UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

URGENCIAS MANIFIESTAS DE MEDELLÍN: ESTUDIOS HIDROLÓGICOS, HIDRÁULICOS Y DE SOCAVACIÓN

Autor
Oscar Mauricio Gómez Villegas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2019

BY NC ND

Urgencias Manifiestas de Medellín: Estudios hidrológicos, hidráulicos y de socavación

Nombres y apellidos completos del autor:

Oscar Mauricio Gómez Villegas

Informe de práctica o monografía o investigación o tesis o trabajo de grado
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil.

Asesores (a) o Director(a) o Co- Directores(a).

Nelsy Lorena Tovar Suarez – Ingeniera Sanitaria y Ambiental
Álvaro Wills Toro – Ingeniero Civil

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2019.

URGENCIAS MANIFIESTAS DE MEDELLÍN: ESTUDIOS HIDROLÓGICOS, HIDRÁULICOS Y DE SOCAVACIÓN

1 Resumen

De acuerdo al marco de las Urgencias Manifiestas de Medellín se realizó un diagnóstico y reconocimiento de las condiciones actuales y posibles detonantes de fallas para los 19 sitios en estudio, con el fin de brindar la solución más óptima de acuerdo a los problemas evidenciados, ya sean deslizamientos, pérdidas de bancas, hundimientos de vías o socavación en las márgenes de los cauces asociados, que pongan en riesgo la vida de las personas que viven cerca o transitan diariamente por dichos lugares.

A partir de esto, se realizó un estudio hidrológico e hidráulico de la zona, en donde se identificaron y caracterizaron las áreas de aporte que tienen influencia; y posteriormente a partir de los registros de las estaciones hidrometeorológicas cercanas al área del proyecto se estimaron los caudales de crecientes asociados a diferentes periodos de retorno representativos (2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años); finalmente, se propuso las obras hidráulicas más adecuadas para dar solución a las problemáticas identificadas.

Este informe incluye los diagnósticos, estudios hidrológicos e hidráulicos para los sitios La Suiza, Guayabal y Prados de la Colina, contemplados en las Urgencias Manifiestas de Medellín. Se realizó un adecuado manejo de las aguas de escorrentía superficial y descarga a cauces asociados o alcantarillado existente; garantizando así la correcta captación conducción y evacuación de los flujos de escorrentía superficial, evitando que en la zona afectada posteriormente ocurra un nuevo deslizamiento que afecte la estabilidad de las obras y la vía existente, según sea el caso.

2 Introducción

La empresa Hídrycas S.A.S es una organización cuyo objetivo principal es el ejercicio de las ingenierías Civil, Sanitaria y Ambiental; la cual desarrolla actividades en proyectos de consultoría, interventoría, construcción y comercialización, brindando servicios especializados de calidad y soluciones innovadoras, bajo el concepto de desarrollo sostenible, respetando las comunidades, el medio ambiente y las leyes vigentes [1].

En el marco de las Urgencias Manifiestas de Medellín, las cuales son prestaciones de servicios o ejecución de obras en un futuro inmediato, y que

contemplan hechos de calamidad doméstica, constitutivos de fuerza mayor o desastres que demanden actuaciones inmediatas [2], la empresa Hidrycas actualmente es la encargada de brindar soluciones en el componente hidrológico e hidráulico a 19 sitios los cuales se encuentran en estudio. Éstos presentan deslizamientos, pérdidas de bancas, hundimientos de vías o socavación en las márgenes de los cauces que ponen en riesgo la vida de las personas que viven cerca o transitan diariamente por dichos lugares. Es por esto que se requiere brindar una solución y adecuado manejo de las aguas de escorrentía superficial o cauces asociados para controlar dichas problemáticas.

A partir de visitas de campo, información primaria y secundaria, se realiza un análisis hidrológico de la zona de estudio, y de acuerdo a los caudales de diseño se proponen obras hidráulicas que funcionen de la manera más adecuada para controlar y solucionar las problemáticas que se presentan en los sitios de estudios.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar un estudio hidrológico e hidráulico en los sitios afectados y presentes en el marco de la Urgencias Manifiestas de Medellín, que permitan definir las obras de drenaje requeridas para un adecuado manejo de las aguas superficiales que llegan en la actualidad a la zona afectada.

3.2 Objetivos Específico

- Realizar un estudio hidrológico que permita definir el estimativo de caudales de crecientes asociadas a diferentes periodos de retorno que aportan las áreas aferentes o cuenca para el adecuado manejo de aguas de escorrentía superficial, con base en la información de registros disponibles de las estaciones hidrometeorológicas existentes en el área del proyecto.

- Evaluar las condiciones hidráulicas de las obras existentes en las zonas aledañas al sitio afectado y las obras a proponer para el correcto manejo de las aguas superficiales.

- Realizar el dimensionamiento hidráulico de las secciones transversales que deben tener las estructuras propuestas para conducir las aguas generadas durante la ocurrencia de las crecientes de diseño.

- Trazar el alineamiento en planta y perfil de acuerdo con las condiciones topográficas del terreno y la infraestructura existente en la zona, presentando los planos constructivos de las obras planteadas.
- Realizar un estudio detallado en hidrología e hidráulica para los sitios Guayabal, Prados de la Colina y La Suiza.

4 Marco Teórico

- **Hidrología:** La hidrología es una rama de la geofísica que se preocupa por estudiar el origen, distribución, movimiento, propiedades e influencia del agua en la tierra. La Hidrología como ciencia de la Ingeniería incluye aquellos aspectos cuantitativos de la Hidrología, que tienen relación con la planificación, diseño y operación de obras de Ingeniería y ciencias afines, para el uso de control del agua. [3]

- **Hidráulica:** Es la parte de la mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los fluidos con aplicación a los problemas de naturaleza practica (conducciones, abastecimientos, riegos, saneamientos, etc.). [4]

- **Cuenca:** La cuenca es una zona de la superficie en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas hacia un mismo punto de salida. [5]

- **Área de drenaje:** Es probablemente la característica geomorfológica más importante para el diseño. Es la superficie, en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de las aguas, la cual es una línea imaginaria que pasa por lo puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenta de estudio de otras cuencas vecinas. [5]

- **Forma de la cuenca:** Dos cuencas que tengan la misma área, podrán tener respuestas hidrológicas completamente diferentes en función de su forma, ya que ésta condicionará el tiempo de concentración. Los parámetros que miden la forma de la cuenca son el índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc) y el factor de forma (Kf). [5]

- **Longitud de la cuenca:** Está definida como la distancia horizontal del rio principal entre un punto aguas abajo (estación aforo) y otro punto aguas arriba. [6]

- **Perímetro de la cuenca:** También llamado longitud de la línea de divorcio de la hoya es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca. [6]

- **Ancho de la cuenca:** Es la relación entre el área y la longitud de la cuenca. [6]

- **Precipitaciones:** Existen distintos tipos de precipitación: lluvia, nieve, granizo y nevisca. La precipitación requiere la elevación de una masa aire húmedo en la atmósfera, de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los mecanismos de elevación pueden ser: elevación frontal, elevación orográfica, elevación convectiva. [5]

- **Curvas Intensidad-Duración-Frecuenci**a: Las curvas I-D-F son curvas que relacionan la intensidad de la lluvia con su duración. Para cada frecuencia (periodo de retorno) tenemos una curva diferente, cuanto menor es la frecuencia del evento analizado, mayor es la intensidad. [5]

- **Tiempo de concentración:** Se define como el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la hoya contribuya al sitio de la obra de drenaje en consideración, o, en otras palabras, el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la hoya hasta llegar a la salida de la misma. [7]

- **Periodo de retorno:** Se define como periodo de retorno T de eventos hidrológicos máximos en obras de drenaje vial, el tiempo promedio, expresado en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado una vez. [7]

- **Coeficiente de rugosidad de Manning:** Seleccionar un valor de n significa estimar la resistencia al flujo de un canal determinado. Los factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning son: rugosidad superficial, vegetación, irregularidad del canal, alineamiento del canal, tamaño y forma del canal, sedimentación y socavación. [8]

- **Modelos lluvia- escorrentía:** Los modelos lluvia – escorrentía son utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en hoyas hidrográficas, y son modelos en los

cuales se calcula la escorrentía superficial. De esta manera, a través de datos históricos de lluvia de corta duración, existentes en la cuenca de interés y representativos de ella, aplicados a la hoya hidrográfica con características específicas geométricas, de suelos, vegetación, etc., se calcula el caudal máximo instantáneo de escorrentía superficial sobre la hoya [7]. Existen dos métodos para ello:

1) Método racional: Existe discrepancia entre los diferentes autores sobre el rango de aplicabilidad del método en relación con el área de drenaje de las hoyas. Valores entre 0.65 y 12.5 km2 han sido citados en la literatura técnica. La tendencia actual es usar 1.3 a 2.5 km2 como el límite superior para la aplicabilidad del método racional. En este Manual se deberá adoptar un área de drenaje máxima igual a 2.5 km2 para el uso de este método. [7]

2) Método del hidrograma de escorrentía superficial: Utilizado para áreas de drenaje mayores a 2.5 km2. Sherman, el autor de la metodología, lo propuso para áreas de drenaje de hasta 20 km2, pero es usual utilizarlo en hidrología para valores mayores. Cuando las áreas de drenaje en una cuenca son mayores a este valor, se aconseja subdividirla en subcuencas y aplicar metodologías computacionales (programas HEC-1 o HEC-HMS, por ejemplo) para tener en cuenta el hidrograma de creciente producido por cada una de las subcuencas y su tránsito a través del canal principal de la misma. [7]

- **Periodos de retorno para obras de drenaje vial:** En la Tabla 1 se presentan los periodos de retorno para obras viales estipulados en el Manual de Drenaje Para Carreteras (INVIAS).

Tabla 1. Periodos de retorno obras viales. Fuente: INVIAS

TIPO DE OBRA	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)
Cunetas	5
Zanjas de coronación	10
Estructuras de caída	10
Alcantarilla de 0.90 m de diámetro	10
Alcantarilla mayores a 0.90 m de diámetro	20
Puentes menores (luz menor a 10m)	25
Puentes de luz mayor o igual a 10m y menor a 50m	50
Puentes de luz mayor o igual a 50m	100
Drenje subsuperficial	2

- **Alcantarillado Transversal:** Alcantarilla ubicada de forma perpendicular a una vía y su principal función es drenar el agua, para evitar posibles inundaciones en el corredor vial. [9]

- **HY-8:** Programa de computación, dentro de su función realiza modelaciones hidráulicas de alcantarillas, es importante resaltar que está avalado por el Instituto Nacional de Vías para su utilización. [10]

- **Tailwater:** Hace referencia al agua localizada, inmediatamente aguas debajo de la alcantarilla. [10]

- **Headwater:** Hace referencia al nivel de agua, localizado aguas arriba de la alcantarilla. [10]

- **HEC-RAS:** Sus siglas significan Hydrologic Engineering Center- River Analysis System). El software es un modelo de tránsito gradualmente variado basado en el método estándar por pasos. El procedimiento básico de cálculo se fundamenta en la solución de la ecuación de energía, en la cual las pérdidas de energía por fricción se calculan mediante la ecuación de Manning y las pérdidas locales por contracción y expansión del flujo, se calculan como una fracción del cambio en la cabeza velocidad entre dos secciones. [11]

5 Metodología

Para la conformación del proyecto se llevaron a cabo algunos pasos que permitieron estructurar el contenido de la propuesta a lo largo de su desarrollo. Para poder brindar un buen diagnóstico y solución a las problemáticas evidenciadas en el marco de las Urgencias Manifiestas de la ciudad de Medellín, fue necesario realizar un reconocimiento de las zonas afectadas, para así identificar las condiciones actuales y variables existentes que pudieran influenciar en el resultado. Los sitios estudiados fueron 19, los cuales se nombran a continuación, sin embargo, en el desarrollo de este informe se describirán a detalle 3 de estos (Guayabal, Prados de la Colina y La Suiza). Los sitios estudiados fueron los siguientes:

- El Llano
- Golondrinas
- La 30
- El Cebollero km 14
- El Naranjal

- Guayabal
- La Escuela km 12
- La Florida
- Prados de la Colina
- Belencito Corazón
- La Frisola
- La Montañita km 10
- La Suiza
- Villa Turbay
- Barcino
- El Salvador
- Independencias
- Pesebre
- El Manzanillo

La información primaria se recopiló durante las visitas de campo, donde se observaron las condiciones actuales del sitio donde ocurrió la afectación y se tomaron registros fotográficos. Hace parte de esta información, el levantamiento de topografía detallada del sitio en estudio, brindado por el contratista.

En este informe se describirán los sitios La Suiza, Guayabal y Prados de la Colina. Los diagnósticos realizados a partir de las visitas de campo son los siguientes:

- **La Suiza:** Este sitio se encuentra ubicado en la vía hacia el acueducto multiveredal Palmitas La China, corregimiento de San Sebastián de Palmitas, municipio de Medellín. A partir de visitas de campo, se realizó un diagnóstico de las condiciones actuales del sitio, donde se presentó un deslizamiento y pérdida de banca de la vía. El sitio cuenta con una alcantarilla de diámetro 0.60m y cunetas a un costado de la vía, por lo cual se realizó una evaluación de las condiciones actuales y de acuerdo a los resultados se propuso nuevas soluciones que garanticen una adecuada captación, conducción y evacuación de la escorrentía superficial y del cauce de la quebrada La Frisola, la cual es conducida por la obra de drenaje transversal existente. También, fue necesario evaluar obras de protección en el cauce para evitar que se generen deslizamientos en las patas del talud que conforman las márgenes de la quebrada, ya que cuenta con problemas de erosión lateral. En la Fotografía 1, se muestra la zona de estudio.

Fotografía 1. Sitio La Suiza. Deslizamiento y pérdida de banca de la vía

- **Guayabal:** Este sitio se encuentra ubicado sobre la carrera 52 B con calle 11 A Sur, en el barrio Guayabal, ubicado en el municipio de Medellín. En este sitio se presentó un deslizamiento, el cual ocurrió debido a los eventos de fuertes lluvias que generaron un movimiento de material que afectó la vía. Se debe garantizar un adecuado manejo de aguas lluvias y evitar que se presente un deslizamiento que ponga en peligro la vida de las personas, afecte la estabilidad de las obras, las casas aledañas y la obstaculización de la vía existente en la parte inferior del talud, por lo tanto se deben recoger las aguas lluvias que se generan en la zona y entregarlas al alcantarillado pluvial existente, garantizando la captación, conducción y evacuación de la escorrentía superficial, para impedir que ésta continúe lavando el terreno. En la Fotografía 2, se muestra el deslizamiento de la zona de estudio.

Fotografía 2. Sitio Guayabal. Deslizamiento.

- **Prados de la Colina:** En el barrio Colinitas, calle 12 Sur con carrera 53, ubicado en el Municipio de Medellín se presentó un deslizamiento el cual tenía en peligro las casas aledañas al sitio de estudio. La iniciativa consistió en tratar la zona afectada por el deslizamiento y evitar que se presente un deslizamiento que ponga en peligro la vida de las personas, afecte la estabilidad de las obras, las casas aledañas y la obstaculización del andén existente en la parte inferior del talud, por lo tanto se deben recoger las aguas lluvias que se generan en la zona y entregarlas al MH pluvial existente, garantizando la captación, conducción y evacuación de la escorrentía superficial, para impedir que ésta continúe lavando el terreno. En la Fotografía 3, se muestra la zona de estudio.

Fotografía 3. Sitio Prados de la Colina. Deslizamiento.

A partir de información primaria y secundaria, se realizó una descripción general de la problemática y análisis de los parámetros morfométricos; para así tener un conocimiento del área, cotas superior e inferior, longitud y pendiente media del cauce principal, entre otras; de los sitios de estudio para generar una caracterización de las áreas de aporte. En la Figura 1 hasta la Figura 3 y en la Tabla 2 hasta Tabla 5, se muestra la cuenca y las áreas aferentes trazadas y los parámetros utilizados para el estudio.

Figura 1. Área aferente sitio Guayabal.

Tabla 2. Características morfométricos área en estudio. Sitio Guayabal.

Característica	Área aferente
Área aferente (km²)	0.0009
Cota superior del área (msnm)	1535.5
Cota inferior del área (msnm)	1518
Longitud del cauce principal hasta la divisoria (km)	0.06
Perímetro (km)	0.15
Pendiente promedio del cauce hasta la divisoria (%)	29.12

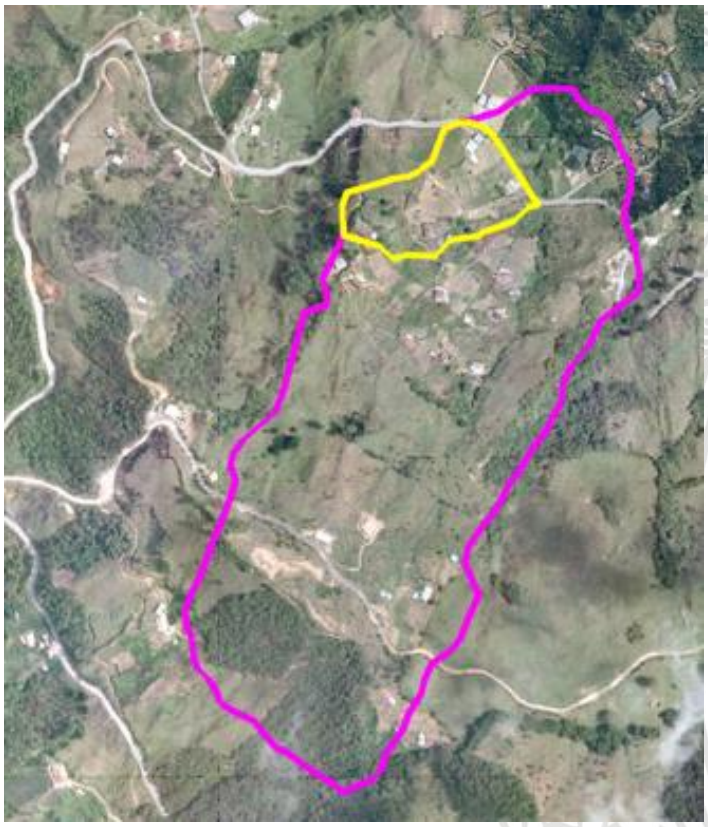


Figura 2. Área aferente y cuenca quebrada La Frisola. Sitio La Suiza.

Tabla 3. Características morfométricos área en estudio. Sitio La Suiza.

Característica	Área aferente
Área (km²)	0.0088
Cota superior (msnm)	2010
Cota inferior (msnm)	1955
Longitud del cauce principal hasta la divisoria (km)	0.15
Perímetro (km)	0.4
Pendiente promedio del cauce hasta la divisoria (%)	36.69

Tabla 4. Características morfométricos cuenca de la quebrada La Frisola en estudio. Sitio La Suiza

Característica	Cuenca
Área (km²)	0.0988
Cota superior de la cuenca (msnm)	2145
Cota superior del cauce (msnm)	2115
Cota inferior de la cuenca (msnm)	1930
Longitud del cauce principal hasta la divisoria (km)	0.61
Longitud del cauce principal (km)	0.56
Longitud de la cuenca (km)	0.55
Perímetro (km)	1.41
Pendiente promedio del cauce hasta la divisoria (%)	35.27 (Muy Fuerte)
Índice de compacidad (Kc)	1.26 (Oval redonda – Oval oblonga)
Factor de forma (Kf)	0.27 (Ligeramente larga)
Sinuosidad	1.10 (Rectilíneo)

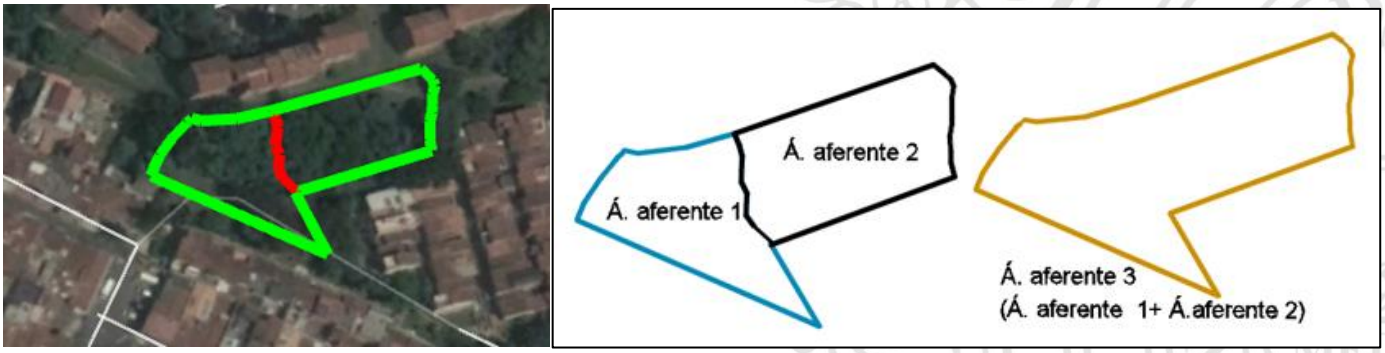


Figura 3. Áreas aferentes sitio Prados de la Colina.

Tabla 5. Características morfométricos áreas en estudio. Sitio Prados de la Colina.

Característica	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Área aferente (m²)	656.2	798.36	1514.13
Cota superior del área (msnm)	1540	1541	1541
Cota inferior del área (msnm)	1522	1530	1522
Longitud del cauce principal hasta la divisoria (km)	0.04	0.03	0.05
Perímetro (km)	0.12	0.12	0.2
Pendiente promedio del cauce hasta la divisoria (%)	48.08	38.85	39.02

La información secundaría se obtuvo de registros de lluvias de las estaciones cercanas a la zona, que son operadas por EPM, planchas cartográficas de Medellín en escalas 1:2000 y 1:5000, públicas en la página web de la alcaldía de Medellín, mapas del POT, mapas de red viales y usos de suelo, redes de acueducto y alcantarillado, imágenes de ortofotos y Google Earth.

Para los sitios descritos se utilizaron para el estudio hidrológico los datos de precipitación de las siguientes estaciones pertenecientes a EPM. Con el fin de realizar una descripción general de los regímenes de lluvias en las zonas de

interés, la ubicación y datos básicos de las estaciones se presentan en la Tabla 6, Figura 4 y Figura 5.

Tabla 6. Estaciones climatológicas utilizadas.
1 Tipo de estación: Pluviométrica
2. Sistemas de coordenadas planas con origen Magna Ant Medellín.

Sitio en estudio	Código	Nombre	Categoría[1]	Este[2]	Norte[2]	Municipio	Operada por	Fecha de operación
Guayabal	2701093	Ayurá	PVM	835380	1173830	Envigado	EPM	28/02/1972
Prados de la Colina	2701093	Ayurá	PVM	835380	1173830	Envigado	EPM	28/02/1972
La Suiza	2701046	San Cristóbal	PVM	827560	1186550	Medellín	EPM	22/08/1949

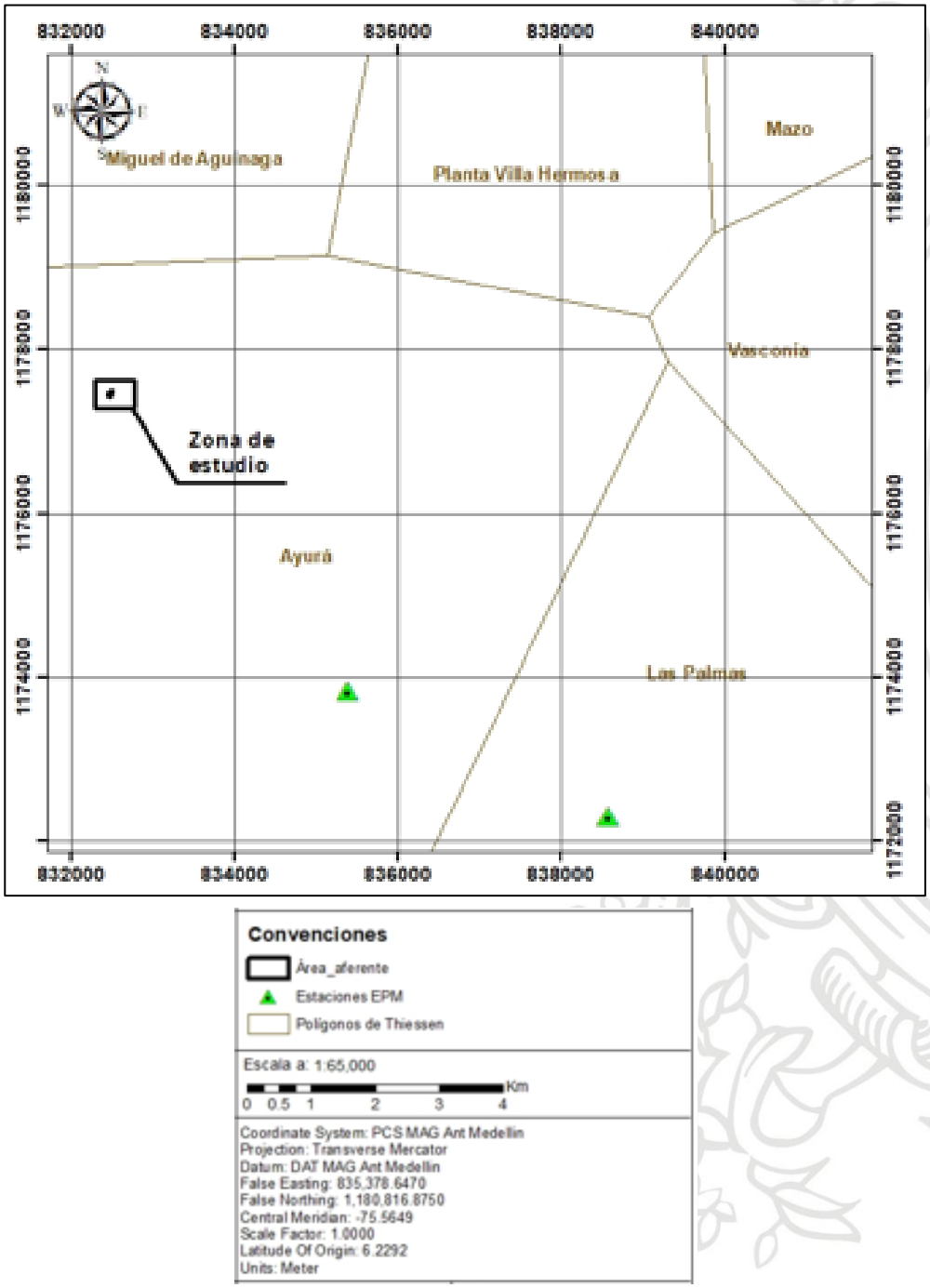


Figura 4. Mapa de polígonos de Thiessen. Ubicación de la estación de influencia Ayurá. Sitios Guayabal y Prados de la Colina.

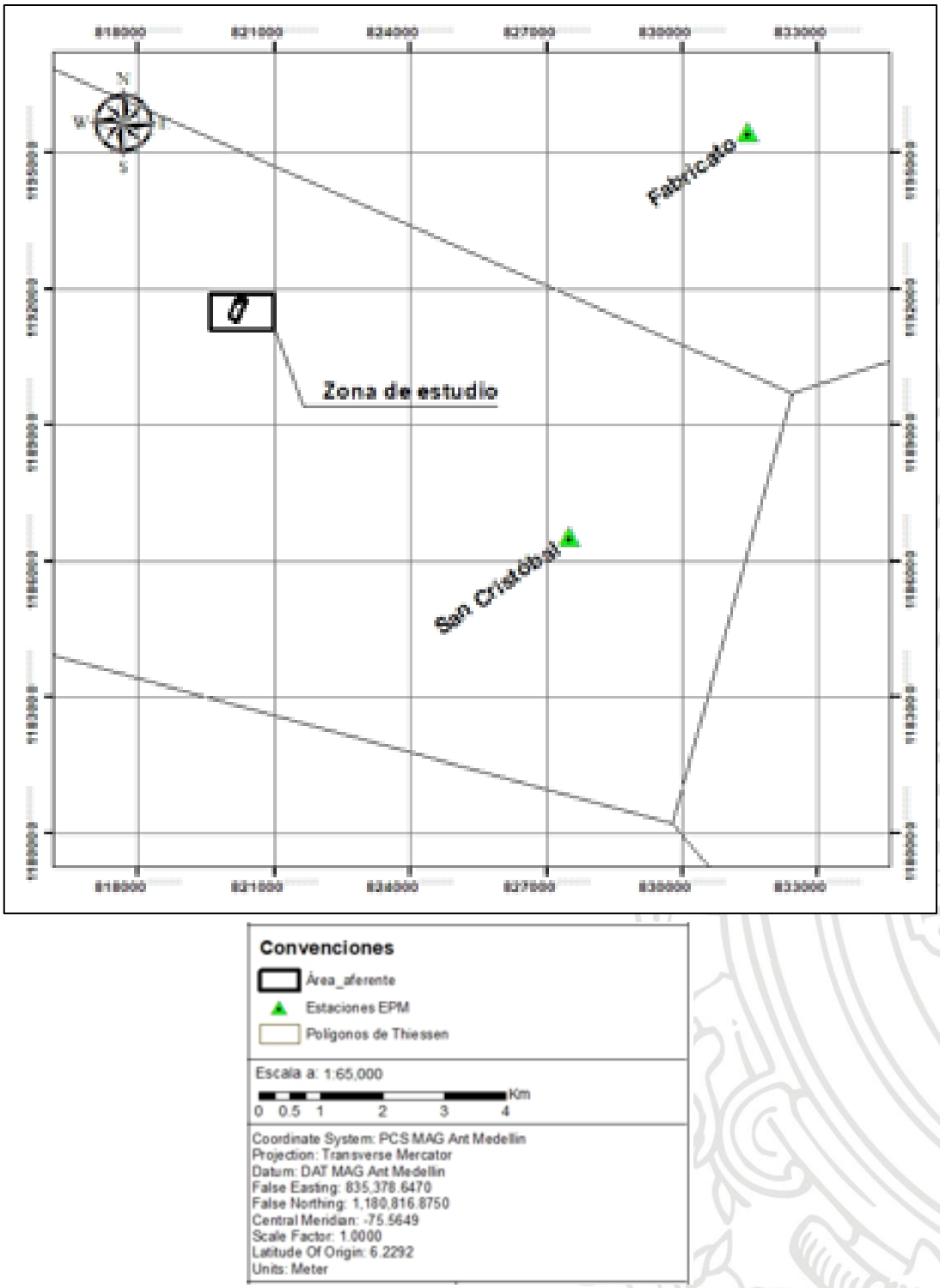


Figura 5 Mapa de polígonos de Thiessen. Ubicación de la estación de influencia San Cristóbal. Sitio La Suiza

De acuerdo a esto, se realizó un estudio hidrológico de las zonas de estudio, se revisó las estaciones hidrometeorológicas que correspondían a cada lugar afectado obteniendo los datos de precipitación de las estaciones que se veían involucradas en cada sitio para realizar una descripción general del régimen de lluvias, y así calcular el caudal de diseño para el periodo de

retorno asociado a la obra propuesta según el Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS.

De acuerdo con los registros de precipitaciones media mensual para las estaciones Ayurá y San Cristóbal las cuales son analizadas en este informe, se observa que en general la distribución de lluvias tiene un comportamiento bimodal. El primer ciclo presenta un período de precipitaciones relativamente bajas en los meses de enero, febrero y marzo, y de precipitaciones altas entre los meses de abril y mayo. El segundo ciclo, presenta un periodo de lluvias relativamente bajas entre los meses de junio, julio y agosto, a partir del mes de septiembre hasta noviembre se presenta un aumento de la precipitación, como se aprecia en la Figura 6 y en la Tabla7.

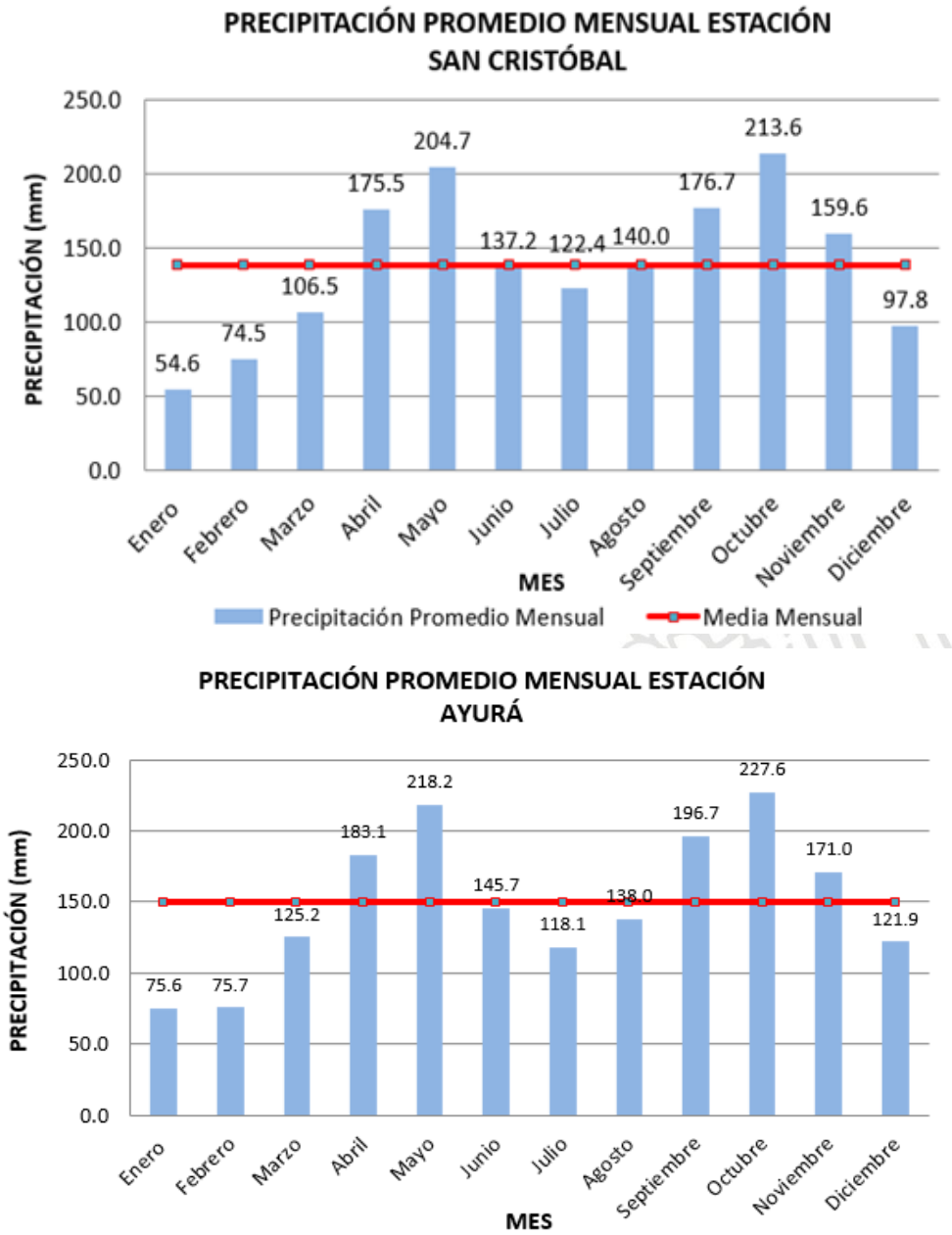
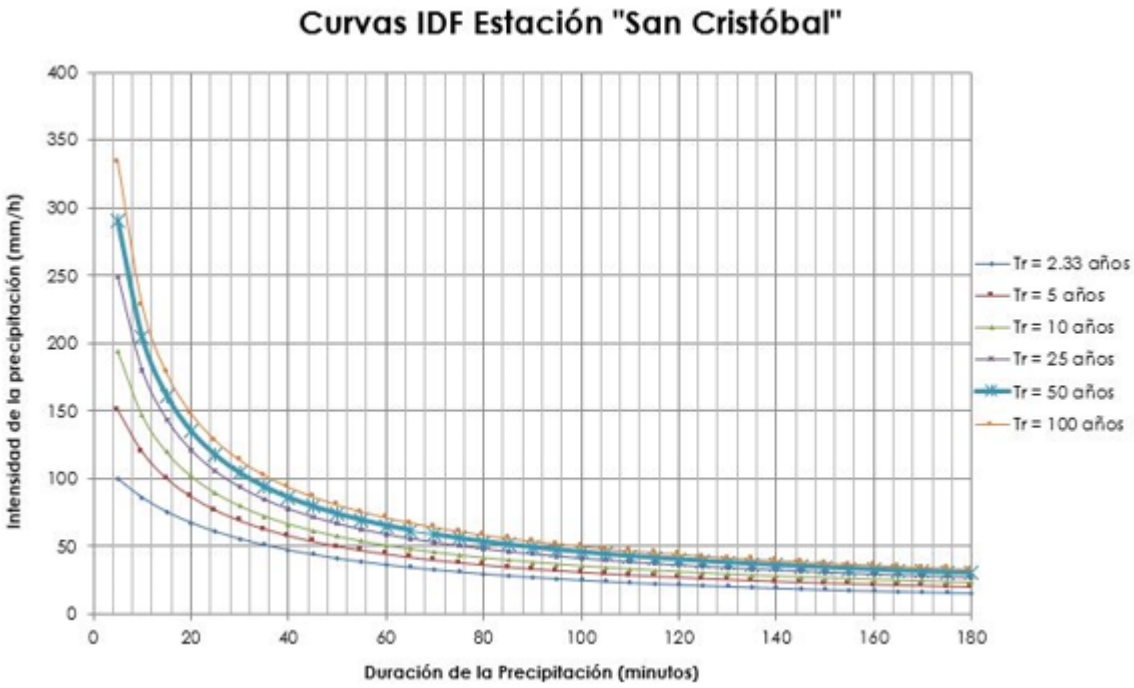


Figura 6. Distribución de la precipitación mensual para la estación San Cristóbal y Ayurá.

Tabla 7. Precipitación media mensual para las estaciones analizadas

Mes	Estación Ayurá	Mes	Estación San Cristóbal
	P(mm)		P(mm)
Enero	75.6	Enero	54.6
Febrero	75.7	Febrero	74.5
Marzo	125.2	Marzo	106.5
Abril	183.1	Abril	175.5
Mayo	218.2	Mayo	204.7
Junio	145.7	Junio	137.2
Julio	118.1	Julio	122.4
Agosto	138	Agosto	140
Septiembre	196.7	Septiembre	176.7
Octubre	227.6	Octubre	213.6
Noviembre	171	Noviembre	159.6
Diciembre	121.9	Diciembre	97.8
Anual	**1796.8**	Anual	**1663.1**

Las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) tienen la utilidad en la determinación de caudales pico, cuando se utilizan métodos que relacionan las precipitaciones con la escorrentía teniendo en cuentas las características fisiográficas de las cuencas. En la información de EPM (2005) se dispone de curvas IDF para la estación Ayurá y San Cristóbal, por lo tanto para la estimación de caudales de crecientes solo se emplearon estas curvas. En la Figura 7 se muestran las curvas obtenidas para las estaciones en estudio.



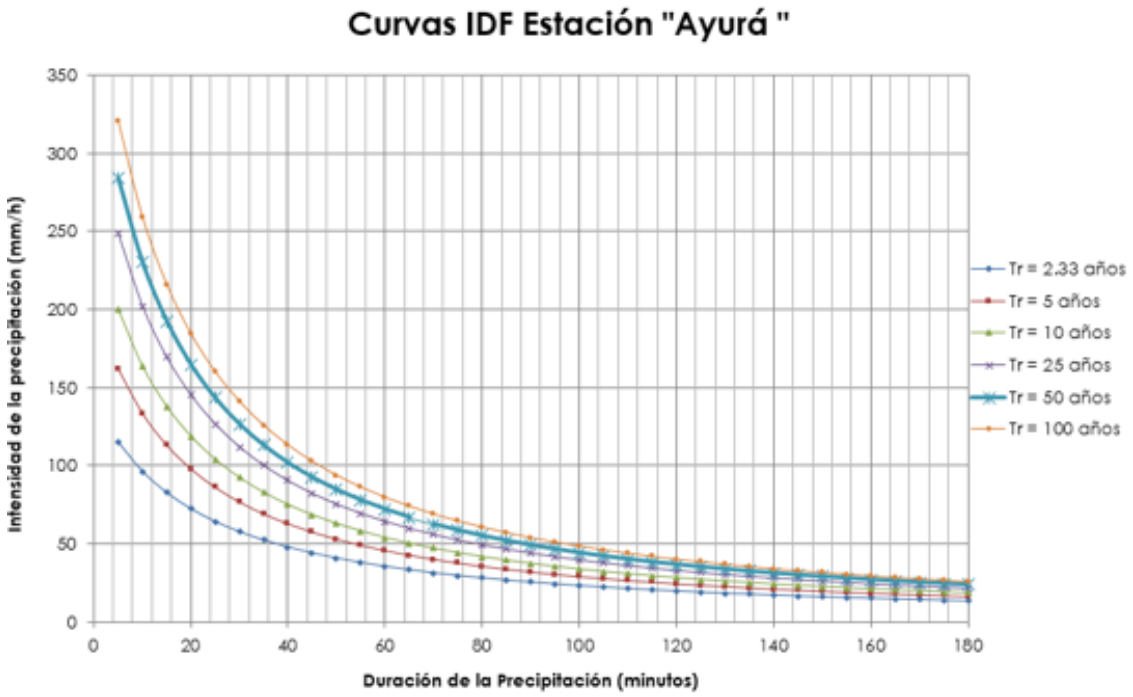


Figura 7. Curvas IDF de las estaciones en estudio

Se calculó el tiempo de concentración de las áreas de aporte de acuerdo a los métodos propuestos por el INVIAS y otras literaturas, estas ecuaciones corresponden para ciertas condiciones específicas de la zona en estudio y se relacionan con el clima y morfología de la zona. Es por esto que el equipo consultor decidió implementar varias fórmulas, las cuales se han utilizado en proyectos similares.

Para la selección del tiempo de concentración en las zonas de estudio, se determinó el límite inferior y superior teniendo en cuenta el promedio y la desviación estándar. El límite superior es la suma entre el promedio del tiempo y su desviación estándar mientras que el límite inferior es la resta entre ellos, todos los tiempos estimados que estén por debajo del límite inferior y los que estén por arriba del límite superior se excluyeron del promedio para la selección del tiempo de concentración; finalmente se escogió el tiempo del promedio de los valores que quedan. Está metodología se aplicó con el fin de acotar aquellos resultados que presentan la misma tendencia y orden de magnitud. En la Tabla 8 a la Tabla 10, se presentan la evaluación y resultados de los tiempos de concentración para las áreas de aporte en estudio. En aquellos casos donde el tiempo de concentración es menor a 5 minutos, se tomó como criterio de diseño utilizar un valor de 5 minutos, ya que tiempos de concentración menores se ven reflejados en intensidades muy altas que poco se ajustan a la realidad.

Tabla 8. Tiempo de concentración de las áreas de aporte. Sitio Prados de la Colina.

Métodos	Área aferente 1		Área aferente 2		Área aferente 3	
	Minutos	horas	Minutos	horas	Minutos	horas
Kirpich (1990)	0.4	0.01	0.4	0.01	0.6	0.01
Témez	0.7	0.01	0.6	0.01	0.9	0.02
Giandiotti	2.9	0.05	3.5	0.06	3.9	0.07
U.S. Corps of Engineers	1.6	0.03	1.3	0.02	2	0.03
Williams	1.1	0.02	0.8	0.01	1.4	0.02
Ven Te Chow	2.5	0.04	2.3	0.04	3.2	0.05
Promedio	1.5	0.03	1.5	0.02	2	0.03
Desviación Estándar	1	0.02	1.2	0.02	1.3	0.02
Límite inferior	0.5	0.01	0.3	0	0.7	0.01
Límite Superior	2.5	0.04	2.7	0.04	3.3	0.06
Selección (min)	5	0.08	5	0.08	5	0.08

Tabla 9. Tiempo de concentración de las áreas de aporte. Sitio Guayabal

Métodos	Área aferente	
	Minutos	horas
Kirpich (1990)	0.7	0.01
Témez	1.1	0.02
Giandiotti	3.7	0.06
U.S. Corps of Engineers	2.5	0.04
Williams	1.9	0.03
Ven Te Chow	4	0.07
Promedio	2.3	0.04
Desviación Estándar	1.3	0.02
Límite inferior	1	0.02
Límite Superior	3.7	0.06
Selección (min)	5	0.08

Tabla 10. Tiempo de concentración de las áreas de aporte. Sitio La Suiza

Métodos	Área aferente		Cuenca	
	Minutos	horas	Minutos	horas
Kirpich (1990)	1.4	0.02	4.1	0.07
Témez	2.1	0.04	6.3	0.1
Giandiotti	6.1	0.1	11.1	0.19
U.S. Corps of Engineers	4.8	0.08	14.1	0.23
Williams	3.6	0.06	11.5	0.19
Ven Te Chow	6.7	0.11	16.7	0.28
Promedio	4.1	0.07	10.6	0.18
Desviación Estándar	2.1	0.04	4.7	0.08
Límite inferior	2	0.03	5.9	0.1
Límite Superior	6.2	0.1	15.3	0.26
Selección (min)	5	0.08	10.6	0.18

De acuerdo al tiempo de concentración obtenido para cada zona se analizaron las curvas IDF y se leyó la intensidad de la lluvia que se asocia a cada periodo de retorno analizado, y luego se procedió al cálculo de caudales donde se utiliza el método racional debido al tamaño de las áreas en estudio. A partir de esto se procedió al diseño de las obras hidráulicas necesarias. Dichas intensidades se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Intensidades sitios de estudio (mm/h)

Tr (años) - Prados de la Colina						
Áreas aferentes 1-2-3	2.3	5	10	25	50	100
	114.9	162.1	200.2	248.6	284.5	320.2

Tr (años) - Guayabal						
Área aferente	2.3	5	10	25	50	100
	114.9	162.1	200.2	248.6	284.5	320.2

Tr (años) - La Suiza						
Punto en estudio	2.3	5	10	25	50	100
Área aferente	99.6	150.9	194.4	249	290.5	334.3
Cuenca	84.6	117.1	142.7	174.6	197.8	220.4

La duración de la tormenta de diseño en las áreas aferentes de interés se consideró igual al tiempo de concentración, ya que se ha observado que esta duración tiende a ser más crítica para la generación de la creciente, debido a que toda la escorrentía producida en la cuenca alcanza a sumarse en el punto de interés, por lo que teóricamente, duraciones mayores no generarían un aumento del caudal pico de la hidrógrafa.

En la Tabla 12, se presentan las precipitaciones de diseño correspondientes a los tiempos de concentración, para cada uno de los períodos de retorno analizados en las zonas objeto de estudio.

Tabla 12. Precipitaciones sitios de estudio (mm)

Tr (años) - Prados de la Colina						
Áreas aferentes 1-2-3	2.3	5	10	25	50	100
	9.6	13.5	16.7	20.7	23.7	26.7

Tr (años) - Guayabal						
Área aferente	2.3	5	10	25	50	100
	9.6	13.5	16.7	20.7	23.7	26.7

Tr (años) - La Suiza						
Punto en estudio	2.3	5	10	25	50	100
Área aferente	8.3	12.6	16.2	20.7	24.2	27.9
Cuenca	14.9	20.7	25.2	30.8	35	38.9

Para el cálculo de los caudales de diseño se empleó el método racional ampliamente reconocido por su sencillez y validez en cuencas pequeñas, permite estimar el caudal máximo generado por una lluvia de intensidad constante distribuida homogéneamente en toda el área de la cuenca y con una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. La expresión más conocida es de la forma:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3.60}$$

Donde:
Q: Caudal máximo en m3/s
C: Coeficiente de escorrentía
i: Intensidad de la lluvia en mm/h
A: Área de la cuenca en km2

En la Tabla 13, se presentan los caudales seleccionados para cada periodo de retorno en los sitios de estudio.

Tabla 13. Caudales de diseño en los sitios de estudio. Obtenidos por el método racional Ven te Chow

Prados de la Colina						
Áreas aferentes	**$Q_{2.33}$ (L/s)**	**Q_5 (L/s)**	**Q_{10} (L/s)**	**Q_{25} (L/s)**	**Q_{50} (L/s)**	**Q_{100} (L/s)**
1	9.14	13.86	17.92	24.22	29.42	35.01
2	10.2	15.45	19.98	27.01	32.81	39.05
3	19.34	29.31	37.9	51.23	62.22	74.07

La Suiza						
Punto en estudio	**$Q_{2.33}$ (L/s)**	**Q_5 (L/s)**	**Q_{10} (L/s)**	**Q_{25} (L/s)**	**Q_{50} (L/s)**	**Q_{100} (L/s)**
Área aferente	94.75	154.52	208.6	291.41	361.21	440.14
Cuenca	904.74	1349.9	1722.4	2298.7	2768.1	3265.36

Guayabal						
Área aferente	**$Q_{2.33}$ (L/s)**	**Q_5 (L/s)**	**Q_{10} (L/s)**	**Q_{25} (L/s)**	**Q_{50} (L/s)**	**Q_{100} (L/s)**
	11.15	16.89	21.84	29.53	35.87	42.69

A partir de estos caudales de diseño, se dio un dimensionamiento para el adecuado funcionamiento de las obras, que cumplan con captar, conducir y entregar los flujos de escorrentía superficial de la mejor manera ya sea a un cauce o red de alcantarillado pluvial existente, evitando así que lleguen a la zona afectada.

6 Resultados y análisis

De acuerdo a los caudales de diseño obtenidos en el estudio hidrológico realizado a cada sitio en estudio, se procede a realizar un dimensionamiento y evaluación hidráulica a las obras propuestas para el drenaje de las reconformaciones del terreno donde se presentaron los deslizamientos.

Las evaluaciones hidráulicas realizadas a las soluciones planteadas se efectúan con el fin de verificar que las dimensiones propuestas de las obras cumplan con la capacidad hidráulica necesaria para realizar un adecuado manejo de acuerdo a los caudales de diseño hallados para los periodos de retorno establecidos por el INVIAS (ver Tabla 1).

En caso tal de que en el sitio se tuvieran obras hidráulicas existentes, se realizó una evaluación previa para verificar su adecuado funcionamiento. El sitio La Suiza contaba con una obra de drenaje trasversal de diámetro 60 cm, sin embargo, al realiza la modelación hidráulica en el programa HEC RAS se evidenció que esta no cumplía con la capacidad necesaria para drenar las crecientes correspondientes a un periodo de retorno de 100 años de la quebrada La Frisola, y lo cual fue un causante del deslizamiento ocurrido en dicho sitio. En la Figura 8, se muestra como es el comportamiento de los flujos de agua en dicha zona.

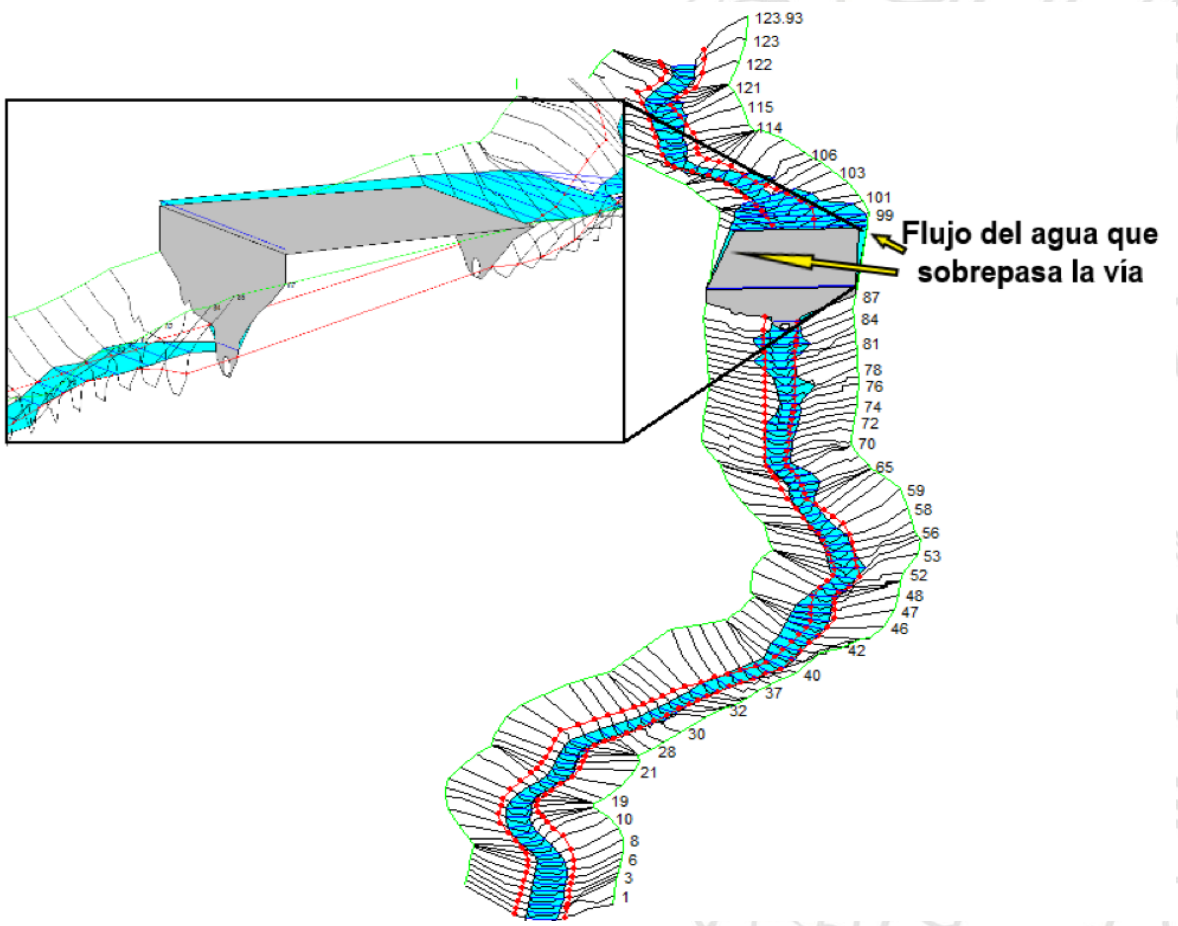


Figura 8. Esquema 3D modelación de la obra existente. Sitio La Suiza-quebrada La Frisola

6.1 Alternativas y soluciones planteadas

De acuerdo a las visitas de campo y análisis realizados a los comportamientos de los flujos de agua en cada uno de los sitios estudiados, se presenta a continuación las alternativas y soluciones planteadas para cada uno:

- **La Suiza: *"Obra de paso en la vía de acceso tipo box culvert, cuneta triangular y cárcamo"***

El planteamiento de esta alternativa consiste en proyectar una obra de cruce tipo "box culvert" de dimensiones 1.0mx1.5m, la cual presentaría una sección mínima, con el objetivo de facilitar el paso de la quebrada en la vía. La ventaja de esta obra es que se estaría evitando el cruce de agua sobre esta y por tal disminuyendo el deterioro de la misma; las dimensiones del box serían suficientes para conducir el caudal de la quebrada La Frisola que para este caso es de magnitud considerable.
También se realiza la implementación de una cuneta triangular y un cárcamo a lo largo de la margen derecha de la vía, con esto se estaría realizando una recolección de las aguas superficiales que llegan a la zona del fallo.
Esta solución incluye la protección al cauce de la quebrada La Frisola debido a los procesos de erosión lateral que vienen presentándose en esta. En la Figura 9 se presentan en planta las obras proyectadas.

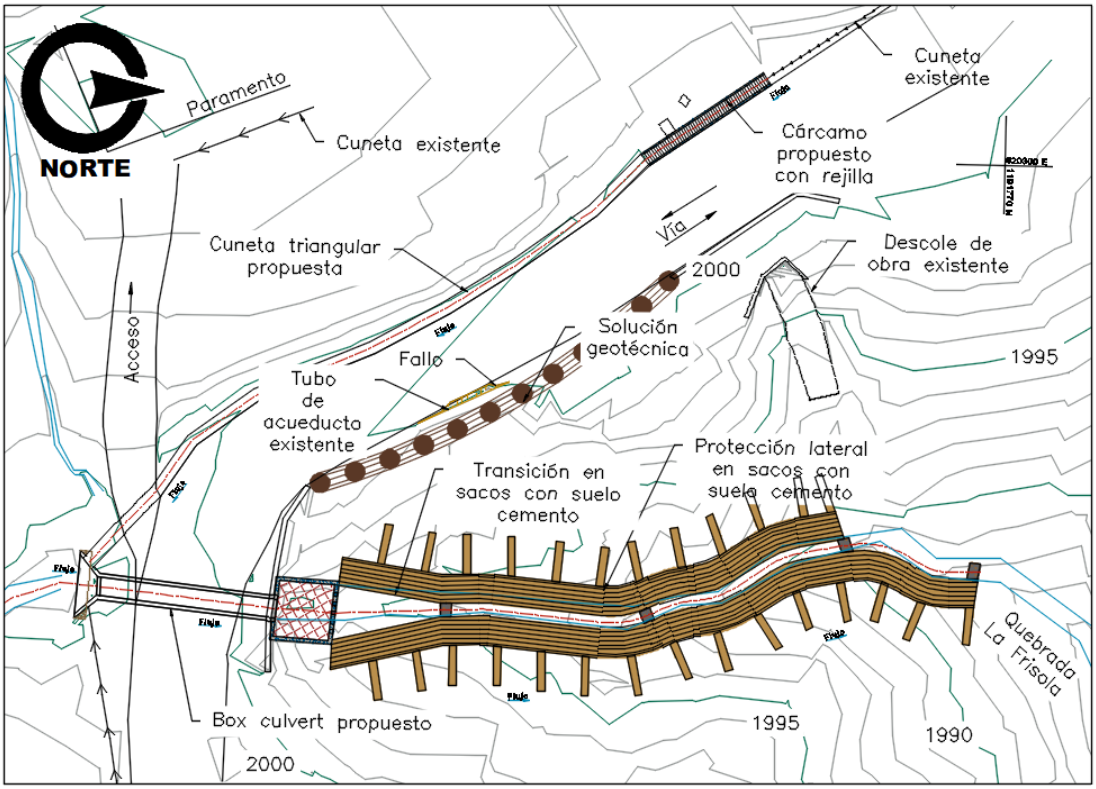


Figura 9. Obras proyectadas – Sitio La Suiza

- **Box culvert de 1.0m x 1.5m**

En esta obra se proyecta un box culvert de dimensiones 1.0m x 1.5m en reemplazo de la alcantarilla existente de Ø=0.60m, con el fin de que la totalidad del caudal de la quebrada La Frisola pase por este y siga su curso; a la obra de encole de este se proyectan unas aletas que reciban el flujo de una cuneta triangular propuesta en concreto de 0.70mx0.21m y la cuneta reconformada, la cual comienza desde punto alto y sobre la margen derecha de la vía en sentido hacia el túnel de occidente.

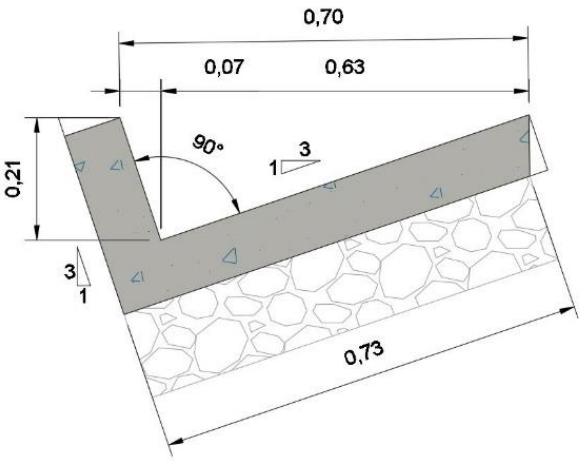


Figura 10. Detalle cuneta triangular

- **Prados de la Colina: "Sistema de drenaje con canal trapezoidal en sacos de suelo-cemento"**

En esta alternativa se proyecta la implementación de dos canales trapezoidales en sacos de suelo cemento ubicados en la parte alta del talud los cuales se unen con el objetivo de captar las aguas de escorrentía superficial que provengan de la parte superior de la ladera antes de que lleguen a la zona del deslizamiento y conducirlas por medio de una transición a otro canal trapezoidal en sacos de suelo cemento, éstos canales se conectan a una caja receptora la cual por medio de una tubería de PVC entrega sus aguas a un sumidero existente en la zona, el cual finalmente conducirá el flujo a un Manhole de aguas lluvias existente en la parte baja del talud.

Para esta alternativa hay que tener en cuenta de que se trata de canales, estos pueden verse más afectados por la caída de hojas y presentar taponamientos, por lo que se recomienda colocar una barrera viva a lo largo del canal que evite que esto suceda. En la Figura 11 se presentan en planta las obras proyectadas.

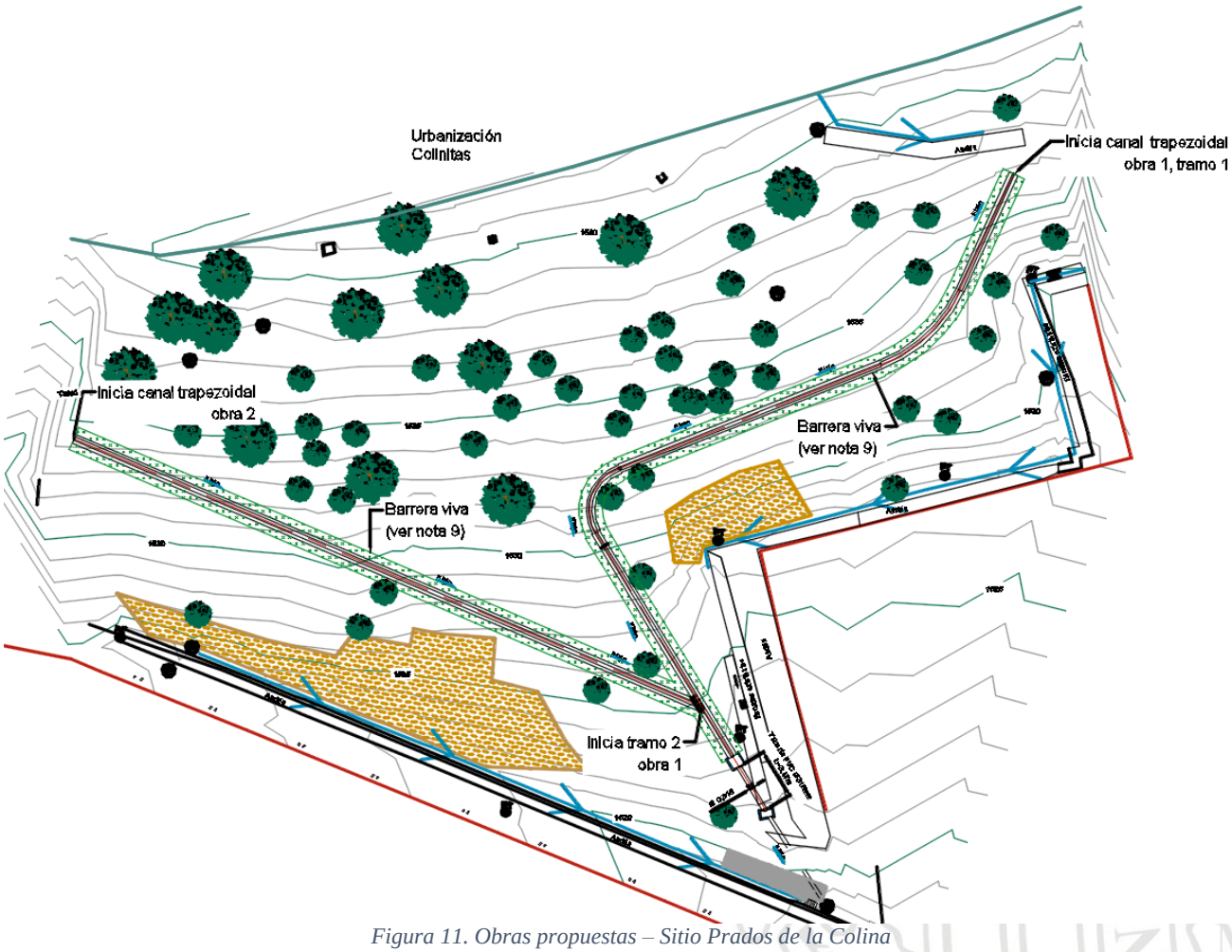


Figura 11. Obras propuestas – Sitio Prados de la Colina

- **OBRA 1**

- **Tramo 1 – Obra 1**

En esta obra se proyecta un canal trapezoidal en sacos de suelo-cemento de dimensiones 0.20m de base menor, 0.20m de altura y una inclinación lateral de 1:1, con el objetivo de interceptar el agua superficial que escurre ladera abajo, y así evitar el lavado de la superficie, este tramo es comprendido hasta el empalme con el otro canal trapezoidal en sacos de la obra 2.

- **Tramo 2 – Obra 1**

En este tramo se proyecta la continuación del canal trapezoidal en sacos de suelo-cemento de dimensiones 0.20m de base menor, 0.20m de altura y una inclinación lateral de 1:1, el cual conducirá el flujo de agua de escorrentía superficial de la ladera, éste conecta a una caja disipadora de 0.80mx0.80mx1.50m que se conecta mediante tubería de PVC de 315mm a un sumidero existente en la zona, que finalmente entrega sus aguas a un MH existente de aguas lluvias.

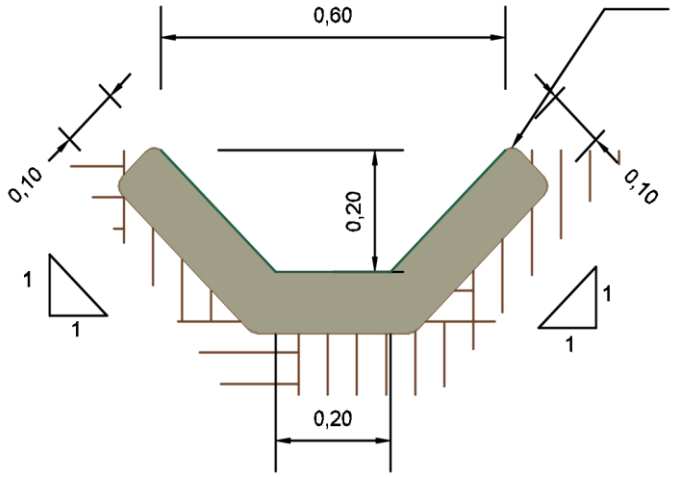


Figura 12. Sección transversal canal trapezoidal.

- **OBRA 2**

En esta obra se proyecta un canal trapezoidal en sacos de suelo-cemento de dimensiones 0.20m de base menor, 0.20m de altura y una inclinación lateral de 1:1, con el objetivo de interceptar el agua superficial que escurre ladera abajo, y así evitar el lavado de la superficie, esta obra conecta con el canal trapezoidal del tramo 1 de la obra 1.

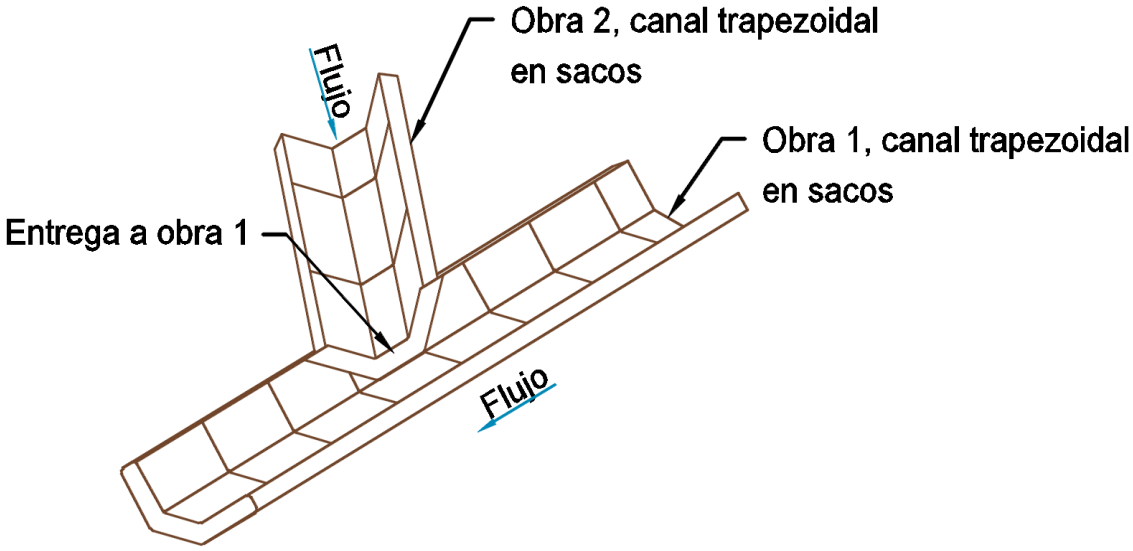


Figura 13. Empalme de canales trapezoidales.

- **Guayabal: "Sistema de drenaje con canal trapezoidal en sacos de suelo-cemento y canal escalonado en los taludes reconformados"**

En esta alternativa se proyecta la implementación de un canal trapezoidal en sacos de suelo cemento ubicado en la parte alta del talud con el objetivo de captar las aguas de escorrentía superficial que provengan de la parte superior de la ladera antes de que lleguen a la zona del deslizamiento y conducirlas

por medio de una transición a un canal escalonado en concreto el cual presenta una resistencia mayor al desgaste por la abrasión del perfil de flujo ante la ocurrencia de un evento de precipitación de intensidad considerable, éste canal escalonado llegaría una caja de cambio de dirección la cual se conecta con otro canal trapezoidal en sacos de suelo cemento, el cual entrega sus aguas a una caja de cambio de dirección, de la cual posteriormente el flujo se conducirá por tubería de PVC que entrega finalmente a un Manhole existente de aguas lluvias.

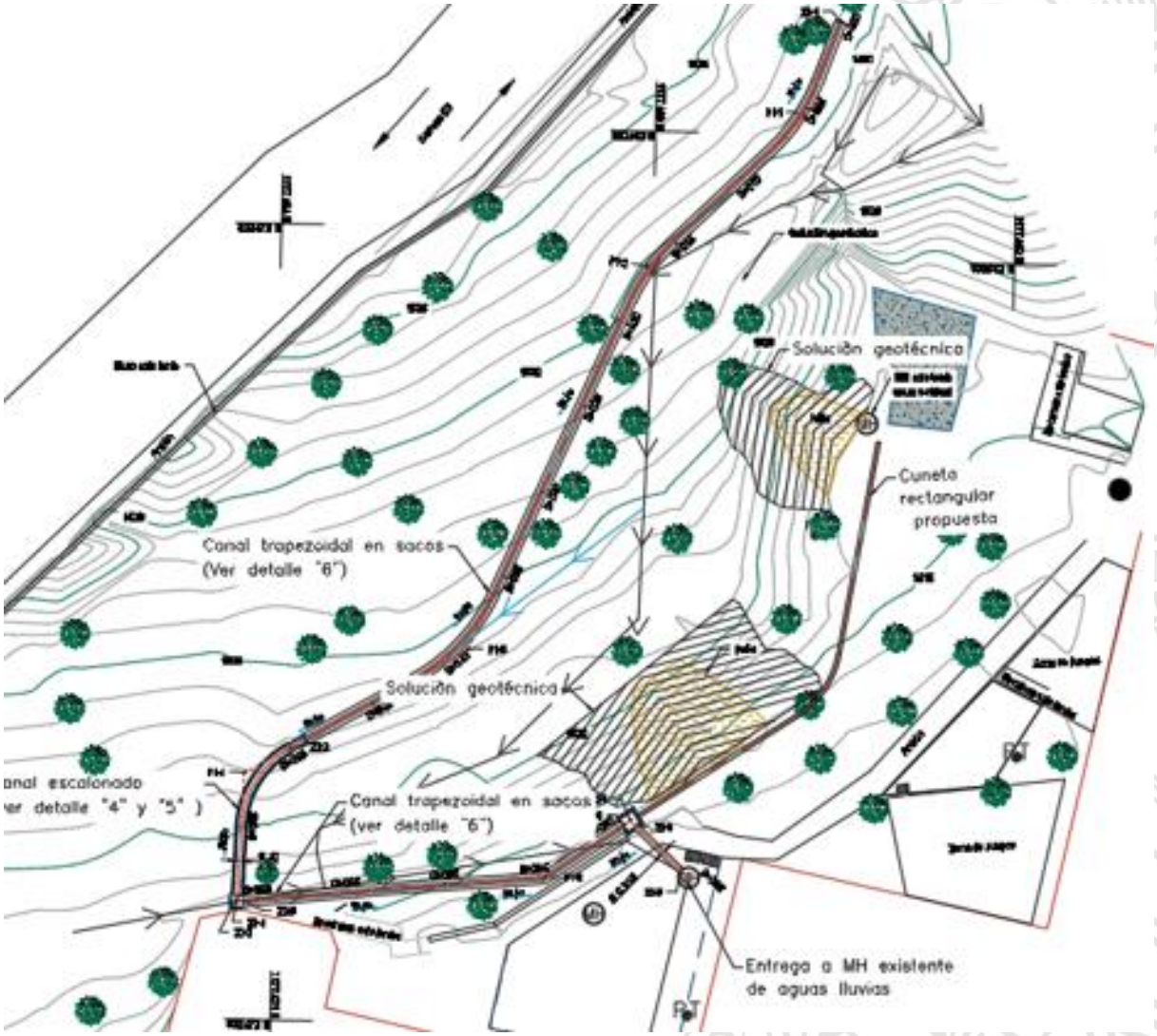


Figura 14. Obras propuestas – Sitio Guayabal.

- **Obra propuesta**

En esta obra se proyecta un canal trapezoidal en sacos de suelo-cemento de 0.20m de base menor, 0.20m de altura y una inclinación lateral de 1:1, con el objetivo de interceptar el agua superficial que escurre ladera abajo, y así evitar el lavado de la superficie, luego pasa a un canal escalonado en

concreto de 0.30m de contrahuella constante y de huella de 0.55m, , después pasa a una caja de cambio de dirección de 0.60mx0.60mx1.00m, que se conecta a otro canal trapezoidal en sacos de suelo cemento de 0.20m de base menor, 0.20m de altura y una inclinación lateral de 1:1. Para recoger las aguas de los drenes, colocado como solución geotécnica, se implementa una cuenta rectangular que recogerá dichas aguas, posteriormente el flujo llega a una caja receptora de 0.80mx0.80mx2.00m que se conecta mediante tubería de PVC de 315mm, la cual conduce las aguas recolectadas a un MH existente.

6.2 Resultados evaluaciones hidráulicas

Para las evaluaciones realizadas se utilizaron hojas de cálculo, el programa HY-8, el software HEC RAS y el Hidraflow Express, el cual es una extensión que presenta el programa AutoCAD Civil 3D.

- **Resultados de evaluación de obras sitio La Suiza:** En la Figura 15 y Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos para las obras propuestas del sitio La Suiza.

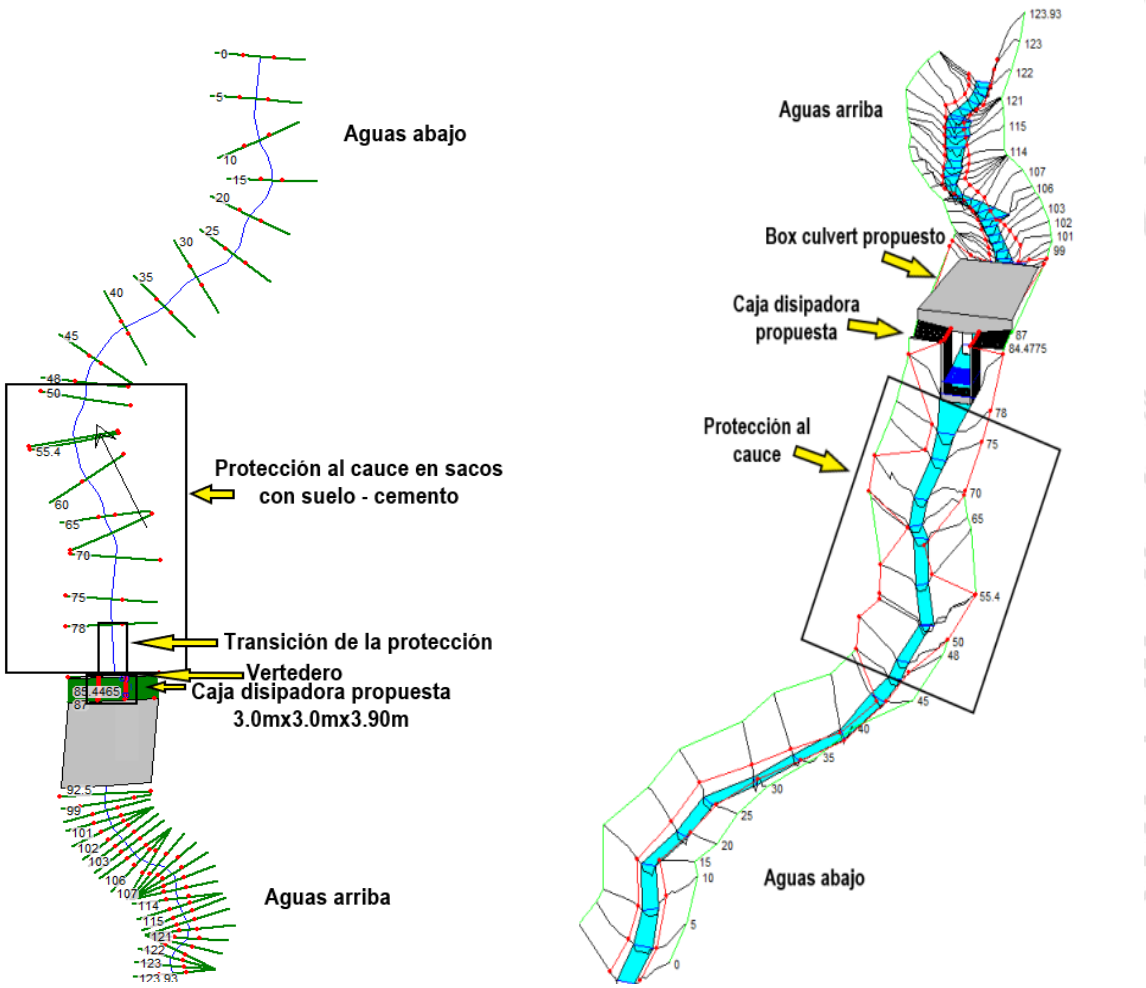


Figura 15. Planta y esquema 3D Modelación de obras propuesta cauce de la quebrada La Frisola-Sitio La Suiza

Tabla 14. Resultados obtenidos de la evaluación para la creciente de 100 años.

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Eje_Cauce_La_Sui	123.93	Tr 100	3.27	2003.86	2004.31	2004.67	2005.66	0.224154	5.16	0.63	1.68	2.68
Eje_Cauce_La_Sui	123	Tr 100	3.27	2003.64	2004.22	2004.57	2005.43	0.184721	4.87	0.67	1.53	2.35
Eje_Cauce_La_Sui	122	Tr 100	3.27	2003.42	2004.12	2004.46	2005.22	0.164433	4.65	0.70	1.54	2.20
Eje_Cauce_La_Sui	121	Tr 100	3.27	2003.14	2003.78	2004.14	2005.03	0.181068	4.96	0.66	1.53	2.41
Eje_Cauce_La_Sui	120	Tr 100	3.27	2002.85	2003.49	2003.86	2004.83	0.202446	5.15	0.64	1.58	2.59
Eje_Cauce_La_Sui	119	Tr 100	3.27	2002.57	2003.22	2003.63	2004.62	0.210030	5.25	0.62	1.51	2.61
Eje_Cauce_La_Sui	118	Tr 100	3.27	2002.36	2003.32	2003.58	2004.28	0.197151	4.45	0.78	2.71	2.31
Eje_Cauce_La_Sui	117	Tr 100	3.27	2002.30	2003.08	2003.37	2004.09	0.174483	4.49	0.75	2.41	2.37
Eje_Cauce_La_Sui	116	Tr 100	3.27	2002.23	2002.84	2003.12	2003.91	0.172679	4.61	0.72	2.49	2.56
Eje_Cauce_La_Sui	115	Tr 100	3.27	2001.76	2002.44	2002.76	2003.69	0.246310	4.95	0.66	2.07	2.79
Eje_Cauce_La_Sui	114	Tr 100	3.27	2001.28	2001.87	2002.28	2003.41	0.257345	5.49	0.60	1.47	2.75
Eje_Cauce_La_Sui	113	Tr 100	3.27	2001.24	2001.74	2002.09	2003.12	0.225942	5.21	0.63	1.99	2.92
Eje_Cauce_La_Sui	112	Tr 100	3.27	2000.86	2001.55	2001.90	2002.88	0.227673	5.11	0.64	1.69	2.65
Eje_Cauce_La_Sui	111	Tr 100	3.27	2000.47	2001.26	2001.72	2002.65	0.226820	5.22	0.63	1.20	2.30
Eje_Cauce_La_Sui	110	Tr 100	3.27	2000.20	2000.81	2001.31	2002.39	0.247032	5.56	0.59	1.24	2.58
Eje_Cauce_La_Sui	109	Tr 100	3.27	2000.03	2000.65	2001.05	2002.12	0.235164	5.37	0.61	1.40	2.60
Eje_Cauce_La_Sui	108	Tr 100	3.27	1999.87	2000.41	2000.77	2001.87	0.253964	5.35	0.61	1.82	2.94
Eje_Cauce_La_Sui	107	Tr 100	3.27	1999.67	2000.29	2000.61	2001.58	0.226703	5.13	0.66	2.17	2.79
Eje_Cauce_La_Sui	106	Tr 100	3.27	1999.46	2000.03	2000.29	2001.34	0.284033	5.29	0.68	3.24	3.06
Eje_Cauce_La_Sui	105	Tr 100	3.27	1999.27	1999.91	2000.25	2001.08	0.173331	4.79	0.68	1.54	2.29
Eje_Cauce_La_Sui	104	Tr 100	3.27	1999.06	1999.66	2000.03	2000.89	0.186061	4.91	0.67	1.47	2.33
Eje_Cauce_La_Sui	103	Tr 100	3.27	1998.83	1999.43	1999.81	2000.70	0.197541	4.98	0.66	1.42	2.34
Eje_Cauce_La_Sui	102	Tr 100	3.27	1998.63	1999.20	1999.56	2000.49	0.214775	5.03	0.65	1.49	2.43
Eje_Cauce_La_Sui	101	Tr 100	3.27	1998.45	1998.99	1999.33	2000.27	0.215108	5.02	0.65	1.72	2.61
Eje_Cauce_La_Sui	100	Tr 100	3.27	1998.27	1998.84	1999.15	2000.04	0.202905	4.86	0.67	1.94	2.64
Eje_Cauce_La_Sui	99	Tr 100	3.27	1998.18	1999.46	1998.96	1999.51	0.002509	0.95	3.44	4.61	0.35
Eje_Cauce_La_Sui	98	Tr 100	3.27	1997.72	1999.47	1998.68	1999.50	0.001290	0.72	4.55	5.29	0.25
Eje_Cauce_La_Sui	92.5		Culvert									
Eje_Cauce_La_Sui	87	Tr 100	3.27	1997.21	1997.89	1998.24	1999.06	0.107678	4.78	0.68	1.00	1.84
Eje_Cauce_La_Sui	86.9	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21	1995.34	1996.25	0.000901	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.8031	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000901	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.7062	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000901	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.6093	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000902	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.5124	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000902	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.4155	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000902	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.3186	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000902	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.2217	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000903	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.1248	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000903	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	86.0279	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000903	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.9310	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.25	0.000904	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.8341	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000904	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.7372	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000904	0.80	4.09	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.6403	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000904	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.5434	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000905	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.4465	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000905	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.3496	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000905	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.2527	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000906	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.1558	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000906	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	85.0589	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000906	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.9620	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000906	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.8651	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000907	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.7682	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000907	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.6713	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000907	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.5744	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000908	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.4775	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000908	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.3806	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000908	0.80	4.08	3.00	0.22

Tabla 14. Resultados obtenidos de la evaluación para la creciente de 100 años.

Eje_Cauce_La_Sui	84.2837	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21		1996.24	0.000908	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.1869	Tr 100	3.27	1994.85	1996.21	1995.34	1996.24	0.000909	0.80	4.08	3.00	0.22
Eje_Cauce_La_Sui	84.05		Inl Struct									
Eje_Cauce_La_Sui	84	Tr 100	3.27	1994.85	1995.32	1995.32	1995.54	0.012019	2.05	1.59	3.72	1.00
Eje_Cauce_La_Sui	78	Tr 100	3.27	1994.06	1994.83	1995.00	1995.39	0.032331	3.33	0.98	1.86	1.46
Eje_Cauce_La_Sui	75	Tr 100	3.27	1993.47	1994.08	1994.41	1995.19	0.080052	4.68	0.70	1.61	2.27
Eje_Cauce_La_Sui	70	Tr 100	3.27	1992.50	1993.03	1993.44	1994.64	0.130412	5.62	0.58	1.50	2.87
Eje_Cauce_La_Sui	67	Tr 100	3.27	1991.73	1992.23	1992.67	1994.16	0.167783	6.17	0.53	1.44	3.25
Eje_Cauce_La_Sui	65	Tr 100	3.27	1991.55	1992.08	1992.51	1993.83	0.118520	6.09	0.58	1.49	2.96
Eje_Cauce_La_Sui	60	Tr 100	3.27	1990.20	1990.66	1991.14	1992.99	0.214688	6.76	0.48	1.39	3.66
Eje_Cauce_La_Sui	55.4	Tr 100	3.27	1988.95	1989.40	1989.88	1991.92	0.240228	7.04	0.46	1.37	3.86
Eje_Cauce_La_Sui	55	Tr 100	3.27	1988.84	1989.49	1989.98	1991.76	0.206443	6.68	0.49	1.21	3.35
Eje_Cauce_La_Sui	50	Tr 100	3.27	1987.97	1988.50	1988.94	1990.71	0.206061	6.58	0.50	1.44	3.58
Eje_Cauce_La_Sui	48	Tr 100	3.27	1987.51	1988.00	1988.47	1990.26	0.234977	6.66	0.49	1.49	3.70
Eje_Cauce_La_Sui	45	Tr 100	3.27	1986.79	1987.30	1987.65	1989.29	0.376015	6.62	0.55	2.34	3.73
Eje_Cauce_La_Sui	40	Tr 100	3.27	1985.42	1985.98	1986.35	1987.65	0.256254	5.79	0.59	2.10	3.15
Eje_Cauce_La_Sui	35	Tr 100	3.27	1984.17	1984.76	1985.18	1986.35	0.255203	5.58	0.59	1.42	2.78
Eje_Cauce_La_Sui	30	Tr 100	3.27	1983.57	1984.14	1984.46	1985.23	0.152268	4.61	0.71	1.55	2.17
Eje_Cauce_La_Sui	25	Tr 100	3.27	1982.57	1983.14	1983.50	1984.35	0.195233	4.89	0.67	1.68	2.47
Eje_Cauce_La_Sui	20	Tr 100	3.27	1981.73	1982.31	1982.66	1983.44	0.163294	4.71	0.69	1.55	2.25
Eje_Cauce_La_Sui	15	Tr 100	3.27	1980.71	1981.43	1981.77	1982.58	0.180413	4.74	0.69	1.59	2.29
Eje_Cauce_La_Sui	10	Tr 100	3.27	1979.66	1980.11	1980.48	1981.53	0.230282	5.29	0.62	1.74	2.83
Eje_Cauce_La_Sui	5	Tr 100	3.27	1978.84	1979.30	1979.60	1980.39	0.190849	4.62	0.71	2.14	2.57
Eje_Cauce_La_Sui	0	Tr 100	3.27	1977.99	1978.52	1978.81	1979.50	0.155188	4.39	0.75	2.03	2.32

- **Resultados de evaluación de obras sitio Prados de la Colina:** En la Tabla 15, Tabla 16 y Figura 16 se presentan los resultados a las obras propuestas en el sitio Prados de la Colina.

Tabla 15. Resultados de caudales para canales propuestos.

Obra	Hidráulica															
	n				y		Altura Canal	Área	Perím. mojado	Radio hidco.	Ancho superf.	Pend.	Veloc.	Caudal	Caudal	Nro. De Froude
		b (m)	z1	z2	m	B (m)	m	m^2	m	m	m	m/m	m/s	m^3/s	L/s	
OBRA 1 - Tramo 1																
Canal 1	0.028	0.200	1.0	1.0	0.03	0.262	0.20	0.01	0.29	0.03	0.26	0.49	2.14	0.02	15.45	4.13
Canal 2	0.028	0.200	1.0	1.0	0.10	0.391	0.20	0.03	0.47	0.06	0.39	0.01	0.55	0.02	15.45	0.65
Canal 3	0.028	0.200	1.0	1.0	0.03	0.260	0.20	0.01	0.29	0.02	0.26	0.55	2.23	0.02	15.45	4.36
Canal 4	0.028	0.200	1.0	1.0	0.03	0.267	0.20	0.01	0.30	0.03	0.27	0.38	1.96	0.02	15.45	3.66
OBRA 1 - Tramo 2																
Canal 1	0.028	0.200	1.0	1.0	0.05	0.298	0.20	0.01	0.34	0.04	0.30	0.38	2.40	0.03	29.31	3.79
OBRA 2																
Canal 1	0.028	0.200	1.0	1.0	0.04	0.276	0.20	0.01	0.31	0.03	0.28	0.21	1.54	0.01	13.86	2.72
Canal 2	0.028	0.200	1.0	1.0	0.05	0.293	0.20	0.01	0.33	0.03	0.29	0.10	1.20	0.01	13.86	1.94
Canal 3	0.028	0.200	1.0	1.0	0.03	0.265	0.20	0.01	0.29	0.03	0.26	0.35	1.84	0.01	13.86	3.49
Canal 4	0.028	0.200	1.0	1.0	0.04	0.273	0.20	0.01	0.30	0.03	0.27	0.23	1.60	0.01	13.86	2.87
Canal 5	0.028	0.200	1.0	1.0	0.04	0.283	0.20	0.01	0.32	0.03	0.28	0.15	1.38	0.01	13.86	2.34

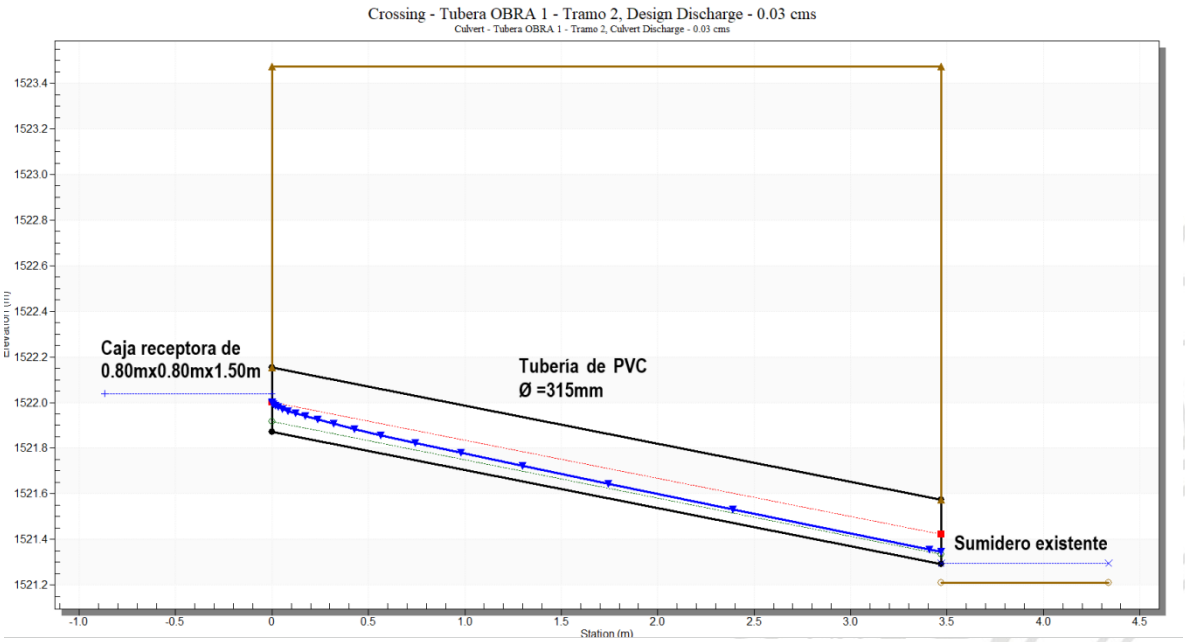


Figura 16. Modelación en el programa HY-8. Tubería OBRA 1-Tramo 2

Tabla 16. Resultados modelación en el programa HY-8. Tubería OBRA 1- Tramo 2

Total Discharge (cms)	Culvert Discharge (cms)	Headwater Elevation (m)	Inlet Control Depth(m)	Outlet Control Depth(m)	Flow Type	Normal Depth (m)	Critical Depth (m)	Outlet Depth (m)	Tailwater Depth (m)	Outlet Velocity (m/s)	Tailwater Velocity (m/s)
0.02	0.02	1522.00	**0.13**	0.0*	1-S2n	0.04	0.11	0.04	0.07	3.17	0.36
0.02	0.02	1522.02	**0.15**	0.0*	1-S2n	0.04	0.12	0.05	0.08	3.23	0.39
0.03	0.03	1522.04	**0.17**	0.0*	1-S2n	0.05	0.13	0.06	0.09	3.25	0.42
0.04	0.04	1522.06	**0.19**	0.0*	1-S2n	0.05	0.15	0.06	0.10	3.31	0.45
0.04	0.04	1522.09	**0.22**	0.0*	1-S2n	0.05	0.16	0.07	0.11	3.35	0.47
0.05	0.05	1522.10	**0.23**	0.0*	1-S2n	0.06	0.17	0.07	0.12	3.38	0.49
0.05	0.05	1522.13	**0.26**	0.0*	1-S2n	0.06	0.18	0.08	0.13	3.46	0.51
0.06	0.06	1522.15	**0.28**	0.0*	1-S2n	0.06	0.19	0.09	0.14	3.48	0.53
0.06	0.06	1522.17	**0.30**	0.0*	5-S2n	0.07	0.20	0.09	0.14	3.50	0.55
0.07	0.07	1522.19	**0.32**	0.0*	5-S2n	0.07	0.21	0.10	0.15	3.54	0.56
0.07	0.07	1522.22	**0.35**	0.0*	5-S2n	0.07	0.21	0.10	0.16	3.58	0.57

- **Resultados de evaluación de obras sitio Guayabal:** En la Tabla 17, Tabla 18 y Figura 17 a la Figura 20 se presentan los resultados a las obras propuestas en el sitio Guayabal.

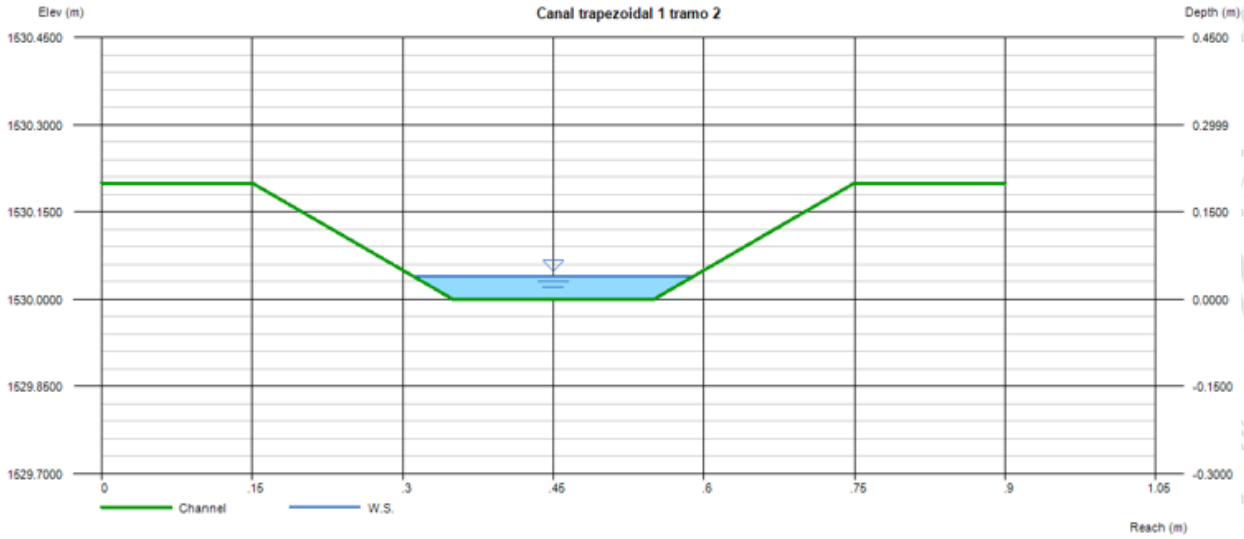
Tabla 17. Resultados de caudales para canales propuestos

Obra	Hidráulica															
	n				y		Altura Canal	Área	Perím. mojado	Radio hidco.	Ancho superf.	Pend.	Veloc.	Caudal	Caudal	Nro. De Froude
		b (m)	z1	z2	m	B (m)	m	m^2	m	m	m	m/m	m/s	m^3/s	L/s	
Canal 1 Tramo1	0.028	0.20	1.0	1.0	0.06	0.321	0.20	0.02	0.37	0.04	0.32	0.06	1.07	0.02	16.9	1.53
Canal 1 Tramo2	0.028	0.20	1.0	1.0	0.04	0.278	0.20	0.01	0.31	0.03	0.28	0.28	1.82	0.02	16.9	3.18
Canal 1 Tramo3	0.028	0.20	1.0	1.0	0.04	0.288	0.20	0.01	0.32	0.03	0.29	0.18	1.57	0.02	16.9	2.58
Canal 2	0.028	0.20	1.0	1.0	0.04	0.287	0.20	0.01	0.32	0.03	0.29	0.19	1.59	0.02	16.9	2.65

Tabla 18. Resultados canal escalonado proyectado para el manejo de las aguas de escorrentía en la reconformación del talud.

Escalonado	Altura escalón (h)	Huella escalón (l)	Ancho del canal	h/l	Caudal	Yc	Yc/h	Régimen de Flujo	Ce	d	Y_{50}	v
1	0.3	0.55	0.4	0.55	0.017	0.06	0.19	Resalto Hdco	0.43	0.018	0.032	1.334

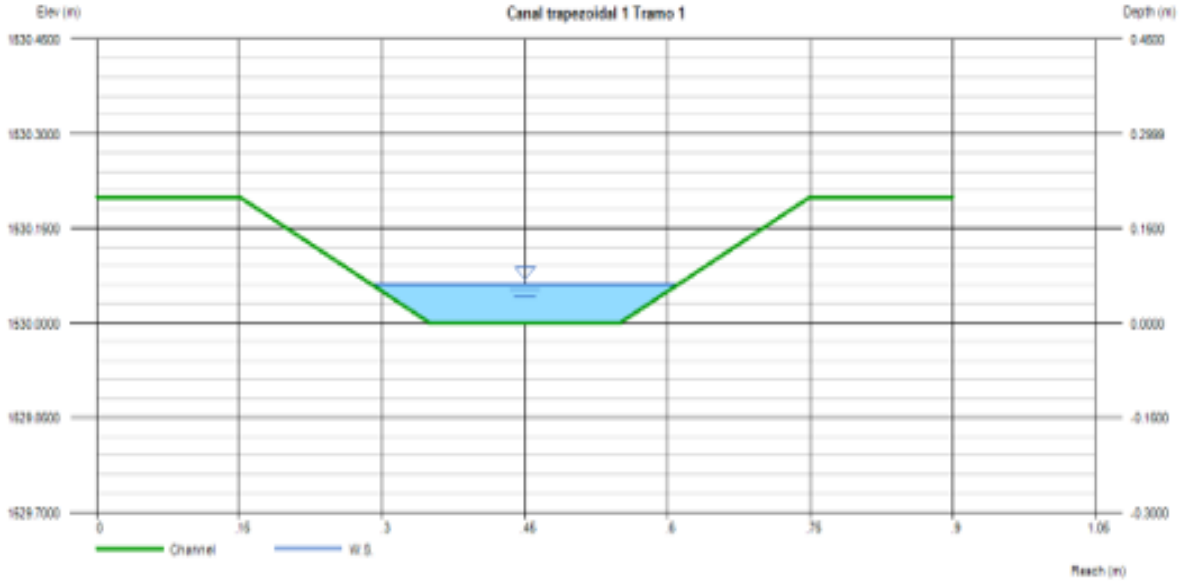
Section	Item	Input
Channel	Section Type =	Trapezoidal
	Btm Width (m)	0.2000
	Side Slope, z:1 =	1.0000; 1.0000
	Tot Depth (m) =	0.2000
	Inv Elev(m) =	1530.0000
	Slope (%) =	27.2800
	n-value =	0.028
Calcs	Compute by =	Known Q
	Q (cms) =	0.0169



Depth	Q	Area	Veloc	Wp	Yc	TopWidth	Energy
(m)	(cms)	(sqm)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.0396	0.017	0.009	1.7799	0.3121	0.0792	0.2792	0.2012

Figura 17. Resultados obtenidos de la calibración hidráulica del canal trapezoidal 1 tramo 2 con pendiente de 27.28%

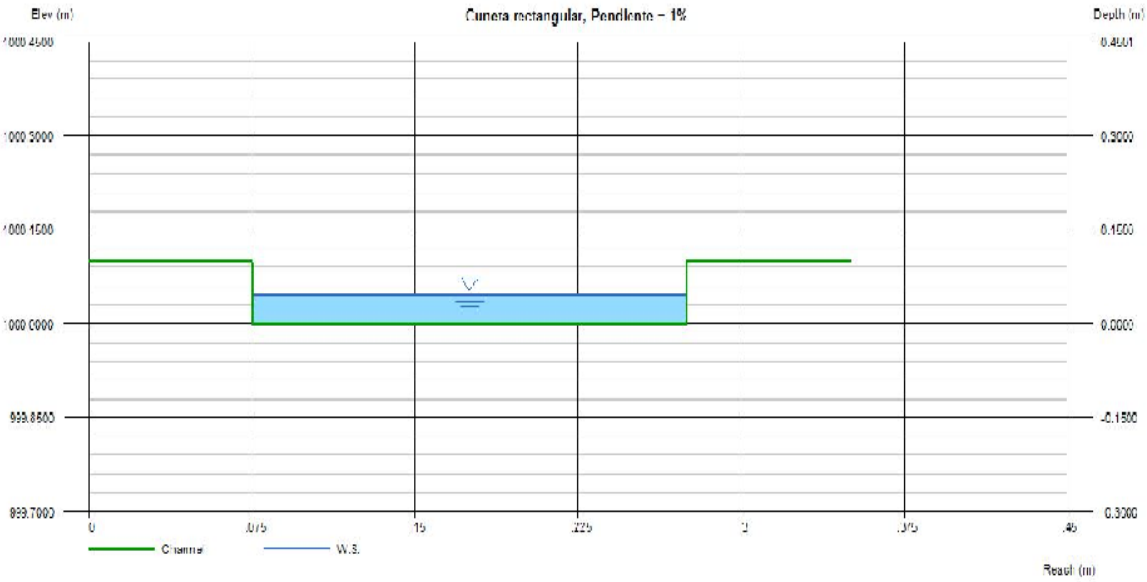
Section	Item	Input
Channel	Section Type =	Trapezoidal
	Btm Width (m)	0.2000
	Side Slope, z:1 =	1.0000; 1.0000
	Tot Depth (m) =	0.2000
	Inv Elev(m) =	1530.0000
	Slope (%) =	6.1200
	n-value =	0.028
Calcs	Compute by =	Known Q
	Q (cms) =	0.0169



Depth	Q	Area	Veloc	Wp	Yc	TopWidth	Energy
(m)	(cms)	(sqm)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.0610	0.017	0.016	1.0623	0.3724	0.0792	0.3219	0.1185

Figura 18. Resultados obtenidos de la calibración hidráulica del canal trapezoidal 1 tramo 1 con pendiente de 6.12%

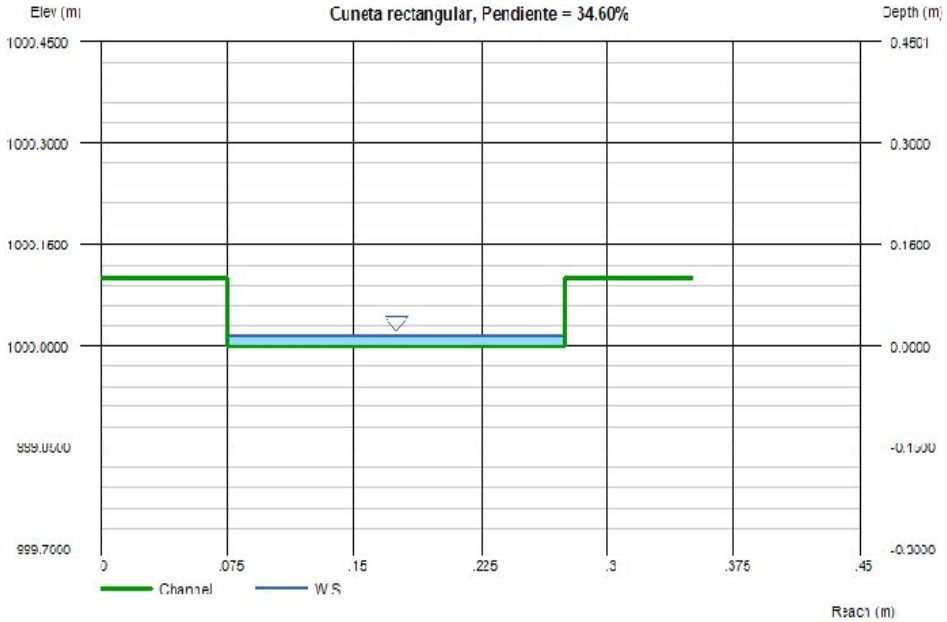
Section	Item	Input
Channel	Section Type =	Rectangular
	Btm Width (m)	0.2000
	Side Slope, z:1 =	-0-
	Tot Depth (m) =	0.1000
	Inv Elev(m) =	1000.0000
	Slope (%) =	1.0000
	n-value =	0.013
Calcs	Compute by =	Known Q
	Q (cms) =	0.0069



Depth	Q	Area	Veloc	Wp	Yc	TopWidth	Energy
(m)	(cms)	(sqm)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.0457	0.007	0.009	0.7546	0.2914	0.0518	0.2000	0.0748

Figura 19. Resultados obtenidos de la calibración hidráulica de la cuneta rectangular propuesta para la solución geotécnica, con pendiente 1%.

Section	Item	Input
Channel	Section Type =	Rectangular
	Btm Width (m)	0.2000
	Side Slope, z:1 =	-0-
	Tot Depth (m) =	0.1000
	Inv Elev(m) =	1000.0000
	Slope (%) =	34.6000
	n-value =	0.013
Calcs	Compute by =	Known Q
	Q (cms) =	0.0059



Depth	Q	Area	Veloc	Wp	Yc	TopWidth	Energy
(m)	(cms)	(sqm)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.0152	0.007	0.003	2.2638	0.2305	0.0518	0.2000	0.2766

Figura 20. Resultados obtenidos de la calibración hidráulica de la cuneta rectangular propuesta para la solución geotécnica, con pendiente 34.6%.

En el dimensionamiento y evaluación de las obras hidráulicas realizadas para las obras propuestas en los sitios correspondientes al marco de las Urgencias Manifiestas de Medellín se garantizó lo siguiente:

- Exista un borde libre en la obra para que no desborde con el caudal de diseño
- Se verificó que la velocidad de la descarga no sea alta ya que pueda generar problemas de socavación a la salida.
- Las cajas se proyectan con la intensión de cambiar de dirección o disipar energía, las dimensiones de esta se realizan en su longitud con base a la caída descrita por el perfil de flujo, la cual se asemeja a un

análisis de tiro parabólico. Sin embargo, cuando esta dimensión es muy grande y la condición del terreno no permite realizarla o el caudal no es de gran magnitud a comparación de la estructura que se tendría que realizar para que el flujo no choque con la pared de la caja, se reduce la dimensión y se propone proteger la cara de impacto de la caja con algún material, ya sea neopreno, fibra de vidrio, entre otros; o en algunos casos un concreto de resistencia de 28MPa es suficiente para soportar el impacto.

- El concreto a utilizar debe tener una resistencia de 28 MPa
- En terrenos de altas pendientes es recomendable el uso de canales escalonados, debido a su alto porcentaje de disipación de energía.
- Las contrahuellas propuestas fueron de 0.30m, ya que son zonas residenciales y esto facilitaría la limpieza y mantenimiento de las obras.
- En los sistemas escalonados se proyecta que los escalones presenten una pendiente longitudinal del 1.0% en las huellas, esto con el fin de evitar el estancamiento del agua en los periodos de estiaje. Además, esta inclinación favorece el arrastre del material en suspensión que viaja en el flujo a través de la estructura.
- Cuando se realizan protecciones o intervenciones en cauces, se debe garantizar que las condiciones existentes y proyectadas sean similares, en cuanto a comportamientos de perfiles de flujo, velocidades y regímenes del cauce, esto con el fin de no afectar las condiciones naturales.

Finalmente, con la realización del proyecto de prácticas académicas, se logró enriquecer y complementar el conocimiento adquirido en la universidad, ejecutando habilidades técnicas en el diseño y planteamiento de soluciones a las problemáticas encontradas en el marco de las Urgencias Manifiestas de Medellín, obteniendo resultados y soluciones adecuadas para cada una de las zonas afectadas.

7 Conclusiones

- Durante el proceso de prácticas académicas se logró emplear habilidades, técnicas en el diseño y planteamientos de soluciones a las problemáticas encontradas, aplicando los conocimientos adquiridos en los siguientes curso a los largo del proceso universitario, iniciando con un curso esencial lecto-escritura, topografía, mecánica de fluidos, geomática, hidrología, hidráulica de canales, diseño geométrico de vías I y II, mecánica de suelos, materiales de construcción, estructuras de hormigón, estabilidad de taludes y laderas y construcción de vías.

Los cuales brindaron las bases y el criterio para tomar decisiones en las zonas afectadas y así brindar solución a cada una de ellas.

- Las zonas donde se encuentran ubicadas las áreas de estudio presentan un régimen anual de precipitación bimodal, con dos periodos de lluvia bien definidos los cuales presentan sus picos durante los meses de mayo y octubre. En los periodos de verano los meses de menor precipitación corresponden a enero para la primera temporada y julio para la segunda.
- Los caudales seleccionados para cada periodo de retorno son los resultados obtenidos por el método racional Ven Te Chow, ya que está es la metodología de mayor aplicación en cuencas pequeñas.
- Con las soluciones planteadas se pretende captar y conducir de una manera adecuada las aguas de escorrentía superficial que llegan en la actualidad al talud afectado, reduciendo de manera significativa los procesos de erosión e infiltración, y así con ello darle mayor seguridad ante la ocurrencia de la creciente de diseño en la zona intervenida.
- El alineamiento en planta y perfil están condicionados a la topografía de la zona.
- Las obras proyectadas tienen la suficiente capacidad hidráulica para evacuar el caudal generado ante la ocurrencia de precipitaciones para el período de retorno de diseño.
- La estación de influencia para el sitio Prados de la Colina y Guayabal corresponde a la estación Ayurá y para el sitio La Suiza corresponde a la estación San Cristóbal.

8 Referencias Bibliográficas

- [1] HIDRYCAS, INGENIERÍA SOSTENIBLE. [Citado marzo 14, 2019]. Disponible en: http://www.hidrycas.co/nosotros/
- [2]. Ley 80 de 1993. Estatuto General de Contratación Pública. Artículo 42: De la Urgencia Manifiesta.
- [3] VARAS, E. Hidrología ambiental [en línea]. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile. [Citado marzo 14, 2019]. Disponible en: http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_1/modulo1/hidro.pdf
- [4] ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA AGRÍCOLA DE CIUDAD REAL. Catedra de ingeniería Rural. Capítulo 1: Hidráulica. [Citado marzo 14, 2019]. Disponible en: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema1.PDF
- [5] NANÍA, L. (2013). Hidrología superficial: la cuenca y los procesos hidrológicos. Apuntes de clase. Granada: Universidad de Granada.
- [6] Smith R. y Vélez M.V. (1997). Hidrología de Antioquia. MEDELLIN: UNIVERSIDAD NACIONAL; SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS.
- [7]. INVIAS. (2009). Manual de Drenaje para carreteras. Bogotá.

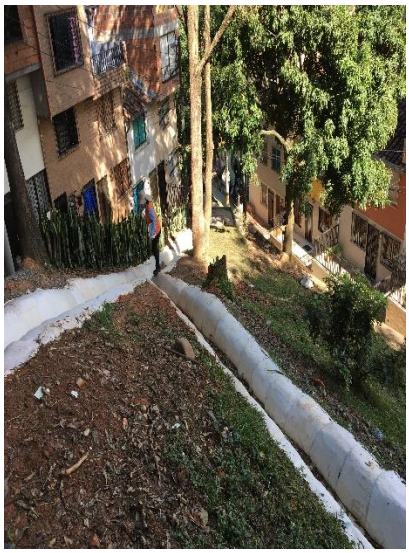
- [8]. CHOW, Ven Te. (1994) "Hidráulica de Canales Abiertos". Edit. McGraw Hill. Santafé de Bogotá.
- [9] Carmona, R.P. (2013). Diseño de instalaciones de sistemas sanitarios, alcantarillados y drenaje para carreteras. Bogotá: Ecoediciones.
- [10] Officials, A. A., & Streets, A. P. (2004). HY-8 User Manual (v7.3) HY-8 Culvert Analysis Program. Washington D.C.
- [11] HEC RAS (Hydrologic Engineering Center- River Analysis System) Versión 4.0.1. U. S. Army Corps of Engineers.

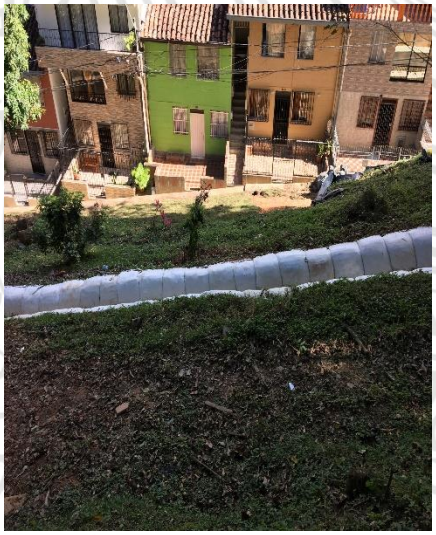
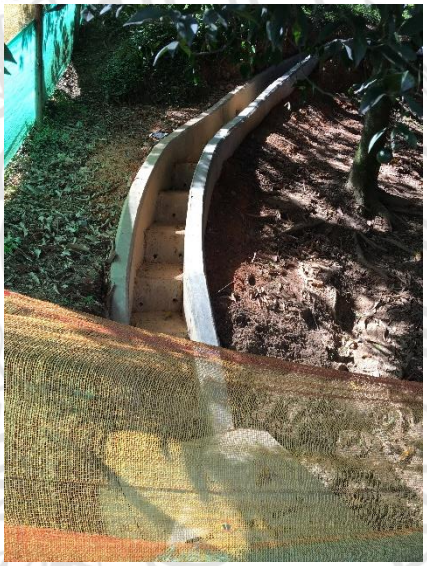
9 Anexos

De acuerdo a que los deslizamientos presentados hacían parte de las Urgencias Manifiestas de la ciudad de Medellín; tanto su diseño como su construcción requerían de inmediata atención, ya que se encontraban en peligro y riesgo la vida de las personas que viven cerca o transita a diario por las zonas en estudio. Es por esto, que se pudo realizar una visita de campo con los asesores tanto interno como externo, para verificar el funcionamiento de las obras propuestas y ya construidas en los sitios de Prados de la Colina y Guayabal. A continuación, se muestran el registro fotográfico.

Fotografía 4. Equipo de trabajo.

Sitio Prados de la Colina:





Sitio Guayabal: