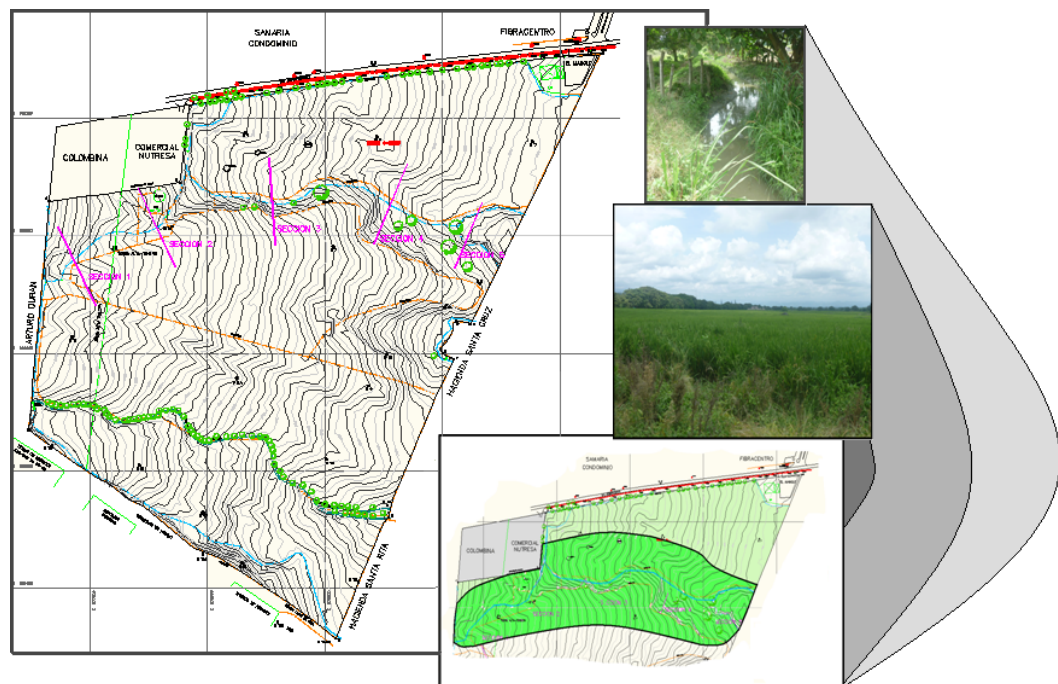


PLAN PARCIAL LA SAMARIA:

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE
CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ,
DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**



Informe final

Elaborado por:

JORGE LUIS ESTUPIÑÁN PERDOMO

I.C., MSc. Ingeniería Civil PUJB

M.P. No. 70202-147127

INTRODUCCIÓN

Colombia se destaca a nivel mundial por ser un país con una riqueza hídrica importante, debido a que el ciclo hidrológico en la región presenta, a nivel general, una precipitación aproximada de 3.000 milímetros al año, de los cuales se descuentan alrededor de 1.150 milímetros por concepto de evapotranspiración, con lo cual los 1.850 milímetros restantes se distribuyen en forma de aguas subterráneas, nieves perpetuas, vapor de agua y escorrentía superficial y sub-superficial (Marín, 1992; Marín, 2003).

De esta forma, aunque se estima que el subsuelo del país alberga aproximadamente 70 veces la magnitud de las aguas de escorrentía, estas últimas poseen un volumen cercano a los 67.000 m³/seg., mientras que el almacenamiento de agua en lagunas, embalses, ciénagas y pantanos suma un total cercano a los 38.000 m³/seg (Colombia, 2000).

El anterior panorama de bondad hídrica permite establecer que en casi todas las regiones del país, hace presencia el recurso agua en diferentes formas, con lo cual es importante conocer la variedad, la magnitud y la fragilidad de los hidrosistemas locales frente a los procesos de urbanización liderados por las obras civiles, las cuales pueden generar impactos directa o indirectamente en ellas.

El Plan Parcial La Samaria no es ajeno a este paradigma, puesto que por el terreno donde se realizarán las obras de urbanismo, denominado El Jardín, circulan dos hidrosistemas superficiales: (i) la Quebrada La Opia y (ii) un bajo inundable con circulación de caudales intermitentes.

A estas corrientes les será realizado un análisis hidrológico e hidráulico con el objetivo de conocer sus posibles comportamientos ante crecientes con amplios periodos de retorno y posteriormente, determinar las zonas de protección ambiental traducidas en zonas de cauce principal y de inundabilidad máxima, con miras a generar un proyecto seguro y eficiente, desde el punto de vista económico, ambiental y sostenible.

OBJETIVO GENERAL

Establecer el régimen climatológico primario característico de la zona donde se localiza el predio El Jardín y Determinar el tránsito de la creciente en los hidrosistemas lóticos La Opia y Drenaje Intermitente, con miras a establecer la respuesta de cada uno de ellos ante caudales con alto periodo de retorno y conocer sus niveles máximos en el cauce principal y en la zona de inundación.

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

1. LOCALIZACIÓN DE LAS CORRIENTES

El Plan Parcial La Samaria, como modelo urbano integral, se desarrollará en el predio El Jardín, localizado en la zona de desarrollo urbanístico suroriental del municipio de Ibagué, capital del Departamento de Tolima (figura 1). El predio limita al Norte con la Vía al aeropuerto Perales, al occidente con las empresas Colombina y Comercial Nutresa; al Oriente con las Haciendas Santa Cruz y Santa Rita; y al Sur con el antiguo Corredor férreo y una vía paralela que, según el Plan de Ordenamiento Territorial, servirá como un futuro corredor de servicios.

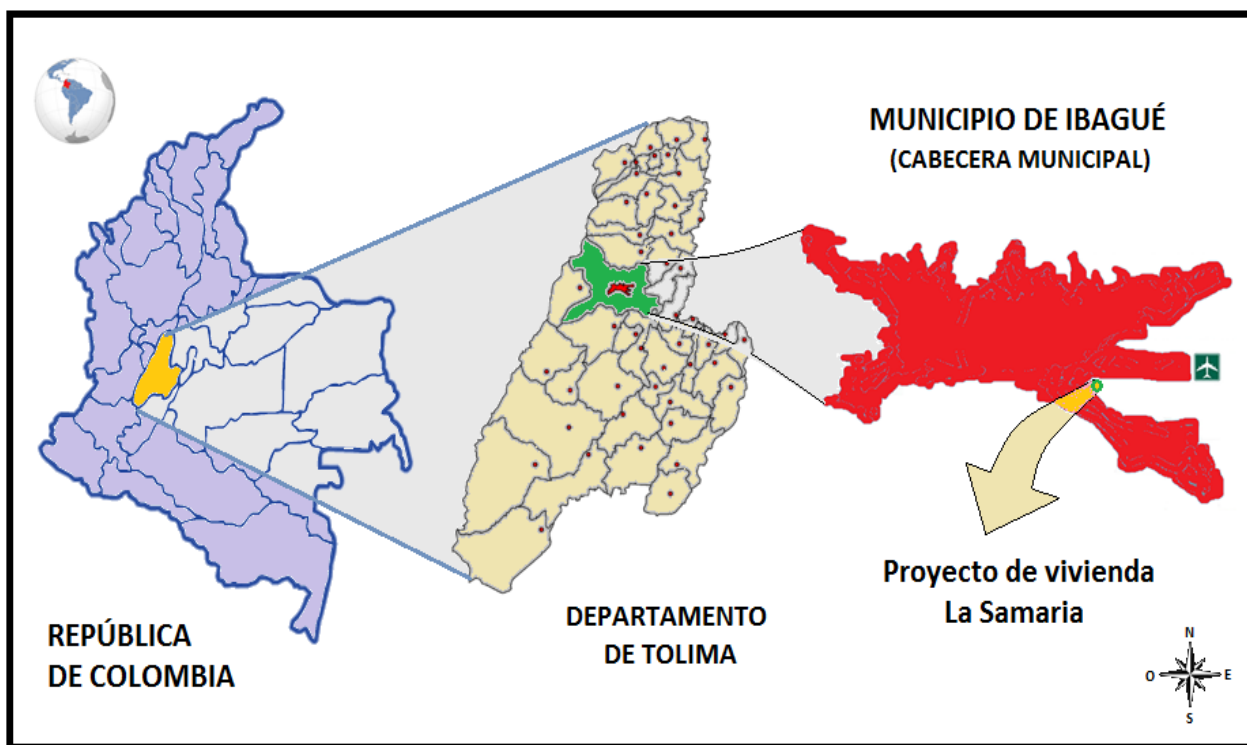


Figura 1. Ubicación general del proyecto.

En la actualidad, el predio El Jardín posee en su mayoría un uso agrícola y ambiental, puesto que allí se encuentra un extenso cultivo de arroz que ocupa alrededor de un 70 % del terreno y las áreas restantes se encuentran repartidas entre planicies y colinas bajas, donde se encuentran diversos árboles y los moradores cercanos lo utilizan para la crianza de ganado y cerdos. También hacen presencia algunas viviendas legítimamente establecidas y un asentamiento de cerca de 30 casas ilegales que bordean el límite sur del predio.

Por su parte, en este terreno se presentan dos tipos de corrientes menores: (i) un hidrosistema superficial con un caudal de frecuencia continua y (ii) un curso intermitente de aguas. La primera de ellas es conocida como la quebrada La Opia, la cual posee características morfométricas y de calidad, especiales, debido a que hace parte de una cuenca urbana totalmente antropizada. Por su parte, la segunda corriente se produce por la generación de una depresión topográfica tipo bajo anegable por donde circula caudal intermitente inducido por canales artificiales y cunetas que transportan aguas

grises y de lluvias hacia los cultivos de arroz, lo cual permite clasificarla como una corriente temporal e inducida.

Sin embargo, debido a las características morfométricas de estos hidrosistemas y a los planes de urbanismo del Plan Parcial La Samaria, los arroyos en mención se convirtieron en corrientes de particular interés, debido a su posible comportamiento frente a crecientes de gran periodo de retorno. Por esta razón, se realizó un análisis hidrológico e hidráulico para los mencionados cruces.

1.1 CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE ESTUDIO

En Hidráulica Fluvial e Ingeniería de Ríos, el conocimiento de los factores y procesos que pueden originar el aumento de los caudales normales de un hidrosistema superficial lótico es básico para estimar y de alguna forma, predecir adecuadamente, su comportamiento frente a una creciente o avenida, con el objetivo de orientar las obras de mitigación de inundaciones, salvar obras hidráulicas de forma superficial o subterránea, establecer zonas de protección ambiental y entre otras, determinar los límites de las obras de urbanismo adyacentes.

La cuenca hidrográfica corresponde a una superficie en donde el agua de lluvia escurre, transita y drena en forma de escorrentía, a través de una red de hidrosistemas que fluyen hacia una salida principal.

Presenta cinco funciones características: (i) una función hidrológica que a partir del ciclo del agua, permite captar, almacenar, descargar y drenar agua en distintas formas de estado. (ii) una función ecológica debido a que es el habitat ideal para el desarrollo de flora y fauna que se interrelacionan con los sistemas hídricos, (iii) una función ambiental, ya que la cuenca es el principal productor de CO₂, conserva la biodiversidad y regula el medio ambiente, (iv) una función social debido a que integra aspectos demográficos, institucionales, políticos y organizacionales en su territorio, y (v) una función económica, de acuerdo a las actividades productivas que se logran desarrollar en sus territorios.

Por su parte, el análisis morfométrico de la cuenca tiene como objetivo estudiar los fenómenos hidro-climatológicos que ocurren en ella. Con lo cual, para dicho análisis se parte del siguiente precepto: la forma de la cuenca es la configuración geométrica tal y como está proyectada sobre el plano horizontal. Esta forma, gobierna la tasa a la cual se suministra el agua al cauce principal, desde su nacimiento hasta su desembocadura (Reyes Trujillo, *et al.*, 2010).

Por ende, cada cuenca posee una forma determinada la cual está directamente relacionada con su comportamiento hidrológico. Por esta misma razón, dos cuencas de igual área pero con diferente forma se comportan de manera diferente (Reyes Trujillo, *et al.*, 2010). De allí la importancia de analizar los parámetros morfométricos de cada cuenca de estudio.

En las figuras 2 y 7 se presentan las microcuencas de los dos hidrosistemas, las cuales corresponden a unidades de cuencas periurbanas. La primera de ellas tiene un área aproximada, hasta la zona de terminación del predio en la zona oriental de 6.440,63 m², y está enmarcada por dos consideraciones principales: (i) una intervención antrópica hasta tal punto que en la actualidad impide el reconocimiento general de la cuenca original y (ii) un caudal inicial que corresponde al flujo de tubería de concreto proveniente de una canalización sin estudio alguno y en donde el caudal principal es proveniente de las aguas negras de sectores industriales localizados aguas arriba del predio en estudio.

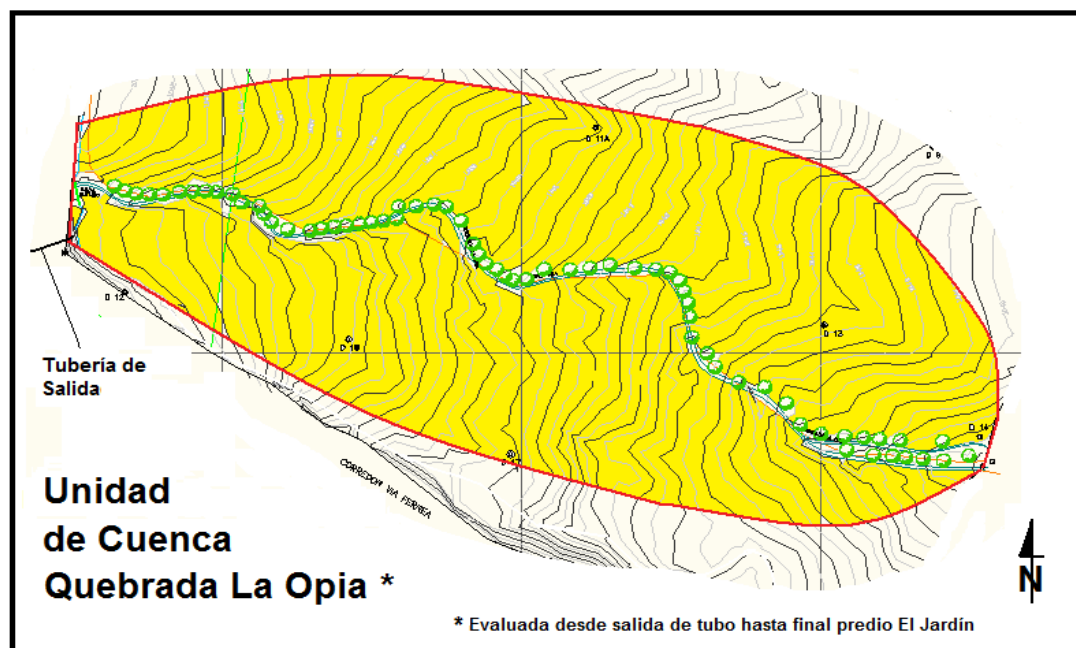


Figura 2. Delimitación de la Unidad de Cuenca Quebrada La Opía hasta el punto de terminación del Predio El Jardín.

Así mismo, hacen presencia algunos cursos intermitentes de aguas provenientes de las pequeñas extensiones de vertiente que la corriente posee. También, durante la visita técnica efectuada al predio El Jardín, se encontraron diferentes canales artesanales antrópicos pequeños que transportan aguas residuales provenientes de cerca de 30 casas que hacen parte de una zona de invasión. En la figura 3 se puede apreciar el inicio de la quebrada La Opía en cercanías al predio en mención, mientras que en las figuras 3 y 4 se muestra el curso de la quebrada en las zonas media y baja de este predio.



Figura 2. Vista general del vertimiento de la tubería que da inicio a la quebrada La Opía.



Figura 3. Quebrada La Opia en la zona media del predio El Jardín



Figura 4. Quebrada La Opia en la zona baja del predio El Jardín

Si bien es cierto estas casas no hacen parte del predio en mención, si afectan notoriamente la calidad de las aguas en este predio, debido que no sólo aportan contaminantes a través de las aguas residuales que envían a la corriente La Opia, sino que actividades como la cría de cerdos, gallinas y patos son focos contaminantes que perturban la ya mal trajeada calidad del agua en este hidrosistema.

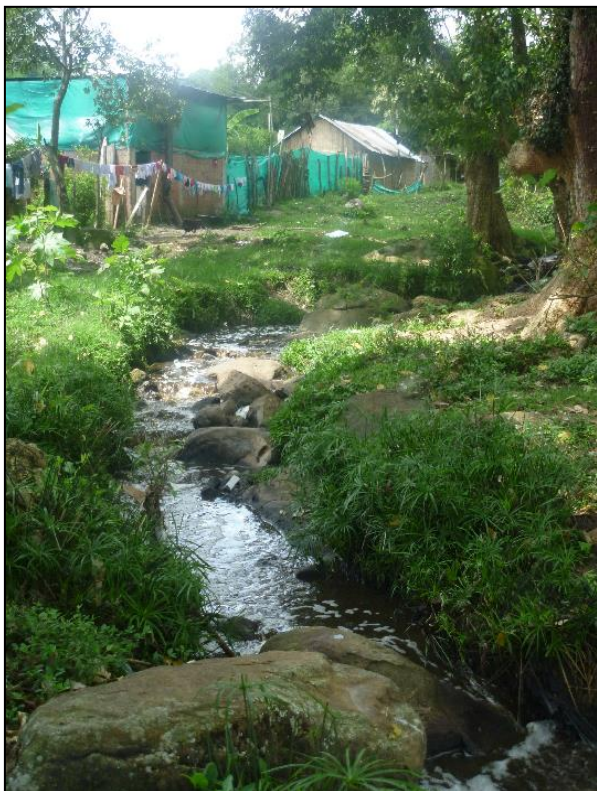


Figura 5. Quebrada La Opia a su paso por el Predio El Jardín. Atrás, algunas casas de invasión.

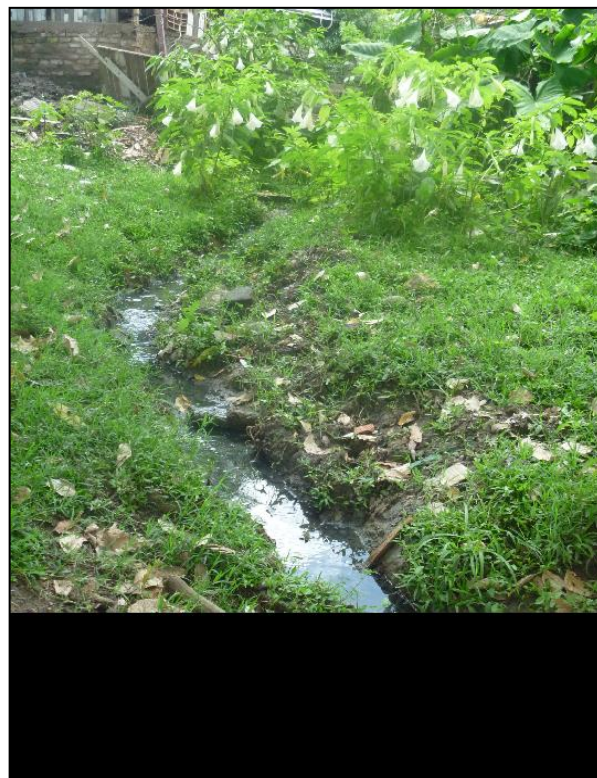


Figura 6. Aguas negras afluentes a la Qbda. La Opia, procedentes de zonas de invasión.

Por su parte, la cuenca del drenaje intermitente posee un área de $7.725,78 \text{ m}^2$ (figura 8 y 9), con lo cual se clasifica como una unidad mínima de cuenca, puesto que teóricamente por ella escurre un flujo de agua que drena hacia una sola salida, pero en realidad esto se da debido a que la topografía y al relieve, tipo bajo anegable, permiten el drenaje de escorrentía superficial comportándose como si fuera una zona de vertiente de cuenca, que logra tener este aspecto de unidad de cuenca gracias a los caudales inducidos por los canales de aguas lluvias de la vía al Aeropuerto Perales, a los cultivos de arroz y a un mínimo caudal de escorrentía producto de la lluvia. En las figuras 9 y 10 se pueden apreciar los canales que aportan sus aguas al bajo anegable. Estos canales nacen desde la intersección de la avenida Pedro Tafur con la vía al Aeropuerto Perales, llevando un curso significativo donde reciben aguas residuales de viviendas, negocios ambulantes y de la vía al Aeropuerto.

No obstante, aguas abajo del predio El Jardín, gracias a estas mismas variables, el caudal de escorrentía aumenta y se genera un drenaje tipo arroyo, el cual es afluente de la quebrada La Opia y entrega sus aguas cerca al Aeropuerto Perales. En la figura 6 se puede apreciar el bajo anegable que forma la depresión por donde circula caudal intermitente en el Predio El Jardín.

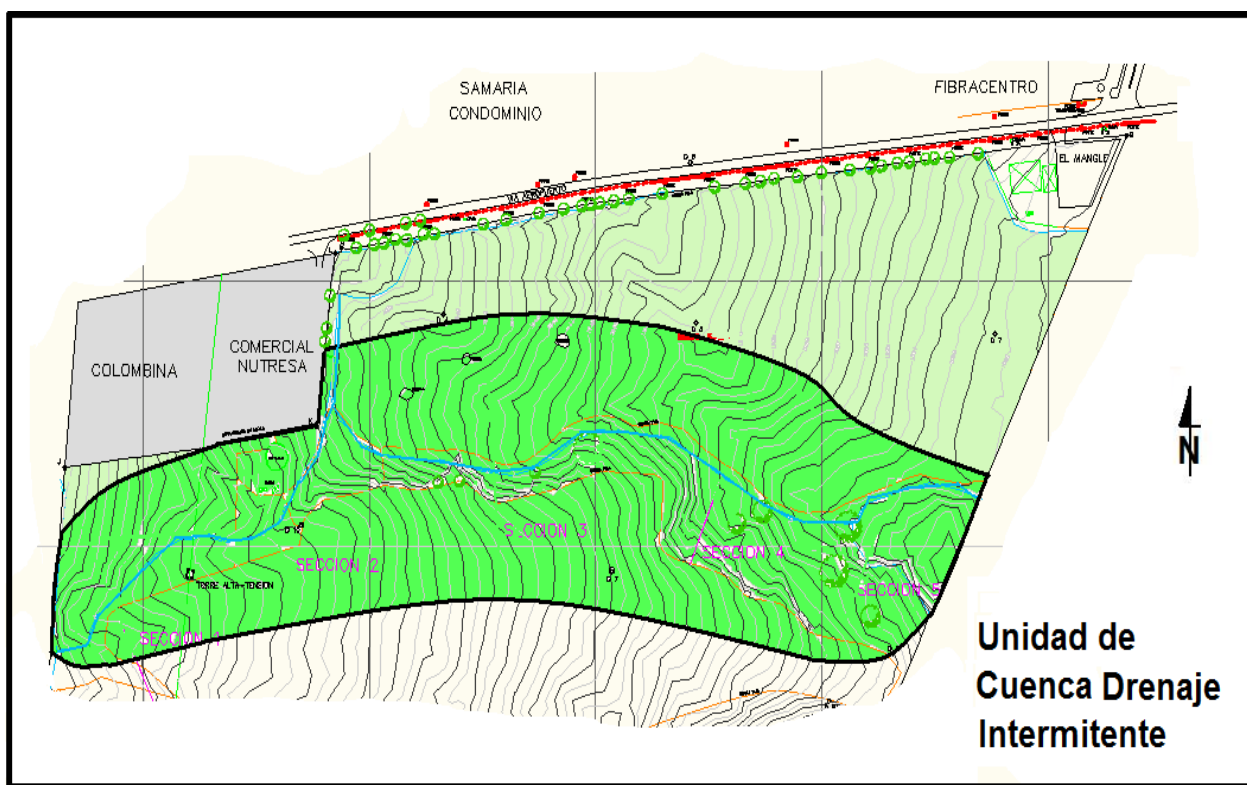


Figura 7. Delimitación de la Unidad de Cuenca del drenaje intermitente hasta el punto de terminación del Predio El Jardín.



Figura 8. Detalle general del bajo inundable con drenaje intermitente



Figura 9. Detalle general del bajo inundable con drenaje intermitente



Figura 10. Canales a la altura del cruce de las vías Pedro Tafur y Aeropuerto, que llevan aguas residuales hacia el bajo anegable.



Figura 11. Canales a la altura de la vía al Aeropuerto frente al Parque Deportivo y al ingreso al predio El Jardín.

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

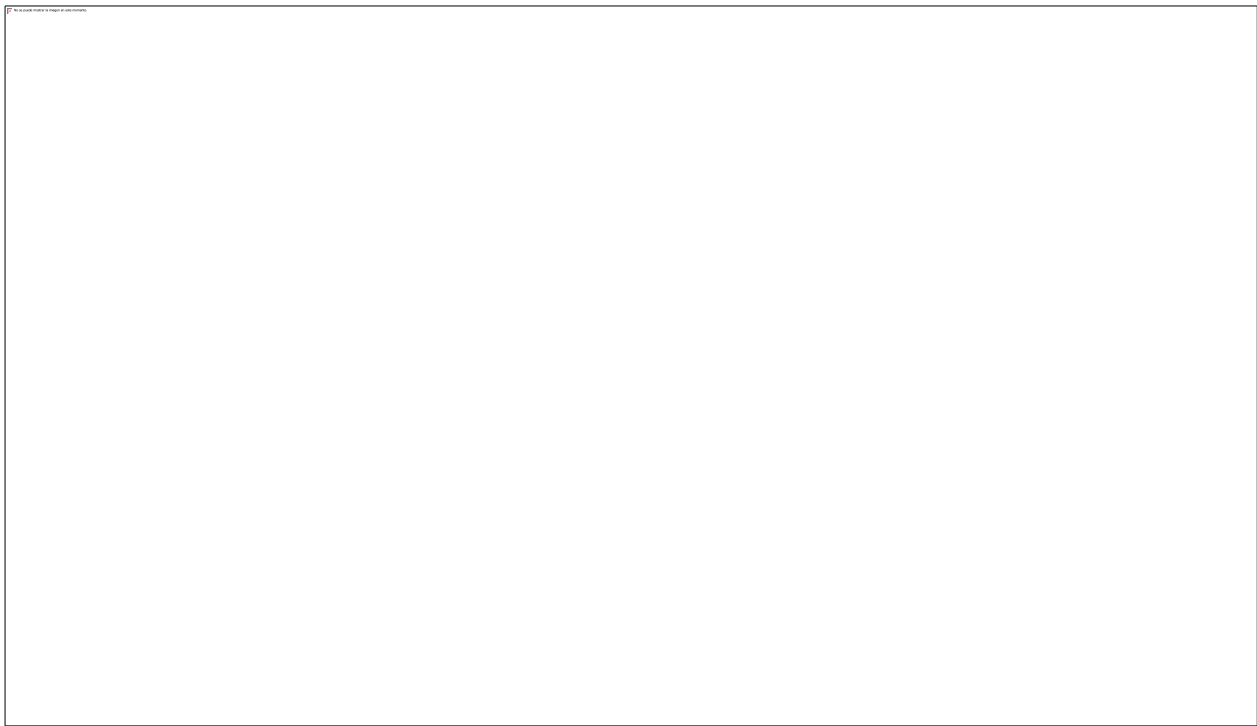


Figura 12. Canales a la altura de los predios vecinos y al ingreso al predio El Jardín.



Figura 13. Canales frente a la Empresa Fibratolima al ingreso al predio El Jardín, el cual desemboca en el bajo anegable y riega los cultivos de arroz del predio El Jardín.



Figura 14. Canales frente a la Empresa Fibratolima al ingreso al predio El Jardín. Vista parcial de los cultivos de arroz del actual predio El Jardín.

2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA GENERAL EN EL PREDIO EL JARDÍN

El estudio de variables climatológicas tiene como objetivo especificar el contexto climático de la zona de estudio, en este caso, en el predio El Jardín localizado en la zona suroriental del casco urbano del municipio de Ibagué.

El comportamiento climático de la región está influenciado por dos parámetros de gran significado. El primero corresponde a la posición geoestacionaria de la Tierra alrededor del Sol, el cual determina la zona de conversión intertropical y su estacionalidad. En segundo lugar se encuentra su relieve, determinando variedades climáticas desde el páramo en las partes altas próximas al Nevado del Tolima, hasta el clima cálido-templado en la meseta de Ibagué.

De acuerdo a los resultados de los análisis efectuados por el IDEAM, compilados en el Atlas Climatológico de Colombia (2005), se caracterizó el clima de la zona, teniendo en cuenta que para la ciudad de Ibagué dichos registros fueron tomados de la Estación Aeropuerto Perales, la principal estación meteorológica, tipo Sinóptica Secundaria, de la región. Sin embargo, para los análisis de precipitación pertinentes se adquirió la información, la cual fue complementada con otra estación, en este caso pluviométrica, más cercana a la zona de estudio.

2.1 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONAS DE ESTUDIO

La precipitación es aquella variable hidrológica que expresa la cantidad de agua líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, escarcha, granizo), que, estando en la atmósfera, se precipita sobre un área determinada. Generalmente, para su medición se utiliza un pluviómetro, el cual posee como unidad de medida el milímetro (mm). Su medición es sencilla: puesto que registra el agua recogida en un recipiente expuesto al aire libre desde la última observación realizada.

Inicialmente se localizaron las estaciones climatológicas más cercanas al proyecto, para lo cual se recurrió al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, donde se conoció la existencia de dos estaciones ubicadas dentro del área de influencia (tabla 1), las cuales cuentan con información concerniente a valores totales mensuales interanuales de precipitación.

Tabla 1. Estaciones climatológicas utilizadas en el proyecto

Estación	Código	Tipo	Periodo de registro	Coordenadas		Altitud	Municipio
				Latitud	Longitud	(msnm)	
Aeropuerto Perales	2124504	Ss	1981-2010	425 N	7508 W	928	Ibagué
Cruz Roja	2121023	Pm	1997-2008	426 N	7513 W	1160	Ibagué

Fuente: IDEAM, 2011.

Los registros de estas dos estaciones seleccionadas constituyeron la información clave para determinar el régimen de distribución de la precipitación en la zona de donde se ubicará el Plan Parcial La Samaria.

2.1 Precipitación Media Mensual Interanual en la Zona de Estudio

Por medio de la ubicación de las estaciones climatológicas a través de su posicionamiento global, se determinó la distancia en línea recta entre cada una de ellas y su variación altitudinal para poder reconocer las precipitaciones promedio multianuales probables en la zona de estudio.

Por lo anterior, se estableció que la distancia en línea recta entre las estaciones Cruz Roja y Aeropuerto Perales es de 8.15 Km., y la variación altitudinal no es significativa, puesto que sólo alcanza los 232 m. Este análisis se resume en la figura 15.

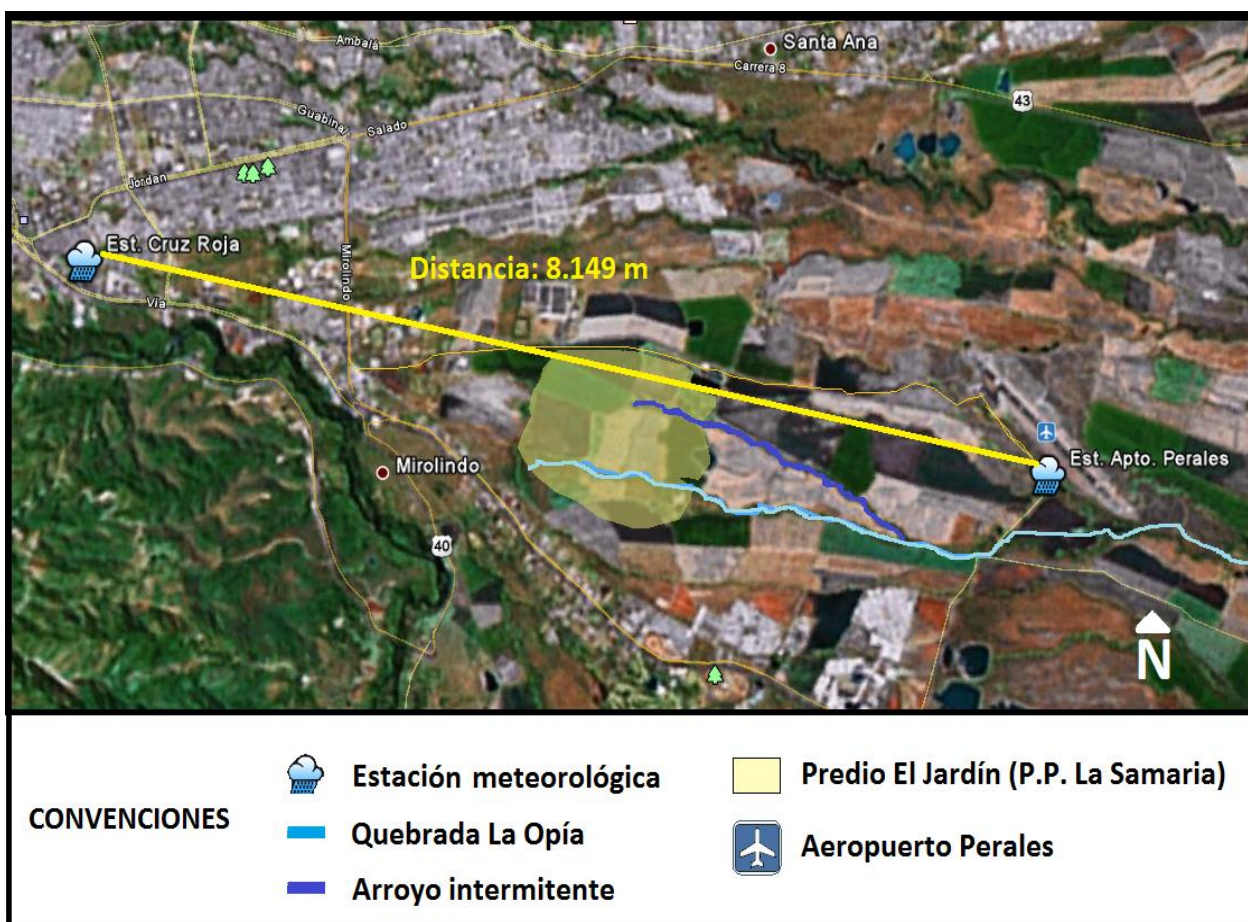


Figura 15. Ubicación de las estaciones climatológicas con respecto a la localización del proyecto.

a la

En la tabla 2, se establece que la zona aferente a las estaciones históricamente ha registrado una precipitación promedio de alrededor de 159.50 mm por año, así como una precipitación total anual normal estimada en cerca de 1.341,90 mm.

Tabla 2. Precipitación característica de la zona de estudio.

Estación	Perales	Cruz Roja	Predio El Jardín
Enero	86.5	155.6	117.1
Febrero	109.1	171.8	136.9
Marzo	138.2	202.9	166.9
Abril	227.1	310.7	264.2
Mayo	228.2	272.6	247.9
Junio	110.6	149.2	127.7
Julio	75.9	58.2	83.7
Agosto	78.2	77.2	78.6
Septiembre	149.9	164.4	156.3
Octubre	205.6	231.8	217.2
Noviembre	173.7	205.7	187.9
Diciembre	108.6	155.0	129.2
Total	1832.6	2334.7	2073.2
Promedio	141.0	179.6	159.5
Máximo	419	494	452.3
Mínimo	0.1	0.0	0.1

Fuente: IDEAM, 2011.

Así mismo, en la figura 16 se puede apreciar la distribución intermensual de las lluvias, determinándose también que en la zona que comprende las estaciones seleccionadas se presenta un régimen hidrológico bimodal.

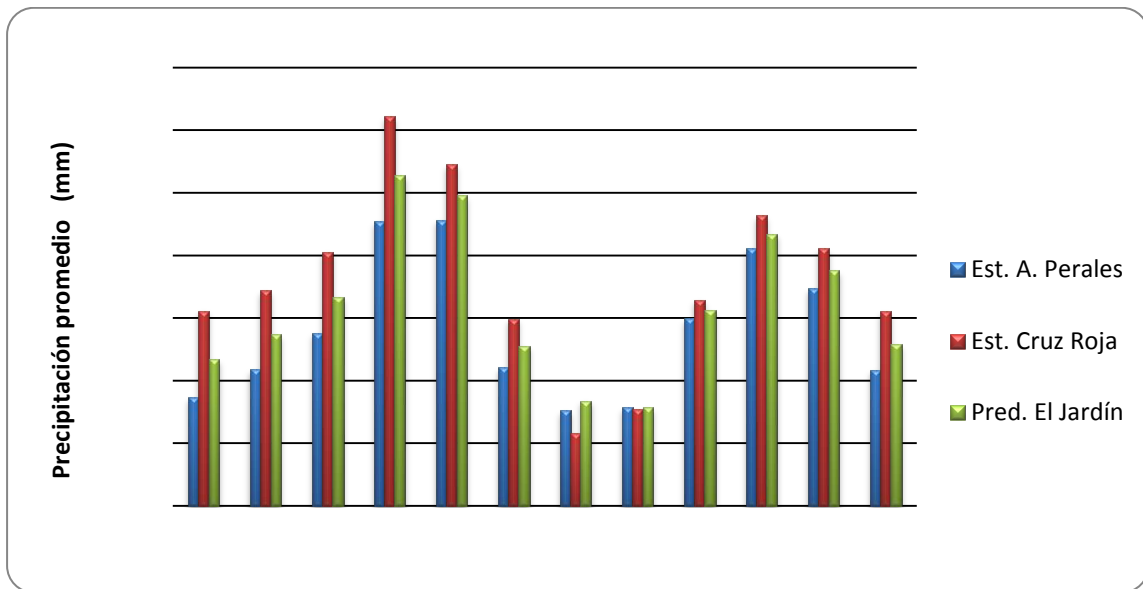


Figura 16. Precipitación normal de la zona de estudio del proyecto. Fuente: IDEAM, 2011

ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.

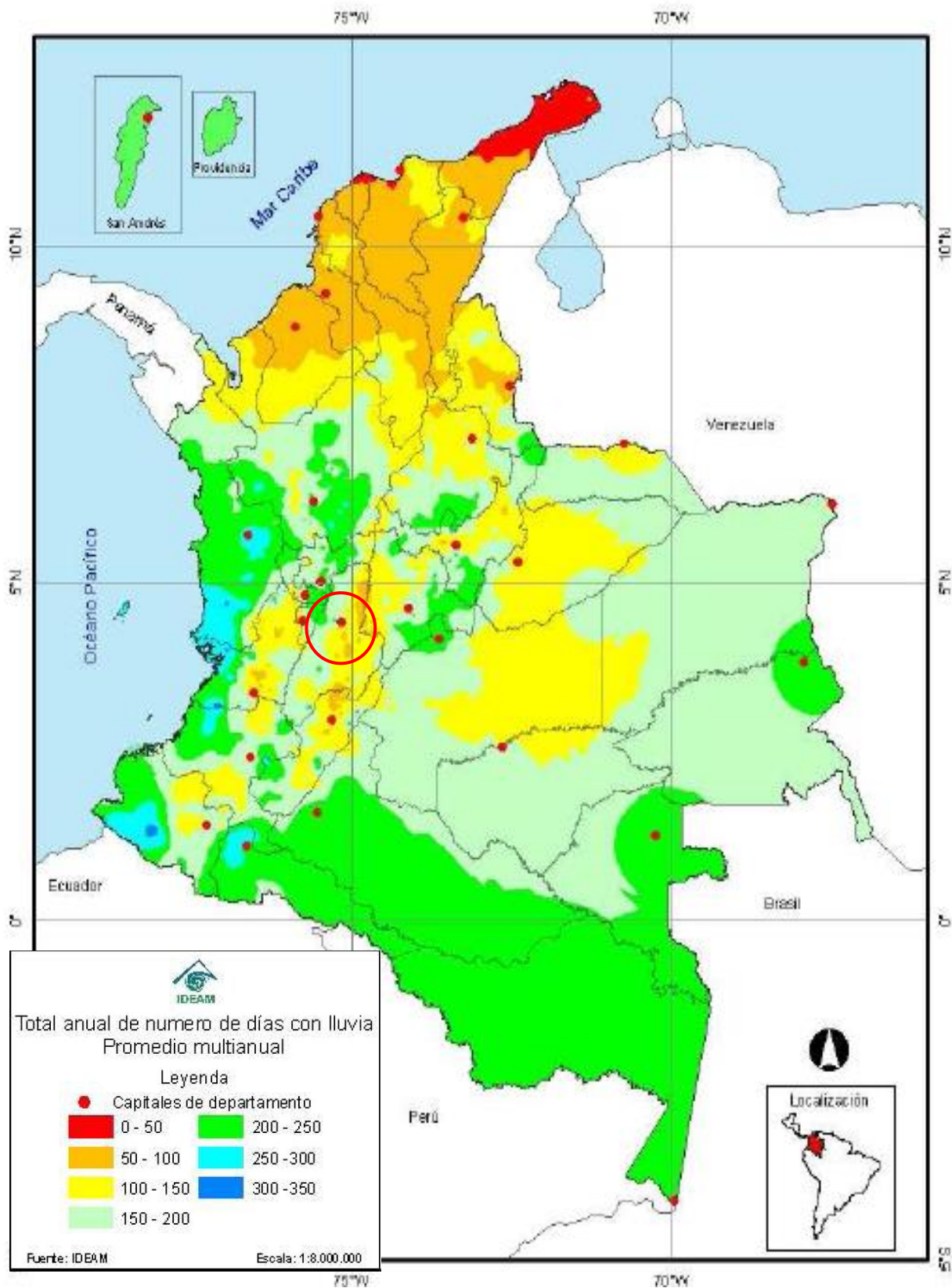


Figura 17. Número de días anuales de lluvia en Colombia. Fuente: IDEAM, 2005

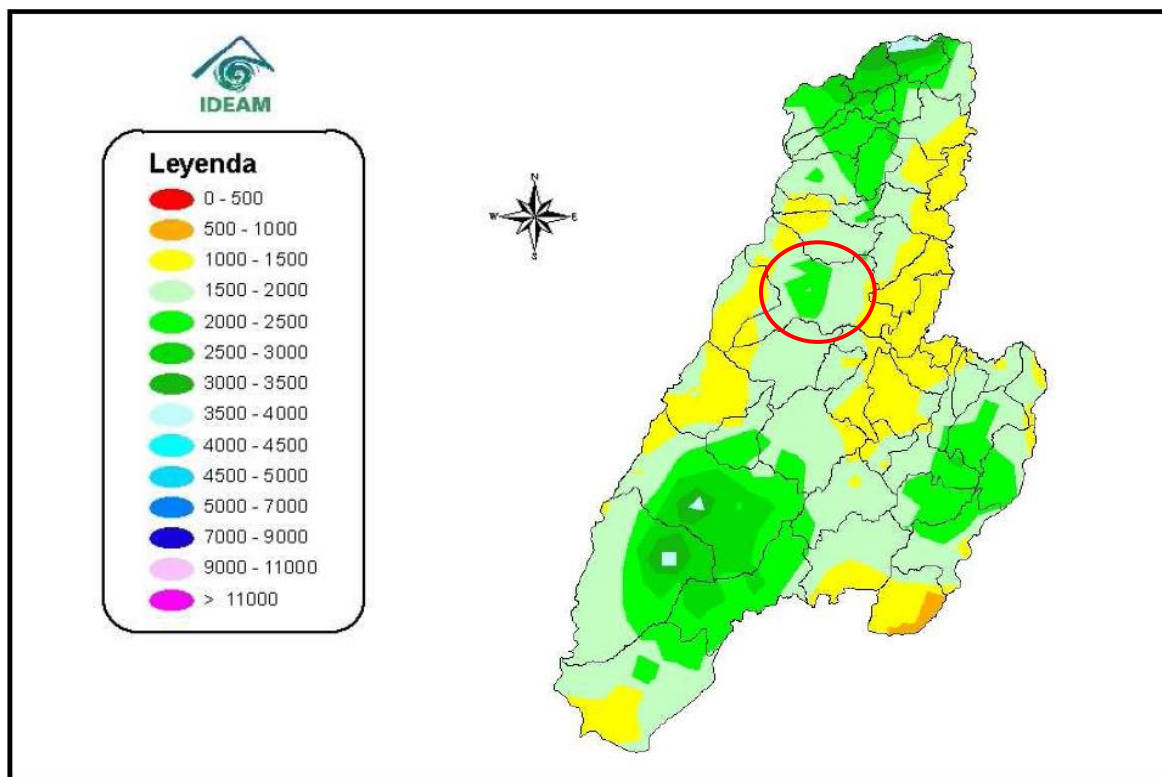


Figura 18. Precipitación total anual en el Departamento de Tolima. Fuente: IDEAM, 2005

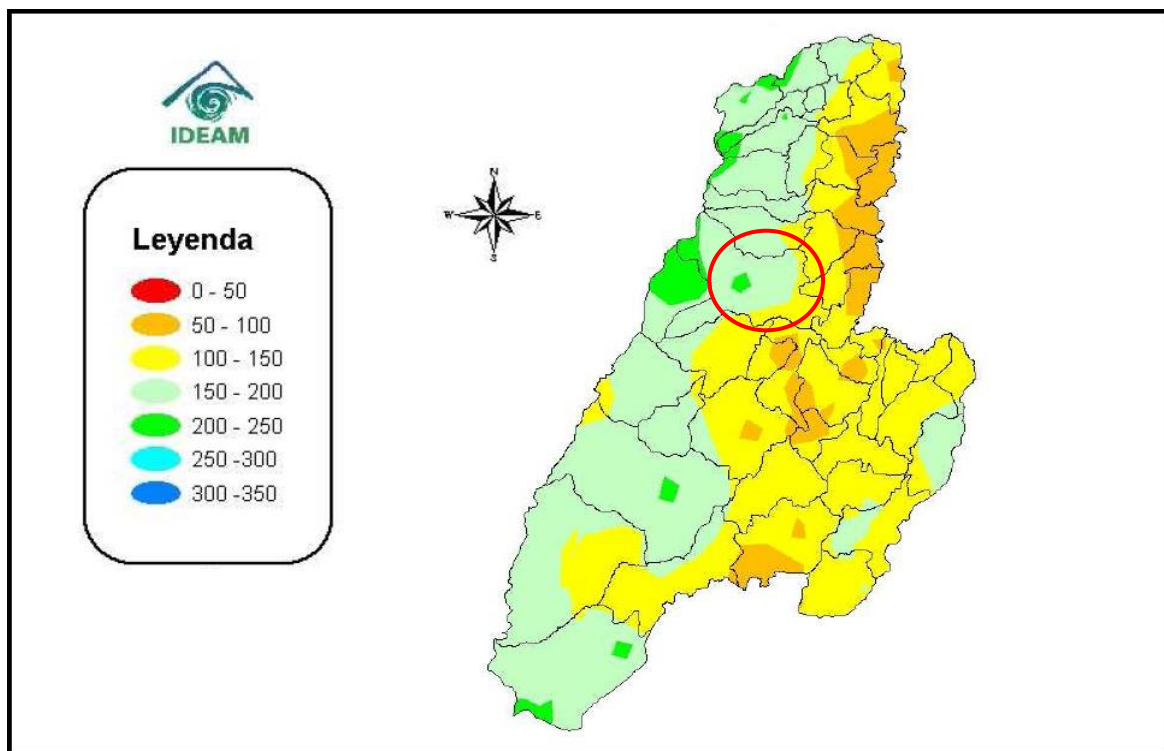


Figura 19. Número de días anuales con lluvia en el Departamento de Tolima. Fuente: IDEAM, 2005

Este régimen está comprendido por dos períodos de lluvias, uno de mayor magnitud el cual inicia generalmente en el mes de febrero y termina a mediados del mes de junio; El segundo periodo de precipitaciones fuertes se genera desde el mes de septiembre y culmina durante el mes de noviembre. Así mismo, estos periodos se encuentran intercalados por dos tiempos de verano, en donde la lluvia cesa notoriamente, aunque la lluvia no desaparece; estos últimos se presentan entre los meses de junio (a mediados) y Agosto, y también durante los meses de Diciembre e inicios de Febrero.

Así mismo, se estableció que el número de días anuales de lluvia en la zona oscila generalmente entre 100 y 150 días, rango que puede aumentarse significativamente debido a que la ciudad de Ibagué cuenta con dos zonas de precipitaciones, como se puede establecer en las figuras 17, 18 y 19, incidiendo notablemente en la variabilidad espacio temporal de las lluvias en la zona de estudio.

2.1.1 Impacto de los Fenómenos del Niño y la Niña en la precipitación local

Habitualmente, los fenómenos del “niño” y “la niña” han alterado significativamente los ciclos hidrológicos locales y con ello las magnitudes de precipitación. En la figura 20 se presenta la alteración de las lluvias con respecto al periodo normal de precipitaciones características en la estación Aeropuerto Perales. La estación Cruz Roja no se tuvo en cuenta en este análisis debido a que únicamente posee datos entre los años 1997 y 2008, con lo cual no se registraron varios fenómenos de este tipo en la zona aferente.

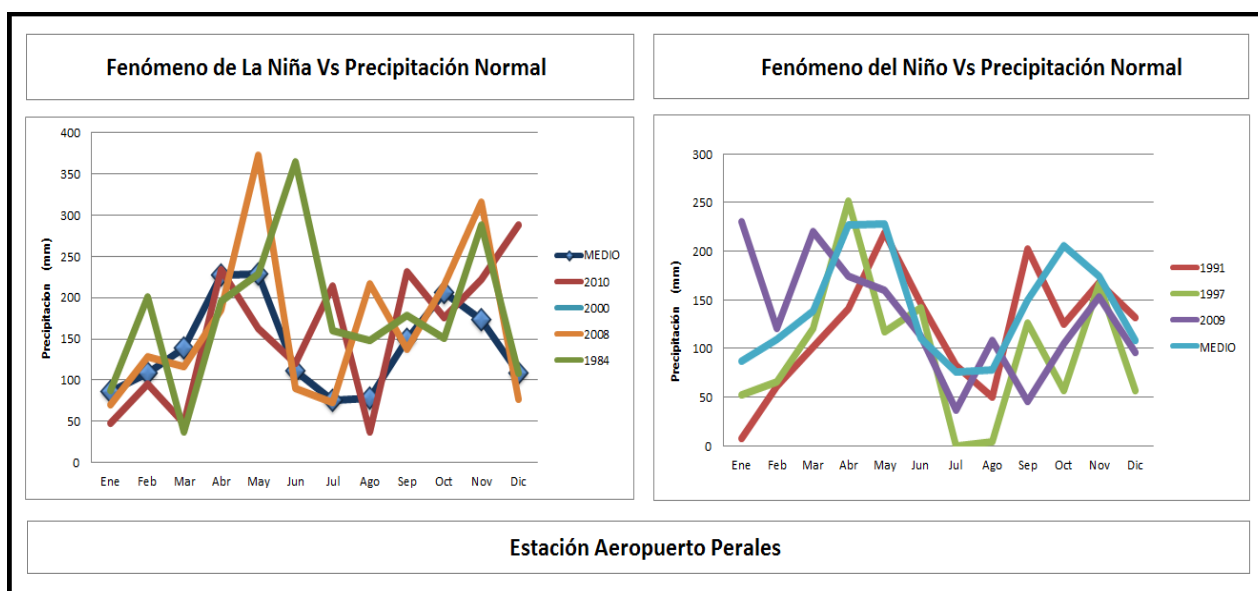


Figura 20. Alteración de las precipitaciones normales frente a los fenómenos del niño y la niña registrados en las Estaciones Aeropuerto Perales y Cruz Roja. Fuente: IDEAM, 2011

Si se tiene en cuenta que recientemente se ha detectado que ambos fenómenos se presentan de forma más seguida, y que afectan notoriamente las precipitaciones promedio mensuales, hasta el punto de intentar cambiar los regímenes de lluvias (de bimodal a monomodal) y los periodos de invierno y verano en la zona de estudio, se debe tener en cuenta el impacto que estos pueden generar durante la concepción del Plan Parcial La Samaria, puesto que en la zona de estudio se presentan suelos anegables y mesetas

húmedas, los cuales pueden saturarse al aumentar los niveles freáticos y por ende generar inundaciones en zonas donde habitualmente para la misma época no poseen problema alguno de drenaje.

2.2 TEMPERATURA

La temperatura es generalmente, un elemento climático valioso en la observación del tiempo y del clima característico de una región, debido a que provee una medida de la energía del sistema en inspección, con lo cual es caracterizada como una variable fundamental en todo proyecto hidrológico. Habitualmente se mide mediante un termómetro de mercurio en vidrio, el cual puede calibrarse.

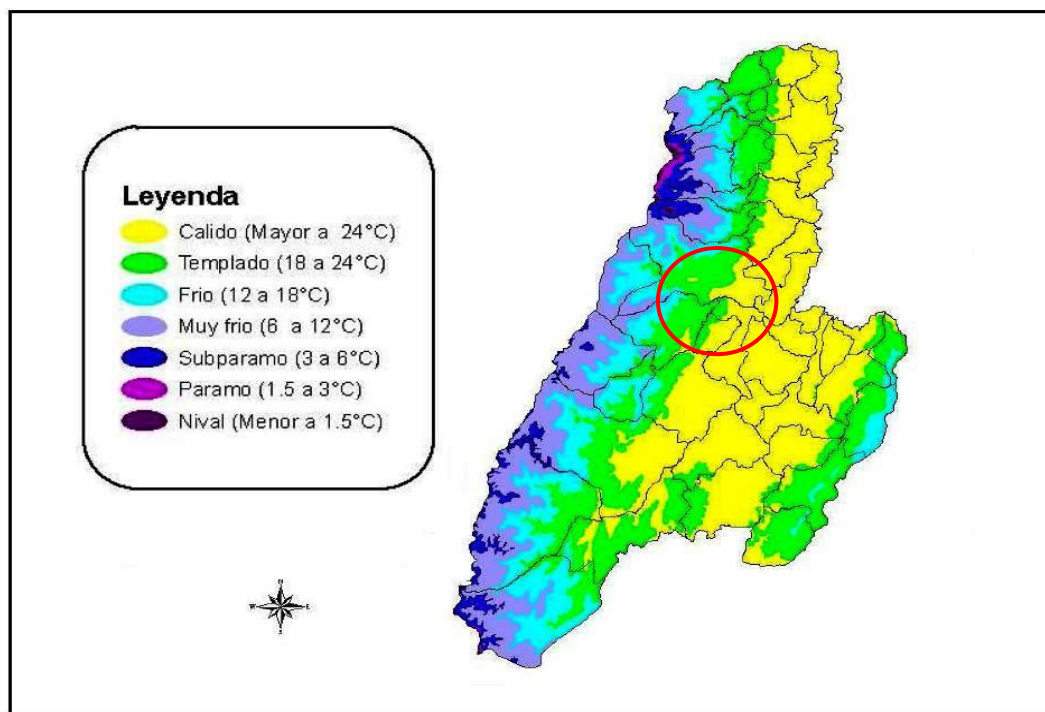


Figura 21. Temperatura media anual en el Departamento de Tolima. Fuente: IDEAM, 2005

Su unidad es el (°C) y puede medir temperaturas bajas y altas extremas. Como se enunció anteriormente, los registros de temperatura fueron tomados del Atlas Climatológico de Colombia (IDEAM, 2005).

Tabla 3. Valores característicos de temperatura según Estación Aeropuerto Perales

Temperatura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Media	23.8	23.9	23.9	23.7	23.6	24	24.5	25.1	24.5	23.4	23	23.2	23.9
Mínima	18.7	19.1	19.2	19.2	19.2	19.1	18.8	19.1	19	18.9	18.9	18.7	19
Máxima	28.7	28.7	28.5	28	28	28.6	29.7	30.4	29.5	27.9	27.3	27.8	28.6

Fuente: IDEAM, 2005.

De acuerdo a los registros de la Estación Aeropuerto Perales (figura 21 y tabla 3), se ha establecido que la temperatura promedio de la zona donde se construirá el Plan Parcial es de 23.9 °C, alcanzando una temperatura máxima de 28.6 °C y mínima de 19.0 °C, con lo cual en la zona se presentan características típicas de un clima templado húmedo.

2.3 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa del aire es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que existe en la atmósfera y la máxima que podría contener a idéntica temperatura. El instrumento estándar para su medición es el sicrómetro, el cual corresponde a dos termómetros verticales idénticos, uno de los cuales tiene el bulbo continuamente mojado por medio de una muselina humedecida por una mecha sumergida en agua. La evaporación del bulbo húmedo hace descender su temperatura debajo de la temperatura del aire, la cual es medida por el termómetro de bulbo seco. La diferencia entre estos dos valores medidos es la usada para calcular la presión de vapor del aire, la cual genera un porcentaje como unidad de medida.

Tabla 4. Humedad Relativa característica en la zona suroriental de la ciudad de Ibagué

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

Humedad Relativa (%)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Media	76	76	78	81	81	76	69	65	72	80	83	80	77

Fuente: IDEAM, 2005.

Para obtener la humedad relativa más probable del sitio de estudio, se recurrió a la información del Atlas Climatológico, Estación Aeropuerto Perales. Los resultados fueron compilados y seguidamente se realizó una interpolación para conocer los valores estimados para la zona de estudio, los cuales se aprecian en la tabla 4 y la figura 22.

Figura 22. Comportamiento de la humedad relativa mensual en el sitio de estudio. Fuente: IDEAM, 2005.

Los resultados indican que el valor promedio de la Humedad Relativa es del orden del 77%, con una tendencia histórica muy variable, debido a que sus valores máximos ascienden a un 83 %, característico durante el mes de noviembre, y un rango mínimo del 65 % en el mes de agosto, periodo donde se reduce significativamente la tensión de vapor. Esta variación es característica de la zona, debido a que:

1. Se conoce que la Humedad Relativa es muy sensible a los cambios de temperatura, lo cual sucede comúnmente en las capas bajas de la atmósfera, donde su valor mínimo corresponde a las horas de mayor calor y el máximo a las madrugadas, con lo cual la presión de vapor de agua puede llegar a variar bruscamente.
2. Se constató que en la localidad se presenta un régimen bimodal con tendencia a la presencia de lluvias combinadas con moderadas temperaturas.

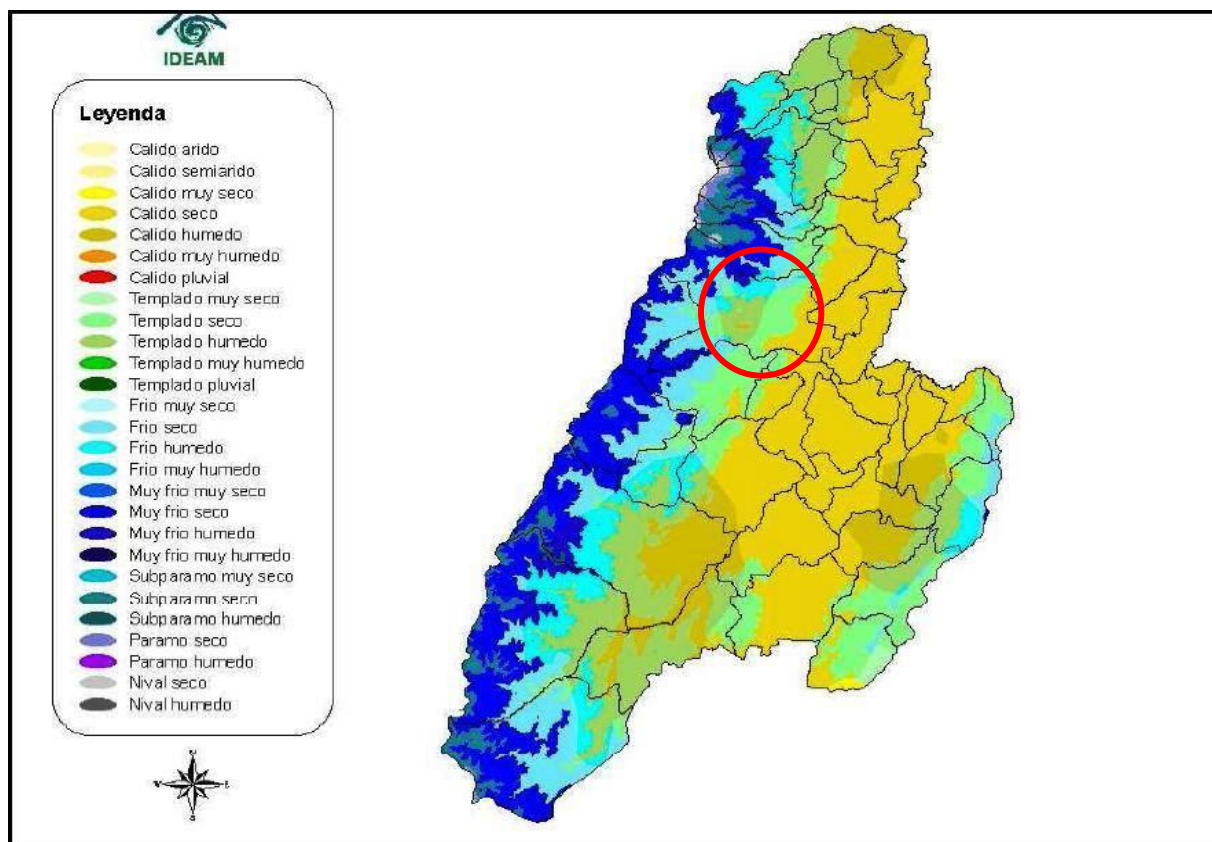


Figura 23. Clasificación Climática en el Departamento de Tolima. Fuente: IDEAM, 2005

Por estas razones se piensa que en esta zona la Humedad Relativa es tan cambiante, aún cuando no se presente una alta variabilidad de la temperatura. Así mismo, se encuentra asociada a la diversidad de altitudes de las zonas aledañas, puesto que de acuerdo a la figura 23 se aprecia la riqueza de microclimas de la zona.

2.4 BRILLO SOLAR

El brillo solar es definido habitualmente como la cantidad de radiación solar en que puede estar sometida una zona sin la presencia de nubosidad. Su duración, en horas, representa el tiempo total durante el cual incide la luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad.

El Heliofanógrafo es el instrumento que nos permite medir la duración del brillo solar. Consiste en una esfera de cristal que concentra los rayos solares y quema una faja subdividida en intervalos de tiempo, a medida que la inclinación del sol va variando, va quemando la faja, al disminuir la intensidad del brillo solar, ya sea por nubosidad u otras razones, la faja deja de quemarse. Lo anterior permite obtener un registro de las horas de sol que se tienen en el día.

Tabla 5. Horas de Brillo Solar características en zona suroriental de la ciudad de Ibagué

Brillo Solar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Horas Medias	179	140	139	135	157	172	196	195	176	159	143	163	163

Fuente: IDEAM, 2005.

Al igual como ocurrió con la humedad relativa, para obtener los índices de brillo solar más probables en el sitio de estudio, se recurrió a la información del Atlas Climatológico el cual se basó en los registros de la estación sinóptica Aeropuerto Perales. Los resultados se aprecian en la tabla 5 y la figura 24.

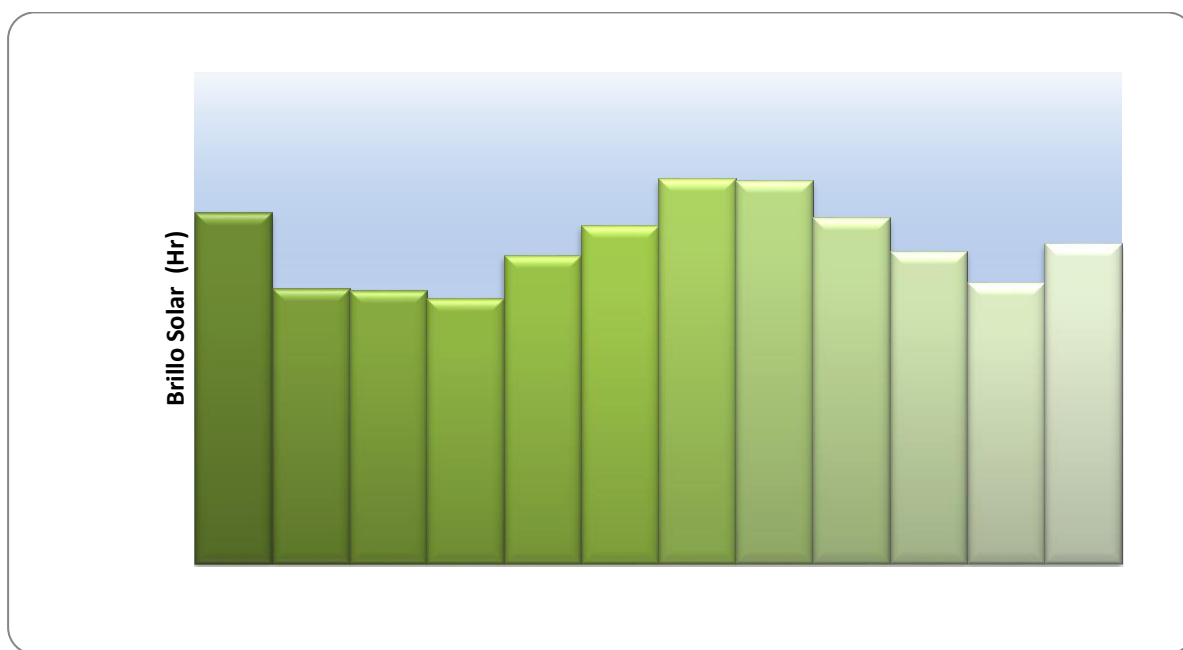


Figura 24. Horas de sol promedio en zona aferente al Aeropuerto Perales.

Fuente: IDEAM,

2005.

De acuerdo a los resultados, se logró establecer que el brillo solar en la zona corresponde a un valor promedio de 163.0 horas mensuales, así como un valor máximo de 225 horas y mínimo de 121 horas por mes.

De esta forma se puede deducir que el brillo solar diario promedio corresponde a un valor de 6.22 horas, equivalentes a un 52% del día claro. Así mismo, el valor máximo de horas de sol directo es del 7.50 horas (61 %) y mínimo de 4.30 horas (37 %).

Los máximos valores de brillo solar corresponden a los meses de verano, principalmente en el segundo periodo de “sequía” del año hidrológico, establecido entre los meses de Diciembre y Enero. Por consiguiente, la máxima evaporación debe presentarse en los meses de enero, febrero, junio, julio y diciembre.

Así mismo, se deduce que el cielo en la zona de estudio puede encontrarse parcial o totalmente cubierto de nubes durante un 10 % y un 45 % de las horas diarias de día claro, lo cual indica que la nubosidad es moderada a reducida durante gran parte del día.

2.5 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

Los vientos son movimientos horizontales de masas de aire. Se producen como consecuencia de los cambios de presión en la atmósfera. Para medir la velocidad del viento se utiliza comúnmente el anemómetro y para determinar su dirección es frecuente recurrir a la veleta o aspa de Wild. Para el análisis del comportamiento de los vientos en el sitio de estudio se recurrió a la estación Apto. Perales única en la zona equipada con los equipos anteriormente descritos.

Tabla 6. Velocidad media del viento en zona suroriental de la ciudad de Ibagué

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Velocidad Media (m/s)	3	3.1	3	2.1	2.7	3.5	4.1	4.1	3.3	2.3	2.6	2.5	3

Fuente: IDEAM, 2005.

De acuerdo a la tabla 6, se puede establecer que la velocidad del viento en la zona es bastante heterogénea debido a que, dada su ubicación en zona de altitud media depende de los cambios de presión entre las franjas altas más cercanas provenientes de la zona marina y la cordillera central.

Sin embargo, las máximas velocidades alcanzadas normalmente ocurren durante los meses de verano. La tendencia que se registra muestra que los vientos predominan en mayor magnitud durante la primera temporada de verano del año hidrológico de la zona (julio-agosto). De esta forma, los resultados obtenidos, muestran que la velocidad normal de la zona tiende a ser de 3.00 m/s, equivalente a 10.80 km/h. Así mismo, en la figura 25, concerniente al promedio multianual de la velocidad media del viento en superficie, tomada del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, se puede constatar que la velocidad en la zona se encuentra en un rango establecido entre los 2.5 m/s y 3.0 m/s, dada la variación de los vientos incidentes de acuerdo a la topografía y al relieve de la zona.

ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.

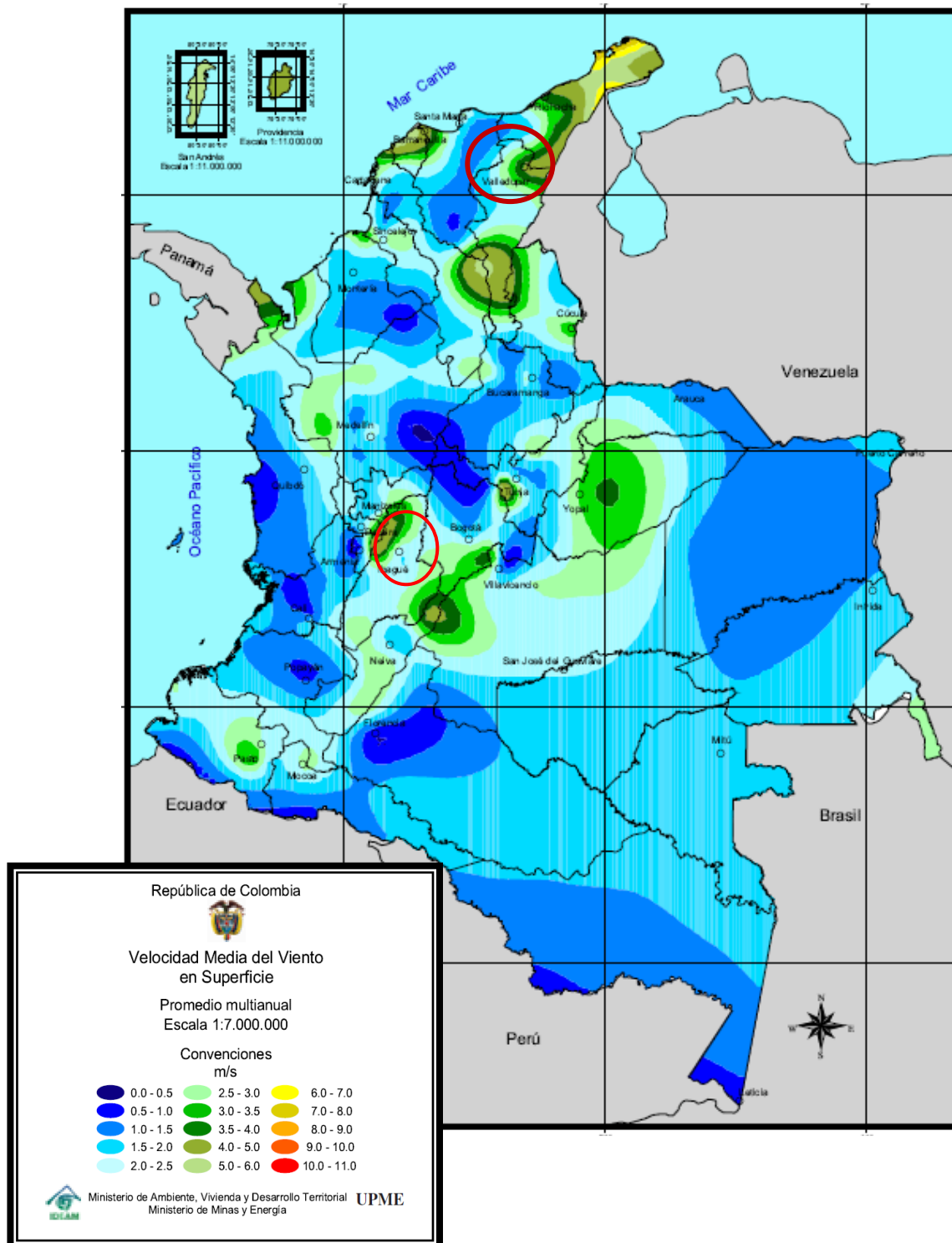


Figura 25. Velocidad media mensual del viento en Colombia. Fuente: IDEAM, 2010.

Según la escala de Beaufort establecida en la tabla 7, el valor medio de la velocidad del viento en la zona (10.80 km/h), corresponde a una brisa débil, pero debido a la alta variabilidad de la velocidad del viento con respecto a los registros intermensuales, también el viento puede caracterizarse desde una calma total a una brisa moderada. Por ende, el viento característico de la zona en condiciones normales puede generar máximo una brisa moderada donde se agitan las copas de los árboles y se puede levantar polvo y papeles.

Tabla 7. Escala de Beaufort para la caracterización de la velocidad del viento.

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Aspecto del mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	< 1	Calma	Despejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	1 a 3	Ventolina	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	4 a 6	Flojito (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	7 a 10	Flojo (Brisa débil)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	11 a 16	Bonancible (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

5	29 a 38	17 a 21	Fresquito (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	22 a 27	Fresco (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas.

Fuente: IDEAM

Con respecto a la dirección de los vientos, durante gran parte del año estos siguen una dirección Gregal o Noreste, con lo cual puede clasificarse como constante. Sin embargo, existen periodos de circulación que debido a la rotación terrestre tienden a llevar una dirección Xaloc o Sureste, el cual es notorio cuando la velocidad del viento tiende a reducirse sustancialmente. En la figura 26, se establece el compilado de información referente al comportamiento de los vientos alisios en el municipio de Ibagué (Est. Apto. Perales).

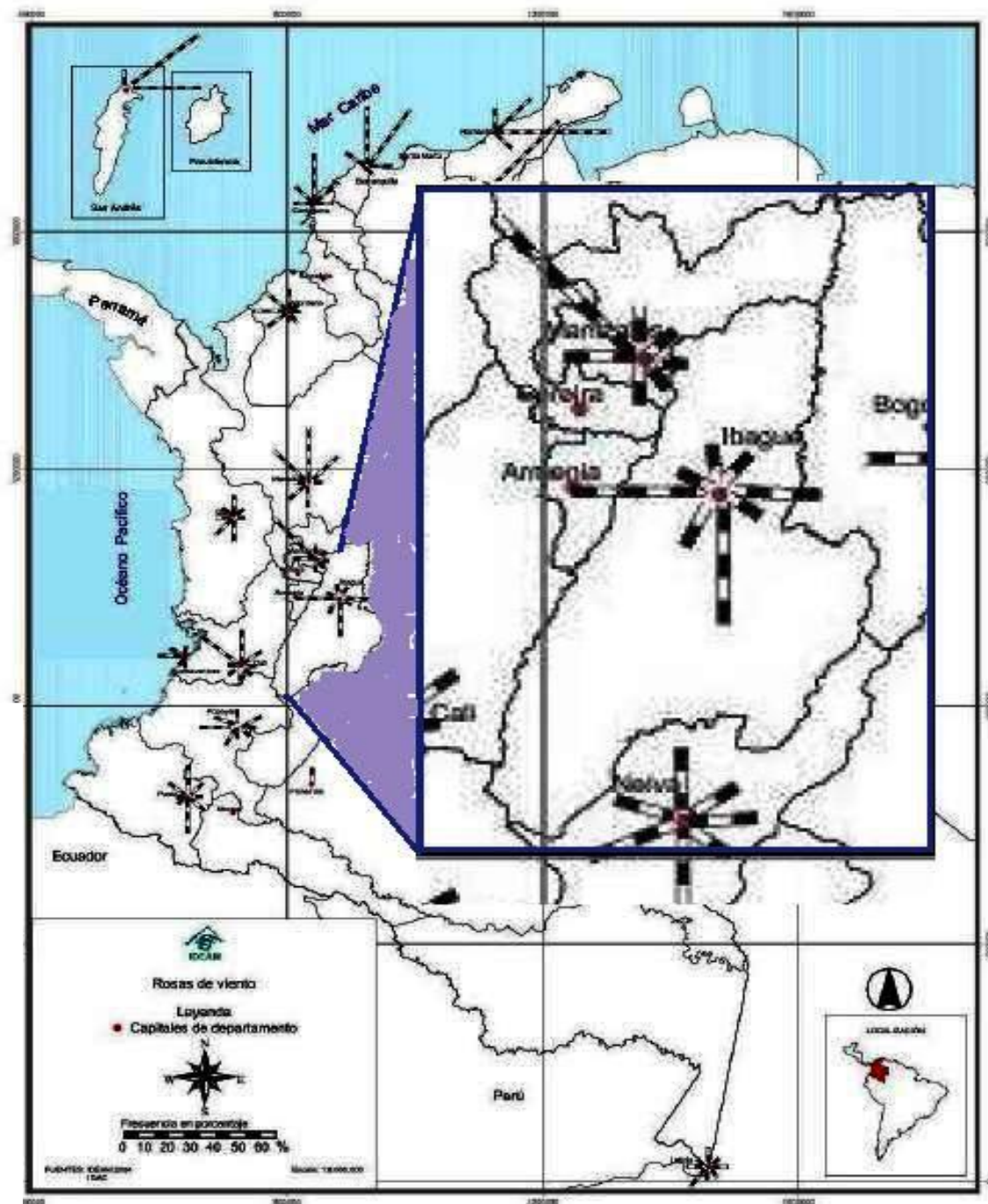


Figura 26. Rosa de vientos en el municipio de Ibagué. Fuente: IDEAM, 2010.

2.6 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación es definida habitualmente como el proceso físico por el cual el agua líquida pasa a estar en fase gaseosa, con lo cual asciende a nivel de la tropósfera. Así mismo, la mayor parte del agua evaporada por las plantas ha circulado a través de la planta, siendo absorbida por las raíces, pasando por los tejidos vasculares y saliendo por las hojas, a través de las estomas, aunque a veces también ocurre a través de la cutícula. Esta evaporación de agua a través de las plantas es la denominada transpiración. Por tanto, la evaporación del agua de fuentes superficiales sumado a la evaporación por plantas es llamada evapotranspiración. La cantidad de evapotranspiración depende fundamentalmente de la radiación solar, el poder evaporante de la Atmósfera, la Temperatura del aire, la Humedad Atmosférica, el Viento, la magnitud de las masas de agua y el nivel de salinidad.

Los evaporímetros y los lisímetros son los métodos directos para medir la evapotranspiración, pero debido al alto margen de incertidumbre que llevan consigo, existen diversos métodos para estimar su magnitud. Por esta razón, no se adquirió la información concerniente a este parámetro en las diferentes estaciones circundantes a la zona de estudio. Sin embargo, en el Atlas Climatológico se encuentra compilada la información promedio histórica de la evapotranspiración de la zona, tomada de la estación Aeropuerto Perales. Allí se encontró que esta variable fluctúa entre 1445 y 1590 mm/año. Así mismo, de acuerdo a los resultados normales de precipitación, humedad relativa, brillo solar y temperatura, se estableció un rango de evapotranspiración mensual teniendo en cuenta un valor anual de 1445 mm/año, el cual se establece en la tabla 8.

Tabla 8. Evapotranspiración potencial en zona suroriental de la ciudad de Ibagué

Medición	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Evaporación media (mm)	129	119	126	113	120	128	164	177	145	118	105	110	1554
Evapotranspiración Potencial (mm)	120	110	117	106	111	121	148	158	135	112	100	107	1445

Fuente: IDEAM, 2005.

Esto implica una tendencia al exceso de agua en el suelo en la mayoría de meses del año, aunque la evapotranspiración es alta durante los meses de junio y julio, hasta el punto de generar déficit de agua en ese periodo. Dentro de los factores que más inciden en este comportamiento, se encuentran los vientos alisios del NE debido gracias a su acción secante en gran parte del año hidrológico, aunque la humedad relativa permite que se generen estos excesos, orientando el balance hídrico en la región (figura 27).

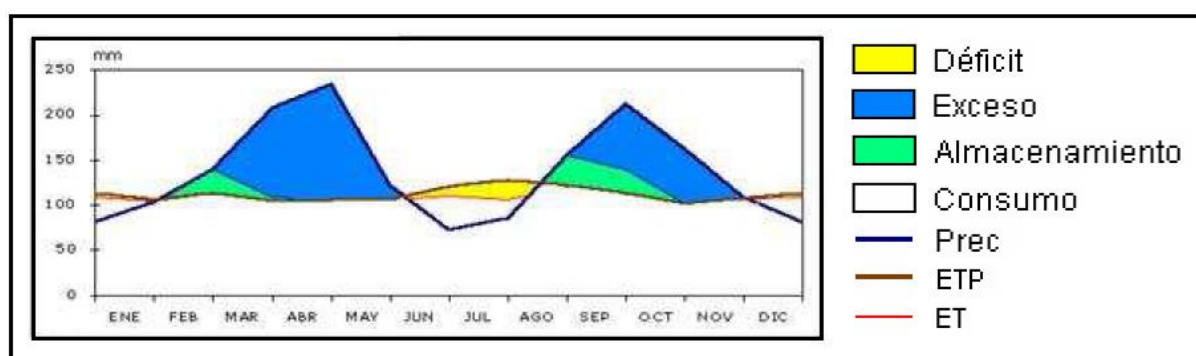


Figura 27. Balance hídrico en la zona suroriental de la ciudad de Ibagué.
2005

Fuente: IDEAM,

3. CAUDALES MEDIOS EN HIDROSISTEMAS DE ESTUDIO

Debido a que no se encontró información concerniente a registros de caudales históricos en la quebrada La Opia y el drenaje intermitente, durante el día lunes 7 de noviembre de 2011, bajo una mañana calurosa y con bastante brillo solar, se efectuaron aforos a cada una de ellas, de acuerdo a la definición de las secciones transversales, desarrollando la siguiente metodología:

1. Se determinó sobre cada una de las secciones de aforos, una línea transversal al escurrimiento, midiendo su longitud entre ambos extremos.
2. A partir de la línea transversal se determinó la vertical de medición.
3. Se midió la profundidad en las verticales.
4. Se determinó la velocidad de circulación del agua.
5. Se calculó el área de cada tramo de sección de acuerdo al producto de la velocidad (V_i) por el área (A_i), de la siguiente forma:

$$Q_i = v_i * A_i$$

Se escogió efectuar el aforo en un tramo comprendido entre las aletas norte del pontón (que da paso a la vía paralela al tren) y un sector bien definido del cauce aguas abajo del mismo, a una distancia total de 21 m.

Tabla 9. Determinación del caudal medio de la Quebrada La Opia

No. Prueba	Aspecto general	Valor	Unidad
-	Ubicación	21 m, aguas abajo del pontón	-
	Ancho de la sección	0.65	M
	Profundidad media	0,32	M
	Área	0.21	m ²
1	Longitud de medida (distancia)	21	M
	Tiempo de viaje flotador	53.2	Seg
	Velocidad media	0.39	m/seg
2	Longitud de medida (distancia)	21	M
	Tiempo de viaje flotador	54	Seg
	Velocidad media	0.39	m/seg
-	Caudal	0.081	m ³ /seg

		81.12	l/seg
--	--	-------	-------

El caudal calculado en la tabla 9 incluye el agua del cauce principal conformada por: (i) El caudal que sale de la descarga de la tubería en concreto que da inicio a la corriente a flujo libre, (ii) el agua proveniente de las vertientes (flechas de la figura 28) y (iii) caudales de aguas residuales provenientes de asentamientos subnormales.

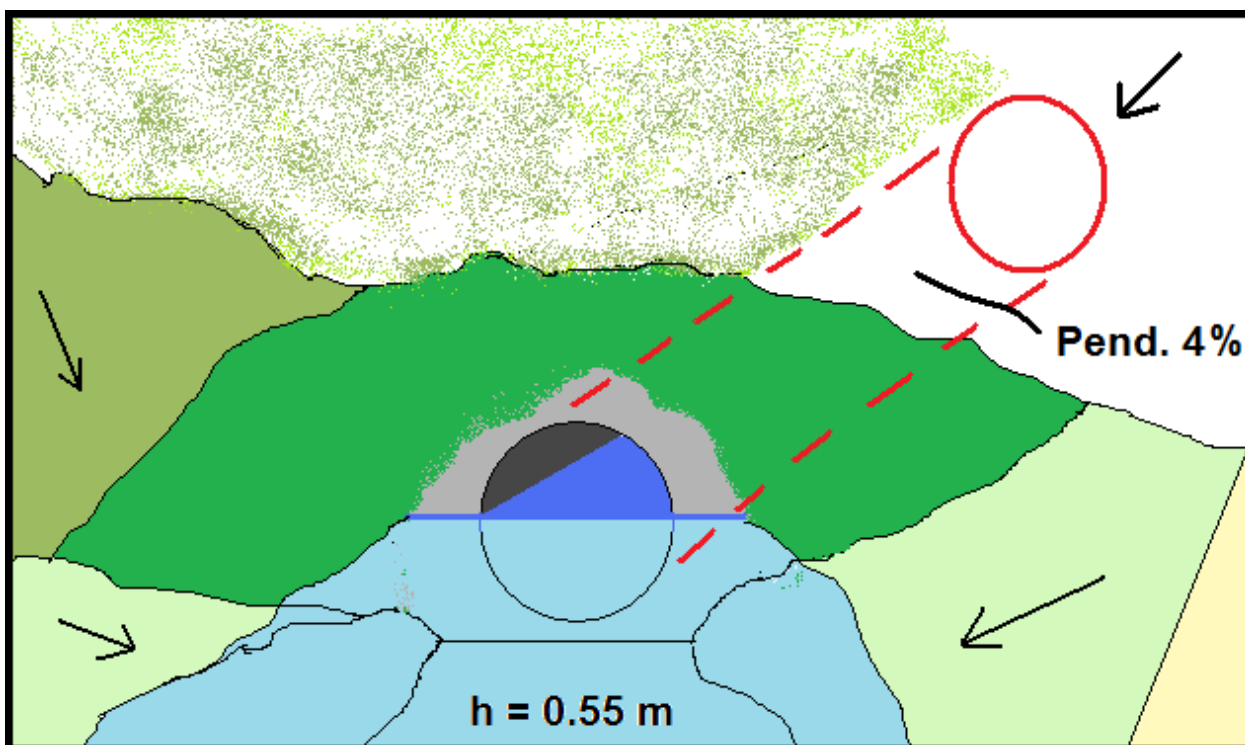


Figura 28. Esquema general de la tubería que da inicio a la quebrada La Opía y aguas de vertiente que caen a su paso.

Por su parte, para el drenaje intermitente también se efectuó un aforo, aún cuando el agua circulante por el mismo era casi inexistente, pero se identificaron rasgos de niveles mayores al que presentaba en ese instante. De esta forma, en la tabla 10 se establece el caudal resultante. Sin embargo, aguas abajo

los canales artificiales arrojan sus aguas al bajo anegable, con lo cual el caudal aumenta significativamente hasta 55.70 l/seg.

Tabla 10. Determinación del caudal medio del drenaje intermitente

No. Prueba	Aspecto general	Valor	Unidad
-	Ubicación	38 m, aguas debajo de la industria Comercial Nutresa	-
	Ancho de la sección	0.27	m
	Profundidad media	0,05	m
	Área	0.13	m ²
1	Longitud de medida (distancia)	38.00	m
	Tiempo de viaje flotador	173	Seg
	Velocidad media	0.22	m/seg
-	Caudal en zona alta y media del predio El Jardín	0.0286	m ³ /seg
		28.60	l/seg
-	Caudal zona baja del predio El Jardín	55.70	l/seg

6. ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PROBABLES

El análisis de los caudales máximos esperados en las cuencas hidrográficas de la quebrada La Opía y el drenaje intermitente del bajo anegable, se efectuó teniendo en cuenta diversos factores entre los cuales se incluyen: (i) la zona donde se localizan, (ii) la presencia de estaciones hidrométricas ubicadas en las zonas aferentes al estudio, (iii) la calidad de los datos registrados por estas estaciones, (iv) el comportamiento hidrológico de la zona, y (v) la magnitud del área de la cuenca hasta el punto final de circulación en el predio El Jardín.

De acuerdo al estado del arte en hidrología urbana, existen diferentes métodos para determinar los caudales máximos esperados, entre ellos se encuentran las mediciones directas tomadas por medio de Estaciones Hidrométricas cercanas las cuales, de acuerdo al régimen hidrológico y su variación espacio-temporal, puede contribuir a estimar caudales cercanos a los reales en diferentes períodos de retorno, siempre y cuando las características hidrológicas y morfométrica de las cuencas sean similares (Chow, 1993).

Otro método ampliamente utilizado consiste en realizar un análisis lluvia-cuenca, efectuando una serie de aforos y asociar las fechas de ejecución de cada uno de ellos con la precipitación media histórica, con miras a generar un análisis de frecuencias estadísticas. De esta forma y con la elaboración de la curva IDF de la zona se puede terminar el caudal máximo de creciente para un periodo de retorno de 50 y 100 años, teniendo en cuenta el método racional.

4.1 CURVA INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA

En cualquier proyecto hidráulico conocer los datos de caudales máximos resulta imprescindible. Sin embargo, generalmente no se dispone de registros de caudales extremos, o éstos no tienen la suficiente duración como para hacer los análisis estadísticos requeridos con el objetivo de generar resultados de alta confiabilidad (Viessman K., et. Al., 1977; Vargas R., et. al., 1998; Pizarro Tapia R., et. Al., 2001).

Por esta razón, habitualmente se acude a tratar la información pluviométrica para estimar las crecientes asociadas a una cierta frecuencia de ocurrencia. La forma más común de hacerlo suele ser la utilización de una lluvia de diseño o un evento que involucre una intensidad, una duración y una frecuencia o periodo de retorno. Esta relación genera las curvas IDF, las cuales se definen como aquella representación gráfica que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Silva Medina, 1984; Pizarro Tapia R., et. Al., 2001).

Estas curvas tienen la ventaja de sintetizar las características de los eventos extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con períodos de retorno específicos (Silva Medina, 1984). Las curvas IDF deben ser obtenidas de la información pluviográfica de estaciones ubicadas en la zona de estudio, derivando las curvas de frecuencia correspondientes mediante análisis puntuales de frecuencia de eventos extremos máximos. Diversos autores recomiendan la distribución probabilística de Gumbel y los Parametros del Departamento Meteorológico de los Estados Unidos (U.S. Weather Bureau) y de D.M. Hershfield y W.T. Wilson para este tipo de análisis.

El método establecido por el Departamento Meteorológico de los Estados Unidos (U.S. Weather Bureau) y de D.M. Hershfield y W.T. Wilson, se basa en mediciones históricas efectuadas en diferentes estados del país nórdico, de los cuales al final se desarrolló una ecuación para estimar la precipitación máxima por medio de análisis estadísticos de frecuencia para diferentes periodos de retorno, generando muy buenos resultados. La ecuación es la siguiente:

$$P_{\max} = P_{\text{med}} - \frac{S_p}{\sigma n} \left(Y_n + \ln \left(\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right) \right)$$

Donde:

$P_{\max}$ = Precipitación máxima para un periodo de retorno establecido,

P_{med} = Precipitación media interanual,

Y_n = Valores de probabilidad concernientes al método de Gumbel,

S_p = Media aritmética,

Σ_n = Desviación estándar,

T_r = Periodo de retorno establecido.

Por su parte, este método puede utilizarse para el nivel de complejidad del estudio de acuerdo a las recomendaciones del Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, en donde establece la manera mínima permitida de obtención de las curvas IDF, definidas en la Tabla 11.

Tabla 11. Forma mínima de obtención de Curvas IDF

Nivel de complejidad del sistema	Obtención mínima de curvas IDF
Bajo y medio	Sintética
Medio alto	Información pluviográfica regional
Alto	Información pluviográfica local

Fuente: RAS 2000

Por esta razón, se utilizó la estación Sinóptica Secundaria identificada bajo código 21245040 y nombrada “Aeropuerto Perales”, debido a que cuenta con datos ininterrumpidos y de gran confiabilidad. Por el contrario, la estación Cruz Roja no fue tomada en cuenta para el presente análisis debido a que únicamente posee registros entre los años 1997 y 2008, con algunos periodos en donde no se tomaron datos.

En la siguiente tabla se presentan las intensidades máximas anuales en 24 horas estimadas para la estación Aeropuerto Perales. Seguidamente, se estipula la distribución temporal de las lluvias en la zona para diferentes periodos de retorno, dando lugar a las curvas IDF.

Tabla 12. Valores máximos mensuales de precipitación en 24 horas (mm)

No.	Año	Total	No.	Año	Total
1	1981	67.0	16	1996	90.6
2	1982	57.8	17	1997	76.4
3	1983	107.0	18	1998	78.4
4	1984	81.0	19	1999	68.8
5	1985	61.0	20	2000	65.1
6	1986	68.2	21	2001	65.2
7	1987	73.4	22	2002	83.0
8	1988	66.5	23	2003	80.8
9	1989	132.0	24	2004	85.7
10	1990	58.0	25	2005	79.0
11	1991	58.0	26	2006	78.2
12	1992	58.5	27	2007	78.6
13	1993	75.8	28	2008	81.0
14	1994	61.0	29	2009	57.5
15	1995	89.3	30	2010	92.7

Fuente: IDEAM, 2011

Obteniendo la serie de precipitación máxima en 24 horas se procedió a utilizar la distribución probabilística de Gumbel para hallar la distribución teórica que más se aproxima a la serie histórica estipulada en la tabla 12. Los estadígrafos se pueden apreciar en la tabla 13.

Tabla 13. Estadígrafos Series de Precipitación Máxima en 24 horas

Estadígrafo	Valor
Valor medio	75,85
Número de datos	30
Desviación Estándar	1.1124
Sp	16.201
Yn	0.5362
Distribución recomendada	Gumbel Tipo I

4.1.1 El método de Gumbel

El método de Gumbel permite encontrar el “valor máximo” que se quiere determinar para un determinado período de retorno hidrológico, por lo cual es ampliamente usado a través de la expresión:

$$x = x_m + D_x = x_m + k * s_{n-1}$$

Donde:

x: corresponde al valor máximo (precipitación) para un período de retorno T,

x_m : es la media de la serie dada de valores máximos,

D x: desviación respecto a la media, estimada mediante el producto: $k * s_{n-1}$

k: factor de frecuencia que indica el número de veces de desviación típica en que el valor extremo considerado excede a la media de la serie.

s n-1 : desviación estándar, desviación típica de los valores extremos.

El valor de la variable “k” se estima a partir del conocimiento del período de retorno en años y del número de años disponibles en la serie. Así:

$$k = (y_T - y_n) / S_n$$

Donde:

y_T : variable de Gumbel para el período de retorno T. Se determina a partir del valor del período de retorno. El valor se puede obtener por tabulación.

$$y_T = - \ln \ln (T/T-1)$$

y_n : valor que se obtiene a partir del número de años de la serie, mediante tablas

S_n : valor que se obtiene a partir del número de años de la serie, mediante tablas

4.1.2 Intensidad Vs periodos de retorno

A partir de los registros de precipitación se seleccionó para cada año los valores extremos de precipitación asociados a diferentes duraciones de acuerdo a las recomendaciones del Departamento Meteorológico de los Estados Unidos. De esta forma se tabuló la curva Precipitación-Duración-Tiempo de retorno.

Tabla 14. Tabulación interacción Precipitación – Duración – Periodo de Retorno

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

Duración	Periodo de Retorno Tr (Años)							
(min)	2.33	3	5	10	15	25	50	100
5	11.5	12.2	13.5	15.1	16.0	17.2	18.7	20.3
10	17.2	18.3	20.2	22.7	24.1	25.8	28.1	30.4
15	21.8	23.1	25.6	28.7	30.5	32.7	35.6	38.5
30	30.2	32.1	35.5	39.8	42.3	45.3	49.3	53.3
45	34.8	36.9	40.9	45.9	48.7	52.2	56.8	61.4
60	38.2	40.6	44.9	50.4	53.5	57.3	62.4	67.5
120	47.8	50.7	56.2	63.0	66.9	71.6	78.0	84.4
1440	76.5	81.19	89.9	100.8	107.0	114.62	124.87	135.04

De esta forma, se determinaron las intensidades máximas de acuerdo a diferentes periodos de retorno estipulados (tabla 15), los cuales fueron establecidos de acuerdo a la probabilidad de excedencia de los registros máximos, correspondientes a periodos de 2.33, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 15. Resultados de la regresión lineal de las intensidades Calculadas. IDF

Logaritmo Natural Duración	Logaritmo Natural de las intensidades según Tr (Años)							
	2.33	3	5	10	15	25	50	100
1.6094	4.9247	4.9846	5.0863	5.2011	5.2604	5.3294	5.4151	5.4933
2.3026	4.6370	4.6969	4.7986	4.9134	4.9728	5.0418	5.1274	5.2057
2.7081	4.4679	4.5278	4.6296	4.7443	4.8037	4.8727	4.9583	5.0366
3.4012	4.1011	4.1610	4.2628	4.3776	4.4369	4.5059	4.5915	4.6698
3.8067	3.8371	3.8970	3.9988	4.1135	4.1729	4.2419	4.3275	4.4058
4.0943	3.6437	3.7036	3.8054	3.9201	3.9795	4.0485	4.1341	4.2124
4.7875	3.1737	3.2336	3.3354	3.4501	3.5095	3.5785	3.6641	3.7424

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

7.2724	1.1588	1.2187	1.3205	1.4352	1.4946	1.5636	1.6492	1.7275
c (b)	522.6	554.8	614.3	689.0	731.1	783.4	853.4	922.9
n (m)	-0.6713	-0.6713	-0.6713	-0.6713	-0.6713	-0.6713	-0.6713	-0.6713
Regresión lineal con los periodos de retorno								
Ln Tr	0.84586	1.098612	1.609437	2.30258	2.708050	3.218875	3.912023	4.6051709
Ln C	6.258792	6.318696	6.420470	6.53529	6.594585	6.663590	6.749194	6.8274836
K (b)	488.26217							
m (m)	0.1504558							

Seguidamente se generó la curva Intensidad – Duración- Periodo de retorno, de acuerdo a los resultados de la tabla 14, de acuerdo a que se tomaron los valores de cada una de las series y se dividieron entre su duración (en horas), obteniéndose de esta forma, las intensidades en mm/h. los resultados se compilan en la tabla 16. De esta forma se construyó la curva Intensidad-Duración-Frecuencia IDF, para la zona suroriental de la ciudad de Ibagué, en donde se encuentra ubicado el proyecto (figura 29).

Tabla 16. Tabulación interacción Intensidad – Duración – Periodo de Retorno

Duración	Periodo de Retorno Tr (Años)							
(min)	2.33	3	5	10	15	25	50	100
5	137.6	146.1	161.8	181.5	192.6	206.3	224.8	243.1
10	103.2	109.6	121.3	136.1	144.4	154.7	168.6	182.3
15	87.2	92.6	102.5	114.9	122.0	130.7	142.4	153.9
30	60.4	64.1	71.0	79.6	84.5	90.6	98.6	106.7
45	46.4	49.3	54.5	61.2	64.9	69.5	75.8	81.9
60	38.2	40.6	44.9	50.4	53.5	57.3	62.4	67.5
120	23.9	25.4	28.1	31.5	33.4	35.8	39.0	42.2

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

1440	3.2	3.4	3.7	4.2	4.5	4.8	5.2	5.6
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.

CURVA I-D-F
AEROPUERTO PERALES - SURORIENTE CIUDAD DE IBAGUÉ

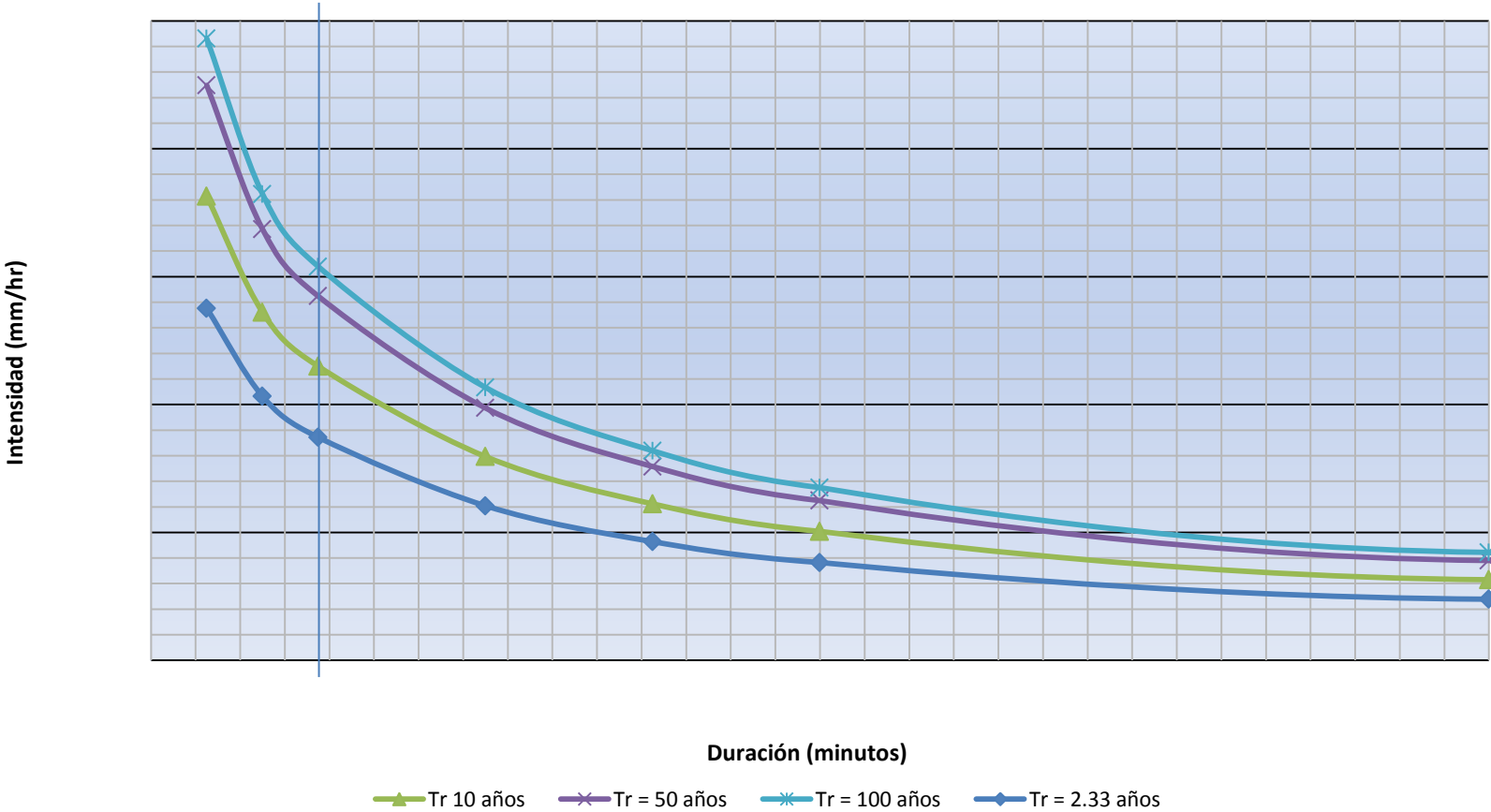


Figura 29. Curva Intensidad – Duración – Frecuencia para la zona suroriental de la ciudad de Ibagué

4.2 CAUDALES DE CRECIENTE A TRAVÉS DEL MÉTODO RACIONAL

Cuando no se tiene mayor información acerca de las crecientes que un hidrosistema ha presentado a lo largo de su historia, la Hidrología suele acudir a algunos métodos lluvia-escorrentía, de los cuales el *Método Racional* desarrollado en 1889, debido a su simplicidad es ampliamente aplicado. Este método consiste en una fórmula que permite calcular los caudales de creciente en cuencas pequeñas, a partir de los datos de precipitación y de las condiciones de escorrentía de la cuenca vertiente.

Su hipótesis fundamental se encuentra basada en que una lluvia constante y uniforme que cae sobre la cuenca de estudio, producirá un caudal de descarga el cual alcanza su valor máximo cuando todos los puntos de la cuenca están contribuyendo al mismo tiempo en el punto de diseño.

Su expresión es:

$$Q = 2.78 C * I * A \quad \left[\frac{L^3}{T} \right] = C * \left[\frac{L}{T} \right] L^2$$

Donde: Q = Caudal de creciente para un periodo de retorno especificado (L/s),

C = Coeficiente de escorrentía de la cuenca (adimensional),

I = Intensidad máxima de lluvia para un periodo de retorno dado (mm/hr),

A = Área de la cuenca vertiente (Ha).

De esta forma, teniendo como datos de entrada el área de la cuenca y la intensidad de las lluvias en la zona de estudio generadas a través de la curva IDF, se procedió a estimar el valor más apropiado del coeficiente de escorrentía, tomado de la tabla 17.

Tabla 17. Coeficientes de Escorrentía Característicos en zonas periurbanas

TIPO DE SUPERFICIE	C
Cubiertas	0.75 – 0.95
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0.70 – 0.95
Vías adoquinadas	0.70 – 0.85
Zonas comerciales o industriales	0.60 – 0.95
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0.75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre éstos	0.60 – 0.75
Residencial unifamiliar, con casas contiguos y predominio de jardines	0.40 – 0.60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0.45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques cementerios	0.30
Laderas sin vegetación	0.60
Laderas – mesetas con vegetación	0.30
Parques recreacionales	0.20 – 0.35
Asfalto o pavimento en concreto	0.85

Fuente: Viessman, *et. al.*, 1977.

Teniendo en cuenta que el terreno es casi plano, con una pendiente baja, con alta presencia de material orgánico y vegetación presente en casi la totalidad del predio, para ambos hidrosistemas se tomó como coeficiente de escorrentía el valor concerniente a laderas – mesetas con vegetación (0.30). De esta forma, se calculó el caudal de creciente, secuencia que se encuentra resumida en la tabla 18.

Tabla 18. Caudal de creciente estimado para la Quebrada La Opia a su paso por el predio El Jardín.

Periodo de retorno (años)	Área de la cuenca		Coeficiente de Escorrentía	Intensidad (mm/hr)	Caudal de creciente (L/s)	Caudal tubería (L/s)	Caudal de Creciente ajustado (L/s)
	(m ²)	(Ha)					
2.33	6440.63	0.6441	0.30	87.50	47.00	13.00	60.00
3				92.60	49.74		62.74
5				102.50	55.06		68.06
10				114.90	61.72		74.72
15				122.00	65.53		78.53
25				130.70	70.21		83.21
50				142.40	76.49		89.49
100				153.90	82.67		95.67

El análisis efectuado a la corriente La Opia dejó como resultado que el caudal máximo probable que está quebrada transportará para un periodo de retorno de 100 años es de 82.67 litros por segundo, valor equivalente a 0.082 m³/seg. Ahora bien, teniendo en cuenta que esta unidad de cuenca presenta como característica especial una elevada intervención antrópica y un caudal inicial inducido que alteró significativamente la dinámica lítica de las aguas de la cuenca, y a raíz de que actualmente es casi imposible determinar el cauce original de la unidad de cuenca, se optó por sumar el caudal máximo que puede transportar la tubería que da inicio a dicha corriente (13 l/seg), por tanto, el caudal total que la quebrada La Opia transportará para el periodo de retorno antes mencionado será de 95.67 l/seg equivalente a 0.096 m³/seg.

Por su parte, para el drenaje intermitente también se efectuó el análisis de creciente, el cual se encuentra compilado en la tabla 19. Como resultado, el método especifica que el caudal máximo que circulará por el bajo anegable para un periodo de retorno de 100 años es del orden de 99.16 litros por segundo (l/seg).

Tabla 18. Caudal de creciente estimado para el drenaje intermitente a su paso por el predio El Jardín.

Periodo de retorno (años)	Área de la cuenca		Coeficiente de Escorrentía	Intensidad (mm/hr)	Caudal de creciente (L/s)
	(m2)	(Ha)			
2.33	7725.78	0.772578	0.30	87.50	56.38
3				92.60	59.66
5				102.50	66.04
10				114.90	74.03
15				122.00	78.61
25				130.70	84.21
50				142.40	91.75
100				153.90	99.16

7. TRÁNSITO DE LA CRECIENTE

Los valores resultantes del análisis de caudales máximos de la Corrientes lólicas La Opia y drenaje intermitente fueron modelados a través del software Hec-Ras 4.1.0, con el objetivo de conocer el posible comportamiento de cada uno de ellos las crecientes de diseño de 50 y 100 años de periodo de retorno.

El programa Hec-Ras 4.1.0 es un software de distribución libre desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU., el cual permite conocer el comportamiento de un hidrosistema superficial lótico ante un caudal normal o de avenida, mediante la utilización de las ecuaciones de Navier Stokes y las derivadas parciales basadas en los principios de conservación de masa y conservación de momentum.

Para el análisis del comportamiento hidráulico de los tramos en estudio, el modelo hidráulico se desarrolló plasmando las secciones transversales de la zona de inundación, tomadas por el equipo de topografía. Así mismo, se definió el relieve típico de la zona superior y media de cada corriente, con el objetivo de plasmar en el diseño las propiedades de cada hidrosistema de una forma muy cercana a la realidad. En los siguientes numerales se especifican algunos de los aspectos más importantes en consideración.

1. *Coefficiente de Rugosidad de Manning*

Seguidamente, se estimó el coeficiente de rugosidad de Manning de acuerdo a las tipologías de relieve de las zonas de estudio y de la caracterización básica de los sedimentos de fondo de dichos hidrosistemas. De esta forma, utilizando un análisis visual tabulado de acuerdo a las experiencias de campo de Cowan, Einstein-Lazarova, Toffaleti y Yang 1993 (Barnes, 1987; Chow, 1993), para la quebrada La Opia se estimó dicho coeficiente en 0.024. Sin embargo, debido al cambio de lecho de fondo y al relieve de la zona baja de la cuenca en la zona media-superior de análisis, las secciones más bajas de la corriente, aguas abajo del predio El Jardín, fueron valorados en 0.026.

Por su parte, para el drenaje intermitente el coeficiente de rugosidad fue estimado en 0.024, aunque igual que en el caso anterior, las secciones transversales más distantes, aguas abajo hablando, obtuvieron un valor de 0.027.

2. *Condiciones de Frontera y Caudales*

Para ambos hidrosistemas, mediante una previa estructuración de la topología del proyecto en el programa Hec Ras, se incluyeron los caudales concernientes a un periodo de retorno de 50 y 100 años evaluados a través del modelo lluvia-escorrentía, teniendo en cuenta tanto el caudal máximo promedio, como el máximo intermensual obtenido.

En las figuras 30 y 31 se pueden apreciar los recorridos y las secciones transversales de los hidrosistemas en estudio al paso por el predio El Jardín. De igual forma, se establecieron las condiciones de contorno y de flujo permanente en cada uno de ellos.

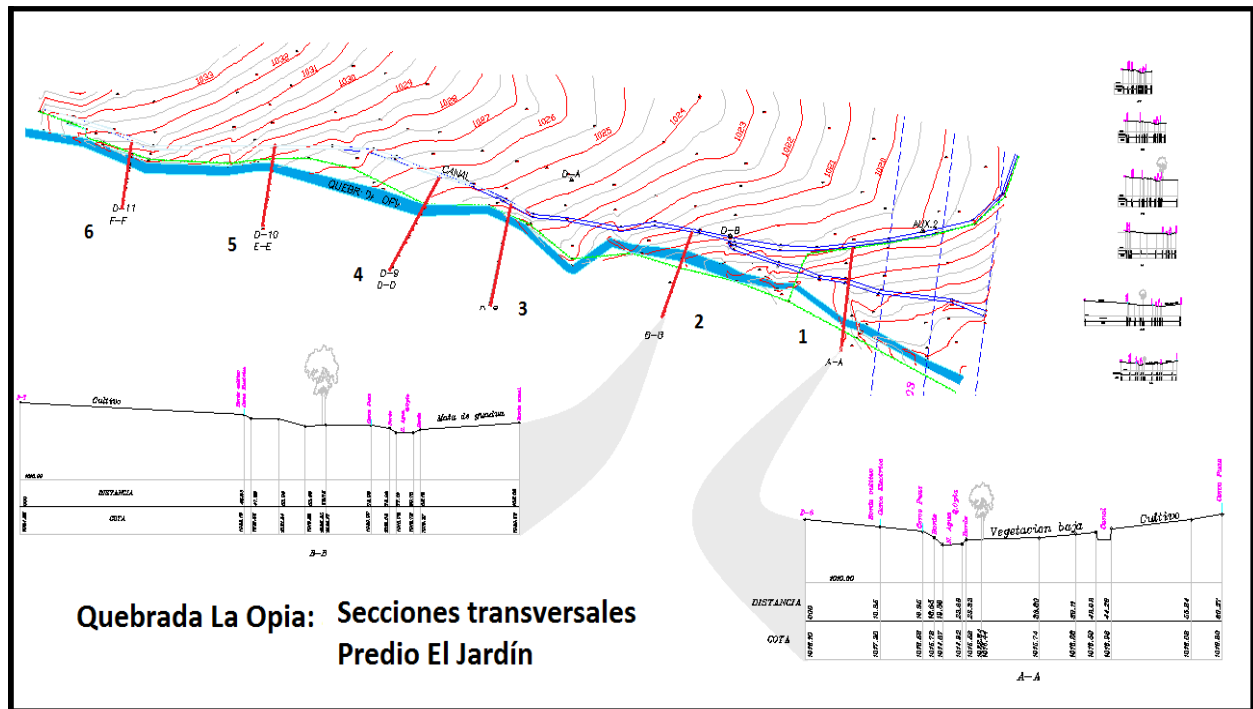


Figura 30. Secciones transversales levantadas para el análisis de tránsito de la Quebrada La Opia.

creciente en

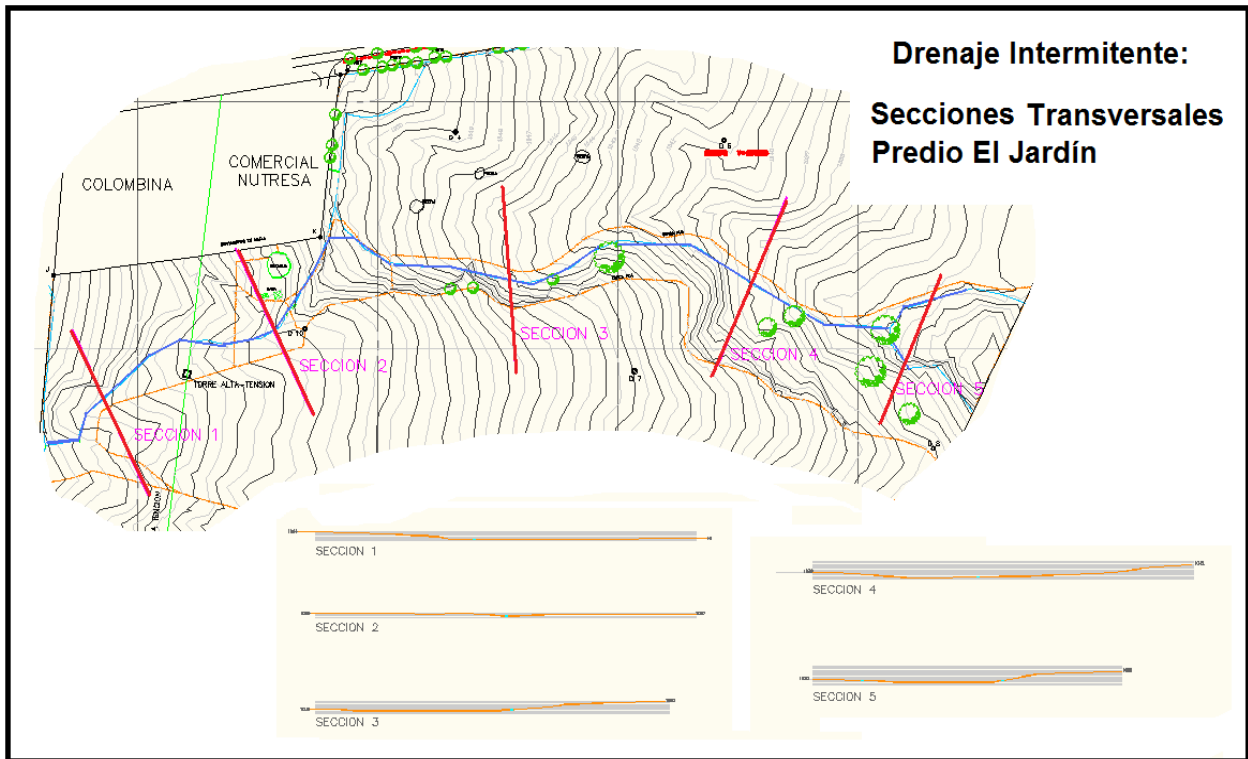


Figura 31. Secciones transversales levantadas para el análisis de tránsito de la creciente en el Drenaje Intermitente.

1. RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de realizar el ajuste de la topología donde se incluyó un total de seis secciones transversales para generar el tramo de recorrido de la avenida, (figura 30), se logró establecer que el tránsito de la creciente para el caudal esperado en la quebrada La Opia, estimado en 95.67 l/seg, aunque es significativo con respecto al caudal normal que transporta, no sobrepasaría las secciones máximas del canal principal.

ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.

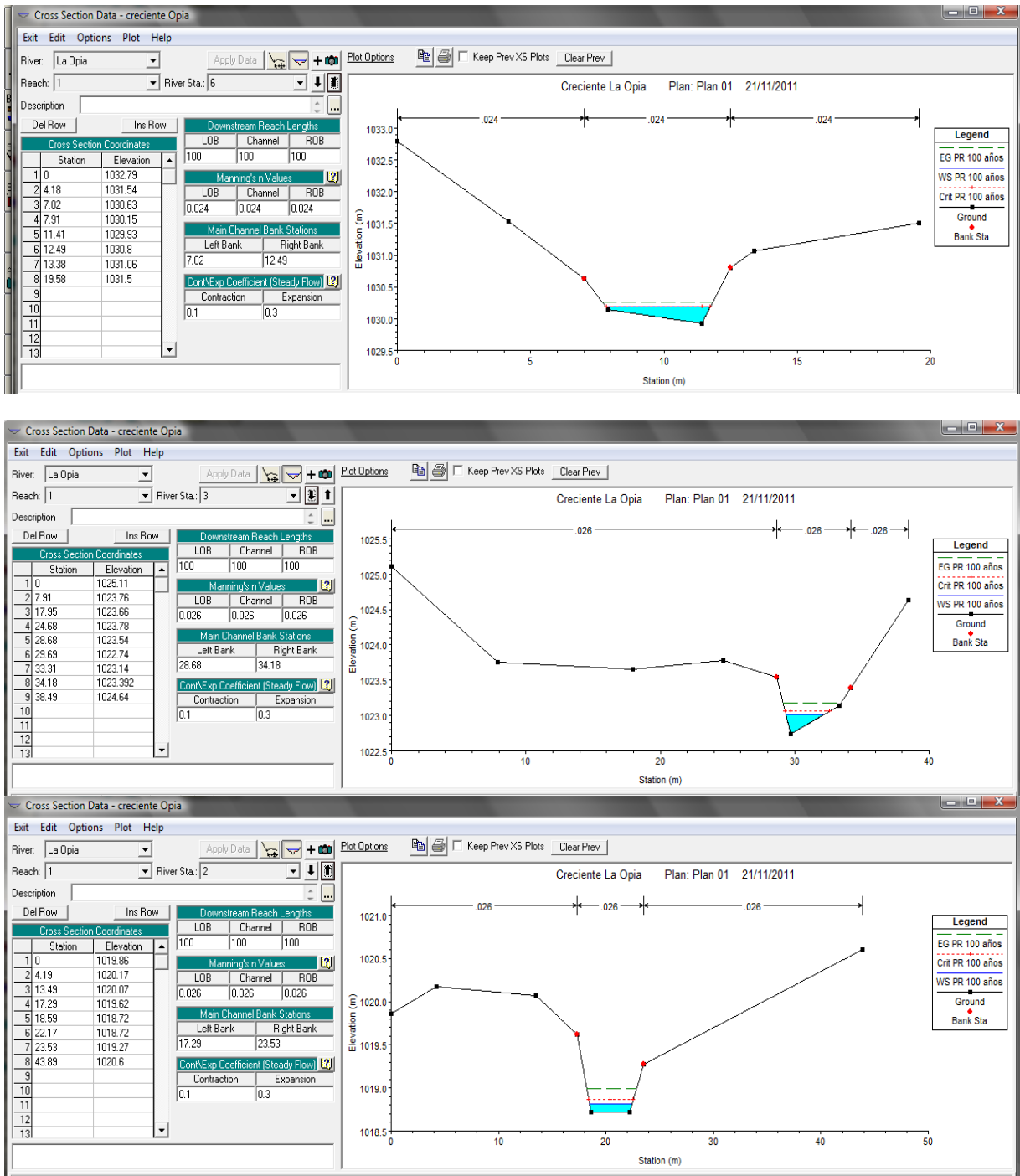


Figura 32. Comportamiento de la creciente de diseño en la quebrada La Opia

De acuerdo a la rugosidad del terreno lateral y de fondo, el suelo de la zona de estudio posee adecuadas condiciones filtrantes, lo cual sumado a la pendiente baja, al tipo relieve en la zona alta de la hoya hidrográfica, a la sinuosidad del cauce, a la morfometría de la unidad de cuenca, pero en especial a las características antrópicas de la misma, se permite determinar que el caudal circula rápidamente en un régimen de flujo supercrítico, permitiendo que la lámina de agua no sobrepase el nivel de cauce máximo de la sección transversal (puntos rojos figura 32), con lo cual la creciente no llegaría a la llanura de inundación generada por la cuenca original. En la figura 33 se puede apreciar el tránsito de la creciente por la corriente.

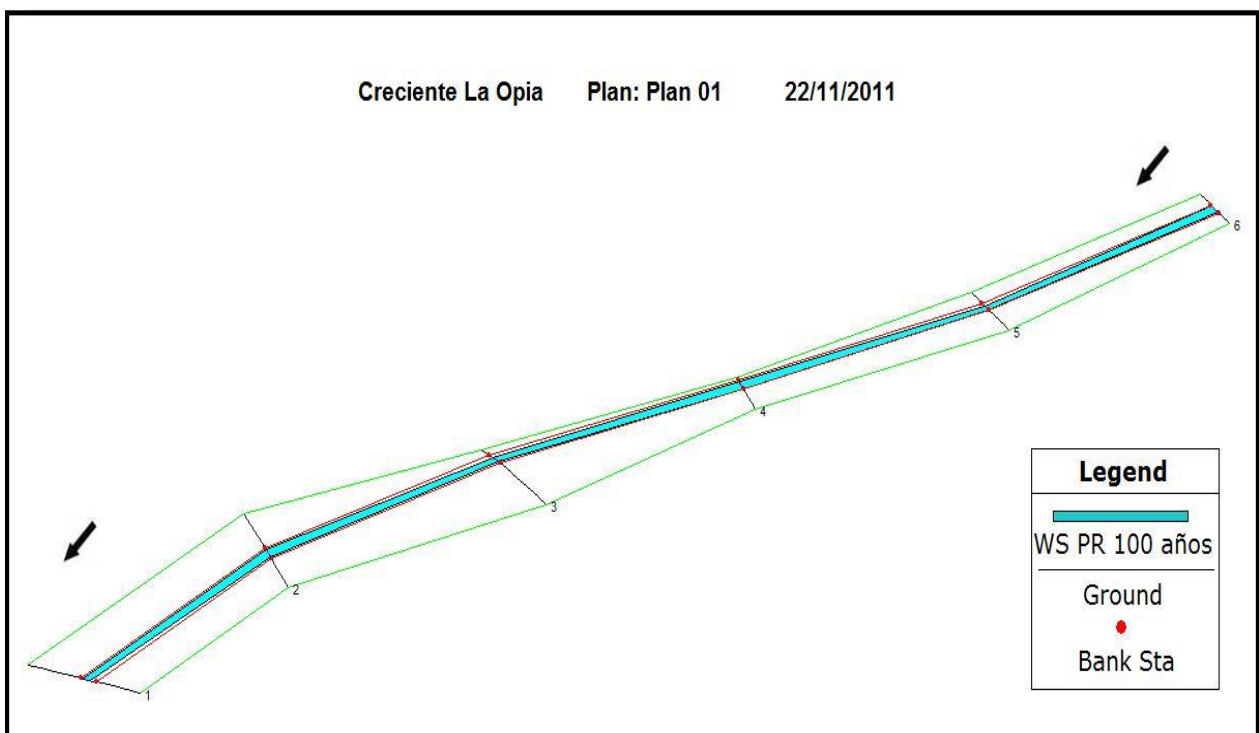


Figura 33. Tránsito de la creciente ante un periodo de retorno de 100 años en la quebrada La Opia.

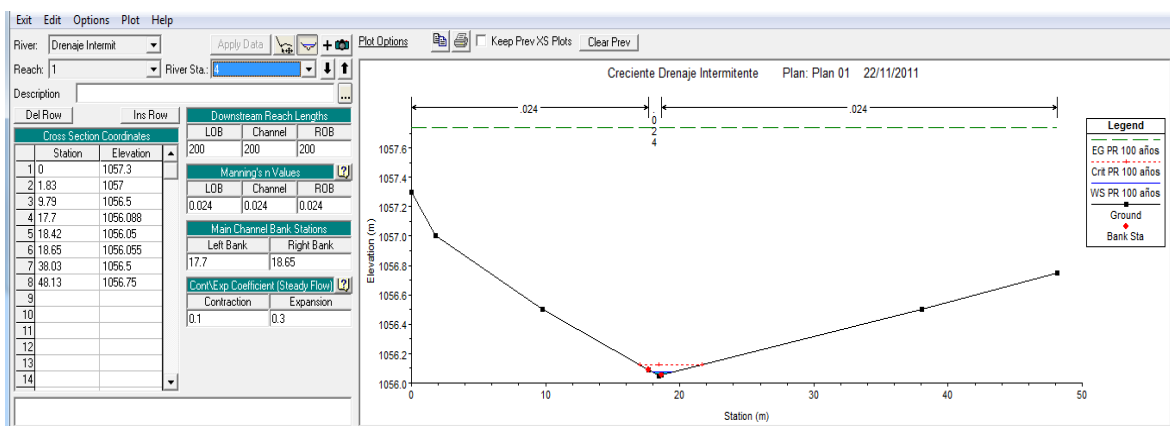
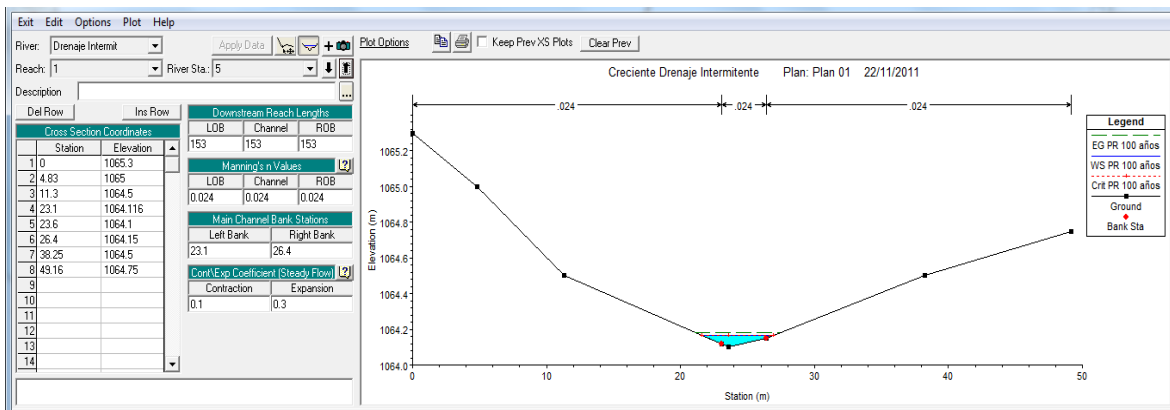
Por ende, la posibilidad de desbordamiento es muy reducida, puesto que ésta se consideraría en caso de un posible “represamiento” o una creciente con bastante transporte de sedimentos y/o

ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.

carga biológica transportada desde aguas arriba de la tubería, situación muy poco probable dadas las condiciones de funcionamiento de la misma.

Por su parte, para efectuar el análisis del tránsito de la crecienta en el Drenaje Intermitente a su paso sobre el predio El Jardín, inicialmente se detallaron las secciones transversales de este sistema lótico y se ajustaron las secciones transversales en el programa Hec Ras de acuerdo a las características propias del lecho y del relieve de vertiente.

Como resultado, al igual como ocurrió con el tránsito de la crecienta en la corriente La Opia, para el Drenaje Intermitente, el caudal estimado para un periodo de retorno de 100 años no superó los niveles del canal principal, por tanto, se concluye que la crecienta a su paso por la zona de estudio no alcanzaría los márgenes de inundación.



ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.

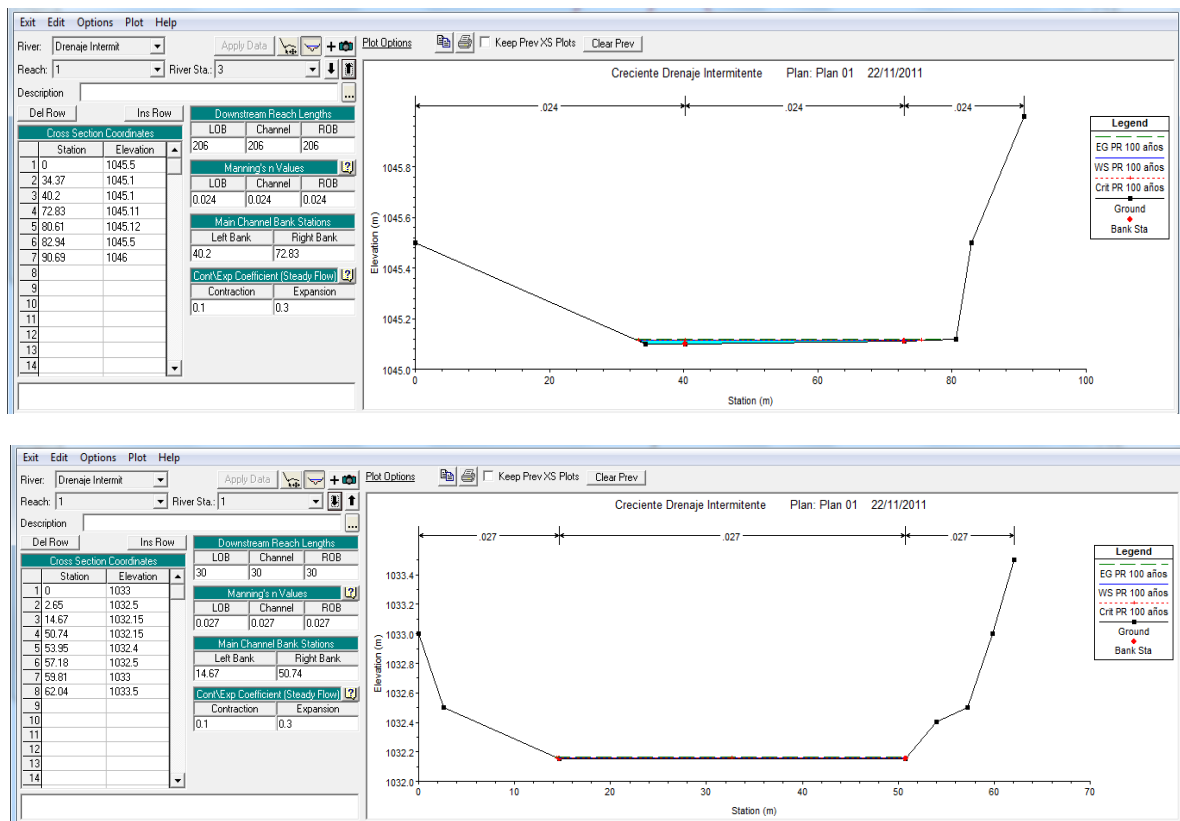


Figura 34. Secciones transversales determinadas para el análisis de tránsito de la creciente en el Drenaje Intermitente..

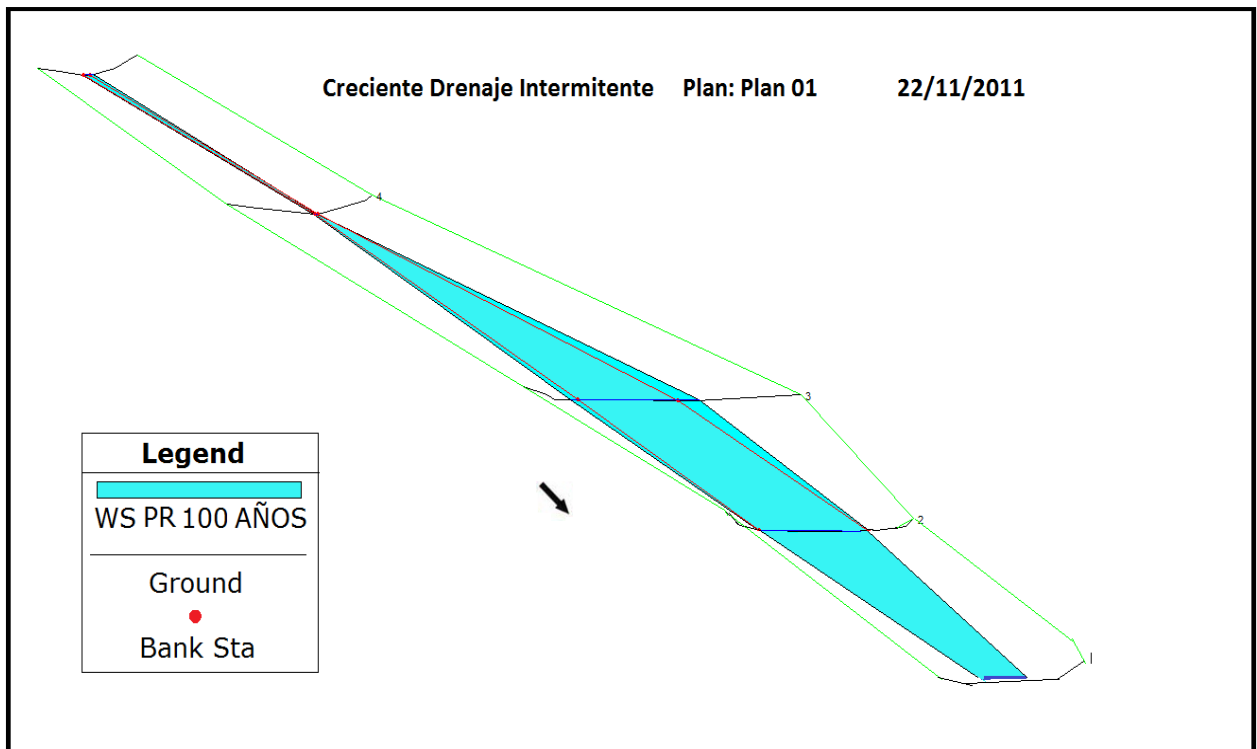


Figura 35. Tránsito de la crecida ante un periodo de retorno de 100 años en el Drenaje Intermitente. Fuente: (Geoingeniería, 2011).

En las figuras 34 y 35 se ilustran las secciones transversales del Drenaje Intermitente con el nivel de la lámina de agua alcanzado por el caudal de crecida, el cual no logró superar la cota máxima del cauce principal.

Teniendo en cuenta que factores como la alta permeabilidad del suelo de la zona de cauce, la baja pendiente, el relieve del bajo anegable y el mínimo caudal de circulación, permitieron establecer que el tránsito de la crecida, efectuado bajo un régimen supercrítico, presente una amenaza casi nula de inundación por desbordamiento en zonas aledañas al bajo anegable en el predio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En Colombia aún es común que el efecto de la urbanización origine que las redes de drenaje natural sean modificadas hasta tal punto de ser canalizadas sin tenerse en cuenta criterios técnicos y programas de manejo integral de sus cuencas. Lo anterior genera una alteración significativa en el ciclo hidrológico local, trayendo consigo daños irreparables en la dinámica de las diferentes formas del agua presentes en la zona y en especial en el hidrosistema antropizado.

Lamentablemente esto se ve reflejado en el manejo histórico que se ha dado a la quebrada La Opia, debido a que su cuenca alta fue atrozmente intervenida por los procesos de urbanismo e industrialización, inicialmente con su canalización sin estudio previo y la reducción inducida de su caudal por efecto de la eliminación de las aguas de vertiente, para seguidamente convertirla en un medio de transporte de aguas residuales, donde estas últimas se han convertido en su alimento hídrico principal, reduciendo significativamente la calidad del agua y del biotopo.

De esta forma, aún cuando en la zona suroriental del municipio de Ibagué climatológicamente se encuentra caracterizada por un régimen bimodal de lluvias el cual genera excesos significativos de agua que drenan a las diferentes corrientes de la zona, la antropización de la parte alta del hidrosistema en mención logró modificar la dinámica del ciclo hidrológico local al alterar las magnitudes de esorrentía por la eliminación de la zona de lecho, las aguas de vertientes y los caudales afluentes. Así mismo, en la actualidad es casi imposible determinar el área de la cuenca original por efectos de la urbanización.

Lo anterior permite que el caudal que da inicio a la quebrada dependa exclusivamente de los volúmenes de vertimiento que conduce la tubería y de algunos canales artificiales que llevan sus aguas a dicha corriente. Así mismo, la creciente generada por la interacción lluvia-cuenca no suele ser muy significativa debido a la magnitud de la unidad de cuenca.

Por su parte, si se tiene en cuenta que de acuerdo a la rugosidad del terreno lateral y de fondo de lecho, el suelo de la zona de estudio posee adecuadas condiciones filtrantes, lo cual sumado a su pendiente baja, al tipo relieve, a la sinuosidad del cauce y a la morfometría de la unidad de cuenca, se permite concluir que la evacuación de las aguas de esorrentía suele ser generada en forma rápida.

Por lo anterior, la evaluación de la creciente estimada para un periodo de retorno de 100 años arrojó como resultado que el caudal, a su paso por el predio El Jardín, no lograría superar los niveles máximos del cauce principal, por lo cual la probabilidad de que el tránsito de la creciente incite a que los niveles del agua lleguen a sobrepasar este margen y se genere una zona de inundación es prácticamente improbable.

Por su parte, en el Drenaje Intermitente se dedujo que la mayoría del caudal transportado corresponde a volúmenes de agua inducidos producto de (i) el descole de canales de aguas lluvias provenientes de la zona de cruce entre la avenida Pedro Tafur y la vía que conduce al Aeropuerto Perales, (ii) el drenaje propio de esta última en su recorrido paralelo al predio El Jardín y (iii) los canales de aguas residuales que transportan aguas residuales para inundar los actuales cultivos de arroz localizados en el predio en mención.

Por esta razón, y teniendo en cuenta que factores como la alta permeabilidad del suelo de la zona de cauce, la baja pendiente, el relieve del bajo anegable y el mínimo caudal de circulación, permitieron establecer que el tránsito de la creciente, efectuado bajo un régimen supercrítico, presente una amenaza casi nula de inundación por desbordamiento en zonas aledañas al bajo anegable en el predio.

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE LOS HIDROSISTEMAS SUPERFICIALES QUE CIRCULAN POR EL PREDIO EL JARDÍN, ZONA
SURORIENTAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DE TOLIMA.**

REFERENCIAS

Barnes, Harry. (1987). Roughness Characteristics of Natural Channel. Washington: U.S Geological Survey - Water Supply Paper 1849, cp1967.

Colombia (2000). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. Estadísticas del estudio Nacional del Agua. Bogotá, Colombia.

Corporación Autónoma Regional de Sucre, CARSUCRE (2002). Plan de Gestión Ambiental Regional 2002 – 2011. Sincelejo, Sucre, Colombia.

Guevara, M. E. (2003). Socavación en Puentes. Editorial Universidad del Cauca. Universidad del Cauca. Popayán-Colombia.

Higuera, C. Pérez, G. (1989). “Socavación en Puentes. Análisis, prevención y rehabilitación”. Tesis de Maestría. Universidad del Cauca.

IDEAM, (2011). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Registros de precipitaciones y aforos durante los años 1989 2010. Bogotá – Colombia

Marín, R.R. (1992). El recurso agua en Colombia. HIMAT. Segunda Edición. Editorial Arte y Fotolito. Bogotá, D.C., Colombia.

Marín, R.R. (2003). Conclusiones sobre el Estudio Nacional del agua en Colombia. Colombia Potencia Hídrica. Revista Sociedad Geológica Colombiana. P 65, P1-15. Bogotá Colombia.

Monsalve S., G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 382 p. Bogotá, Colombia.

Pizarro Tapia R., Abarza Martínez A. y Flores Villanelo J. P. (2001). Análisis comparativo de las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) en 6 Estaciones Pluviográficas (VII Región del Maule, Chile). Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Gestión Forestal y Ambiental. Chile.

Reyes Trujillo, A., Barroso, F.U., Carvajal Escobar, Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Editorial Universidad del Valle. Cali- Colombia.

Silva Medina, Gustavo (1984). Hidrología Básica. Facultad de Ingeniería Publicaciones. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Vargas, Rodrigo M., Díaz-Granados, Mario (1998). Curvas Sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. En: XIII Seminario Internacional de Hidráulica e Hidrología. Cali, Colombia. Agosto.

Ven Te Chow. Hidráulica de Canales Abiertos (1993). Análisis de rugosidades en canales naturales. Editorial Mc Graw Hill. México D.F.

VISSMAN, KNAPP, LEWIS y HARBAUGH (1977). Introduction to Hydrology. Second Edition. Harper & Row Publishers. New York.
