tipo de cobertura y el grupo hidrológico de suelo, en información cuantitativa, demostrando así, el comportamiento de la escorrentía, de esta forma, el resultado puede aplicarse como un indicador de impacto ambiental en el área de estudio. En la microcuenca El Rollo se registra en promedio, un valor de alto potencial de escorrentía en la mayor parte del área, lo cual indica que las condiciones físicas de la microcuenca como la densidad de coberturas, tratamiento y uso de la tierra y grupo hidrológico de suelo tienden a favorecer la escorrentía sobre la capacidad de infiltración y por ende mayor probabilidad de degradación de la capa superficial del suelo.

Se estableció dos escenarios para determinar la amenaza por avenidas torrenciales en la quebrada El Rollo, el primer escenario se elabora con los datos del hidrograma de las áreas 1 y 2 y la concentración en volumen calculada para cada tiempo de retorno, en este escenario el tirante están entre 3 y 5 metros que corresponden a la zona de amenaza alta y hasta 1.3 que corresponde a las zonas de amenaza media y baja.

En el segundo escenario propuesto se toma el hidrograma total de la microcuenca y la concentración en volumen calculada para cada tiempo de retorno, dando como resultado tirantes de 3.4 a 6 metros que corresponden a la zona de amenaza alta y hasta 1.5 metros que corresponde a las zonas de amenaza media y baja.

Cabe aclarar que para elaborar el modelo en flo 2D el levantamiento topográfico fue limitado a cierta área, y por tanto las manchas de inundación o de llegada del flujo también están limitadas a dicha topografía y no es posible conocer cómo se comporta el flujo fuera de esta área.

Como se ha mencionado anteriormente en el presente documento las avenidas torrenciales tienen un gran potencial destructivo y son un fenómeno amenazante de rápida acción y por tanto son casi impredecibles, en el caso de la Quebrada El Rollo este fenómeno afecta directamente al casco urbano y la bocatoma que suministra agua al municipio, por lo tanto, el fin de este estudio es que se tomen las medidas de prevención del riesgo y manejo del desastre. De acuerdo a lo anterior se recomienda al municipio de San Bernardo en primera instancia actualizar el Esquema de Ordenamiento Territorial, donde se deberá incluir el componente de Gestión del Riesgo de acuerdo al Decreto único reglamentario 1077 de 2015 atulo 2 Sección 3, que dicta la incorporación de este componente dentro de la planificación territorial.

Se sugiere de igual manera tener en cuenta los resultados del presente estudio dentro del Plan Municipal de gestión del riesgo y de la estrategia municipal para la respuesta a emergencias (Sistemas de alerta temprana, evacuación a zonas seguras), teniendo en cuenta las zonas de inundación definidas y las áreas donde puede llegar el flujo y afectar directamente a la comunidad, esto con el objeto de salvaguardar las vidas y evitar un desastre.

Se recomienda realizar dragados en la Quebrada El Rollo antes de las temporadas de lluvia en los periodos comprendidos en Abril y Octubre, esto con el fin de evitar represamientos y así incrementar la capacidad de transporte de agua. Es importante tener en cuenta que el material que se extrae de la quebrada solo puede ser utilizado para mejoramiento de vías terciarias, no podrá ser comercializado o utilizados para otros fines, y así mismo se debe realizar bajo la normatividad del Decreto – Ley 2811 de 1974 que tiene como finalidad la reglamentación de las aguas, ocupación de los cauces y la declaración de reservas de agotamiento, asegurando la preservación cuantitativa para garantizar la permanencia del recurso, que en caso de emergencia por situaciones de amenazas naturales no necesitaría el permiso inmediato de ocupación de cauce, sin embargo se deberá legalizar ante la corporación una vez pase la declaratoria de emergencia. También se debe tener en cuenta el Decreto 1541 de 1978 y la Ley 99 de 1993 los cuales se encargan de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, es decir que este tipo de actividad no debe afectar el medio ambiente ni los recursos naturales.

Se debe realizar un diagnóstico de la población y viviendas que se encuentren expuestos a la ocurrencia de fenómenos amenazantes como avenidas torrenciales, esto para realizar procesos y jornadas de educación a la comunidad, con el fin que conozcan los riesgos naturales a los que se encuentra expuestos para mejorar las capacidades locales de evacuación ante posibles emergencias, calamidades o desastres que se puedan presentar en la zona.

Se recomienda disminuir la presión antropogénica sobre las coberturas boscosas existentes en la microcuenca sobre todo en la parte alta y media. Así mismo se recomienda realizar actividades de reforestación en las áreas desprovistas de coberturas forestales, con el fin de crear un efecto protector sobre el suelo, considerando que la vegetación retarda el flujo del agua sobre el terreno mediante las abstracciones que hace la estructura área de las plantas, esto contribuye a reducir los niveles de escorrentía directa en época de lluvias fuertes.

Se recomienda a planeación Municipal de San Bernardo, restringir el uso del suelo en cuanto a proyectos de infraestructura y vivienda en el área de influencia de los cuerpos

de agua, teniendo en cuenta la vulnerabilidad presente en la zona a los deslizamientos y posibles avenidas torrenciales. Además, no se recomienda hacia las partes altas de la quebrada dar uso de actividades agropecuarias, debido que este es un factor que acelera los procesos erosivos.

OBRAA.....