

**HERRAMIENTAS SIG PARA EL ESTUDIO HIDROLÓGICO Y DISEÑO
HIDRÁULICO DEL PUENTE SOBRE EL ARROYO GRANDE Y LA CARRERA 22
EN EL MUNICIPIO DE COROZAL DEPARTAMENTO DE SUCRE**

**LUIS EDUARDO CERVANTES PINTO
DANIEL MAURICIO OCAMPO GIRALDO**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2017**

**HERRAMIENTAS SIG PARA EL ESTUDIO HIDROLÓGICO Y DISEÑO
HIDRÁULICO DEL PUENTE SOBRE EL ARROYO GRANDE Y LA CARRERA 22
EN EL MUNICIPIO DE COROZAL DEPARTAMENTO DE SUCRE**

**LUIS EDUARDO CERVANTES PINTO
DANIEL MAURICIO OCAMPO GIRALDO**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2017**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	16
4. MARCO TEÓRICO	17
4.1 GOEMORFOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	17
4.1.1 Características relativas a la forma.....	17
4.1.2 Parámetros relativos al relieve.....	19
4.1.3 Caracterización de la red de drenaje	19
4.1.4 Tiempo de concentración.....	20
4.2 MODELOS LLUVIA ESCORRENTÍA.....	22
4.2.1 Hidrograma unitario sintético del SCS	22
4.2.2 Hidrograma unitario sintético de Snyder	24
4.3 PRECIPITACIÓN DE DISEÑO	30
4.3.1 Periodo o tiempo de retorno.....	30
4.3.2 Precipitación máxima probable	30
4.3.4 Curvas IDF.....	32
4.4 LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SUS APLICACIONES EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA	34
4.4.1 SIG e información hidrológica.....	34

4.4.2 Modelos hidrológico-hidráulico y SIG.....	34
5. METODOLOGÍA	36
5.1 TIPO DE TRABAJO	36
5.2 PROCEDIMIENTO.....	36
5.2.1 Fase 1. Evaluación del proceso de transformación lluvia – escorrentía	36
5.2.2 Fase 2. Estimación del comportamiento climatológico	37
5.2.3 Fase 3. Pronóstico de los caudales máximos	38
5.2.4. Fase 4. Chequeo y diseño de las secciones hidráulicas.....	38
6. RESULTADOS.....	40
6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS	40
6.1.1 Caracterización morfométrica.	40
6.1.2 Caracterización del relieve.....	42
6.1.3 Caracterización de la red de drenaje	44
6.1.4 Tiempo de concentración.....	45
6.1.5 Tipos de suelo y coberturas	46
6.1.6 Análisis climatológico	55
6.1.7 Precipitación de diseño	57
6.1.8 análisis de caudales.....	62
6.1.9 Modelo hidráulico del sitio de interés	63
6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	71
7. CONCLUSIONES	72
8. RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del área de estudio.....	13
Figura 2. Cuenca hidrográfica del proyecto	13
Figura 3. Esquema de la hidrógrafa del SCS.....	24
Figura 4. Esquema de la hidrógrafa de Snyder.....	26
Figura 5. Esquema de hidrograma unitario de Williams y Hann	28
Figura 6 Regiones de Colombia para definición de parámetros a, b, c y d.....	33
Figura 7 Interfaz gráfica HEC-GeoRAS	35
Figura 8 Modelo digital de elevaciones SRTM de la zona de estudio.....	40
Figura 9 Subcuencas hidrográficas del área de estudio	41
Figura 10 Curva hipsométrica de la cuenca de estudio.	42
Figura 11 Mapa de pendientes de la cuenca de estudio.....	44
Figura 12 Mapa general de suelos del área de estudio.	47
Figura 13 Mapa de clasificación hidrológica de los suelos.	50
Figura 14 Escena LC80090542016190LGN00, combinación de falso color 7 5 3. 51	
Figura 15 Mapa de coberturas de la zona de estudio.....	52
Figura 16 Mapa del número de la curva para condiciones normales CN(II).	53
Figura 17 Temperatura y humedad relativa mensual.....	56
Figura 18 Precipitación y evapotranspiración media mensual.	57
Figura 19 Distribución de Gumbel para P max. en 24 horas, estación libra arriba 58	
Figura 20 Curvas IDF estación libra arriba (25020400) en Corozal	60
Figura 21 Hietograma de lluvia espacial para T = 50 años.....	62
Figura 222 Hidrogramas de crecida para diferentes tiempos de retorno.	63
Figura 233. Fotografías de las condiciones existentes en el sitio del proyecto.....	65
Figura 244 Geometría del tramo en estudio – planta.....	66
Figura 255 Secciones del canal desde RS 240 hasta RS 110.....	67
Figura 266 Secciones del canal desde RS 100 hasta RS 0.....	68
Figura 277 Niveles de agua en el puente para el escenario sin revestimiento aguas arriba.....	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Forma de la cuenca de acuerdo con coeficiente de compacidad	18
Tabla 2. Tipos de uso del suelo método racional.....	29
Tabla 3 Periodos de diseño en obras de drenaje vial	30
Tabla 4 Características del relieve de la cuenca de estudio.	43
Tabla 5 Equivalencias entre clases texturales y grupos hidrológicos de suelo.....	49
Tabla 6 Porcentaje de área por cada grupo hidrológico.	50
Tabla 7 Precipitación máxima estación libra arriba	57
Tabla 8 Parámetros para el cálculo de la distribución de Gumbel, estación libra arriba.....	58
Tabla 9 Base para estimación de hietograma de lluvia espacial para T = 10 años	60
Tabla 10 Base para estimación de hietograma de lluvia espacial para T = 25 años	61
Tabla 11 Base para estimación de hietograma de lluvia espacial para T = 50 años	61
Tabla 12 Caudales máximos probables.....	63

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Valores del Coeficiente C para diferentes periodos de retorno	29
Cuadro 2 Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas IDF para Colombia.....	32
Cuadro 3 Propiedades morfométricas de las subcuencas.....	42
Cuadro 4 Características del relieve de las subcuencas de estudio.	43
Cuadro 5 Parámetros de la red de drenaje de las subcuencas.	44
Cuadro 6 Tiempo de concentración en las subcuencas de estudio.	45
Cuadro 7. Características de los suelos de la zona de estudio.	47
Cuadro 8 Tabla de relación CN – grupo hidrológico – coberturas.	52
Cuadro 9 Parámetros del CN requeridos por el modelo hidrológico.	54
Cuadro 10 Datos climatológicos de la estación Univ. de Sucre.	55
Cuadro 11 Parámetros para el cálculo de curvas I – D – F en la zona de estudio	59
Cuadro 12 Valores de Intensidad para varios tiempos de retorno y duración.....	59
Cuadro 13 Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad según Cowan.....	64
Cuadro 14 Coeficiente de rugosidad de Manning de canal sin revestimiento.....	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Precipitación máxima en 24 horas estación libra arriba	76
Anexo B. Valores totales mensuales de precipitación estación Univ. De Sucre	76
Anexo C. Valores máximos mensuales de temperatura estación Univ. De Sucre .	77
Anexo D. Valores mínimos mensuales de temperatura estación Univ. De Sucre ..	77
Anexo E. Valores medios mensuales de temperatura estación Univ. De Sucre	78
Anexo F. Valores medios mensuales de humedad relativa Univ. De Sucre	78
Anexo G. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad ii)	79
Anexo H. Valores del coeficiente de rugosidad de Mannig	80

GLOSARIO

Caudal: Relación entre el volumen de agua y el tiempo producido por una corriente de agua.

Caudal pico: Caudal máximo producido por un cuerpo de agua en un evento de creciente.

Coefficiente de rugosidad de Manning: Valor numérico con el cual se representa la rugosidad de una superficie de flujo dentro de un modelo hidráulico.

Curva Intensidad – Duración – Frecuencia: Curva que relaciona la intensidad de precipitación contra la frecuencia (periodo de retorno) y el tiempo de duración de la lluvia.

Drenaje: Remoción natural o artificial del agua superficial y subsuperficial de un área determinada.

Escorrentía: Agua que escurre por los terrenos de la cuenca hidrográfica de forma superficial o subterránea.

Escorrentía superficial: Agua que escurre laminarmente sobre el suelo o sobre depresiones (canales o corrientes de agua).

Hidrograma: Es la relación entre el caudal y el tiempo para un evento de creciente en una cuenca hidrográfica.

Hietograma de precipitación: Es la representación, mediante un diagrama de barras, de la relación entre la lluvia y el tiempo.

Infiltración: Proceso por el cual el agua penetra dentro del suelo desde la superficie del mismo. Es un fenómeno que tiene que ver con las características superficiales del suelo.

Periodo de retorno: se define como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud específica.

Precipitación: Caída de agua desde la atmósfera al suelo en forma líquida o sólida.

RESUMEN

En este trabajo se integra el uso de Sistemas de Información Geográfica y otras herramientas computacionales para realizar el estudio hidrológico y modelamiento hidráulicos necesarios en el diseño de un puente con información de campo escasa. El estudio corresponde al diseño de un puente que se ubica sobre el Arroyo Grande y la carrera 22 entre calles 19 y 25 en el municipio de Corozal en el departamento de Sucre - Colombia. Los resultados obtenidos muestran la utilidad de integración de los SIG para el análisis y caracterización espacial de los elementos y fenómenos que influyen en el funcionamiento de un puente a lo largo de su vida útil, bien sea su área de aporte de escorrentía o cuenca hidrográfica, las características climáticas, del relieve, de suelos y coberturas de la zona de estudio.

La cuenca hidrográfica que aporta escorrentía al sitio de interés del estudio, posee un área total de 98.52 Km², su elevación y pendiente media son 189.985 m y 6.116% respectivamente, las coberturas predominantes son el área urbana, los pastos y vegetación secundaria con presencia de pequeños bosques. Con la información procesada con el uso de SIG, se generó el modelo que permitió estimar los siguientes caudales de diseño: 101.1 m³/S para 10 años, 144.8 m³/S para 25 años y 187.6 m³/S para 50 años. Finalmente se obtuvo como solución hidráulica del puente, una sección interna de 16 metros de luz libre y 4.95 metros de altura promedio.

PALABRAS CLAVES: Herramientas SIG, Estudio hidrológico, estimación de caudales, diseño Hidráulico

ABSTRACT

This work integrates the use of Geographic Information Systems and other computational tools to perform the hydrological study and the hydraulic model needed in the design of a bridge with the information of the field. The study corresponds to the design of a bridge that is located on the Arroyo Grande and the 22 race between streets 19 and 25 in the municipality of Corozal in the state of Sucre - Colombia. The results show the usefulness of the integration of the GIS for the analysis and the spatial characterization of the elements and phenomena that influence the operation of a bridge over its useful life, or the sea its area of support to the basin, climatic characteristics, relief, soils and coverings of the study area.

The hydrographic basin that provides runoff to the site of interest of the study, has a total area of 98.52 Km², its elevation and slopes means 189,985 m and 6,166% respectively, the predominant coverages are the urban area, pastures and secondary vegetation with presence of the small forests. With the information processed with the use of GIS, the model was generated that allowed to estimate the following design flows: 101.1 m³/S for 10 years, 144.8 m³/S for 25 years and 187.6 m³ / S for 50 years . Finally, the hydraulic solution of the bridge was obtained, an internal section of 16 meters of free light and 4.95 meters of average height.

KEY WORDS: GIS tools, Hydrological study, flow estimation, Hydraulic design.

INTRODUCCIÓN

Las obras civiles y su construcción han estado ligadas a las sociedades humanas desde sus inicios, los grandes y majestuosos acueductos romanos, junto con sus caminos son muestra de esto. Todas estas obras han estado ligadas a diferentes necesidades de la sociedad, como la necesidad elemental de agua ha llevado un desarrollo de acueductos, la necesidad de comunicación ha motivado el desarrollo de vías y sistemas de carreteras. Dentro de las vías encontramos un elemento importante como lo son los puentes, los cuales surgen por la necesidad de librar o superar obstáculos.

Los puentes son un tipo de obras civiles importantes, que en su diseño requieren la conjugación de diferentes conocimientos como lo es el del comportamiento de los materiales que lo constituyen, el estudio de vehículos y carga que soportará, así como también la determinación del comportamiento hidráulico de la corriente de agua que es supera por el puente cuando es el caso.

Cuando se piensa en el comportamiento hidráulico de corrientes de agua es necesario pensar en el mismo como un sistema que reacciona a estímulos, en este caso a lluvias que son variables en intensidad y duración, haciendo así de este sistema un elemento complejo cuyo análisis necesita la aplicación de diferentes conocimientos. Es en este punto donde los sistemas de información geográfica (SIG) juegan un papel fundamental debido a su gran utilidad en el análisis especial de fenómenos naturales. Los SIG permiten entonces dar una aproximación a las variables que influyen en el comportamiento hidráulico de un puente, haciendo así que los diseños de los mismos sean eficientes y respondan a las necesidades del caso.

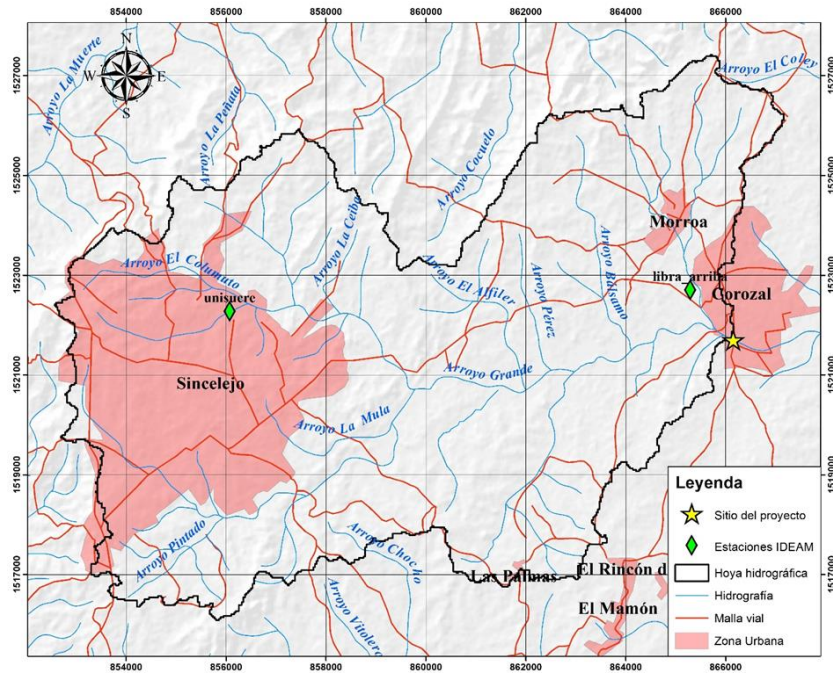
En el siguiente trabajo se desarrolla una metodología que permite la utilización de sistemas de información geográfica en el diseño eficiente de un puente localizado sobre el cruce del Arroyo grande con la carrera 22 en el municipio de Corozal en el departamento de Sucre, Colombia. La cuenca hidrográfica que aporta escorrentía al sitio de interés del proyecto corresponde a la cuenca alta del arroyo Grande de Corozal, abarca un área total de 98.52 Km² distribuidos en tres municipios de la siguiente manera: 56.60 Km² en Sincelejo, 24.98 Km² en Morroa y 16.94 Km² en Corozal. Se ubica al noroeste del departamento de Sucre a los 9° 18' 31.97" de latitud norte y 75° 21' 18.93" de longitud oeste, ver Figura 1, es surcada por los arroyos El Columuto, Pintado, Caimán, La Mula, La Ceiba, El Alfiler, Pérez, Bálsamo y Grande, ver Figura 2.

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, modificado por los autores.

Figura 2. Cuenca hidrográfica del proyecto



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, modificado por los autores.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

Las obras civiles son concebidas para satisfacer una necesidad cumpliendo criterios de seguridad y funcionamiento dentro de un periodo de vida útil determinado. Para garantizar lo anterior es necesario desde el diseño basarse en estudios previos que permitan identificar y caracterizar las solicitaciones a las que estará sometida la estructura durante su funcionamiento. Los puentes ubicados sobre canales o corrientes de drenaje son un buen ejemplo de tipo de obras civiles que requieren de una gran cantidad de estudios previos necesarios para su diseño. Dentro de estos estudios se encuentran los estudios hidrológicos e hidráulicos. Estos estudios permiten caracterizar de forma adecuada el cauce, dando así parámetros fundamentales para el diseño.

En épocas recientes y debido a condiciones de lluvia de gran intensidad y duración, el municipio de Corozal en el departamento de Sucre, sufrió el colapso del puente ubicado sobre el cruce del Arroyo Grande con la carrera 22, ubicado en este municipio. La caída del puente vehicular trajo consigo dificultades en la conectividad terrestre en el municipio afectando la economía. De igual forma la necesidad de un nuevo puente sobre el Arroyo Grande, hace necesario la realización de estudios hidrológicos e hidráulicos que ayuden a un adecuado diseño y una correcta planificación del puente que garantice un buen servicio a la comunidad.

Como se mencionó anteriormente los estudios hidrológicos e hidráulicos son de vital importancia para el diseño de obras civiles, especialmente en obras de infraestructura tipo puentes. Es entonces valedero realizar la siguiente pregunta ¿Cómo integrar y utilizar las herramientas SIG en el estudio hidrológico e hidráulico para el diseño del puente sobre el Arroyo Grande en el municipio de Corozal?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar mediante herramientas SIG, el estudio hidrológico y diseño hidráulico del puente ubicado sobre el cruce del arroyo Grande y la carrera 22 en el municipio de Corozal, departamento de Sucre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar la caracterización morfométrica, de suelos y cobertura requerida para la evaluación del proceso de transformación lluvia – escorrentía la zona de estudio usando herramientas SIG.
- Estimar el comportamiento climatológico y la precipitación máxima probable, en el área de estudio, para los tiempos de retorno recomendados en las normativas vigentes en Colombia.
- Pronosticar con ayuda de herramientas SIG los caudales máximos probables para revisión y diseño de obras hidráulicas en el sitio de proyecto.
- Diseñar las secciones hidráulicas necesarias de acuerdo al caudal máximo estimado.

3. JUSTIFICACIÓN

El siguiente trabajo aplicativo responde a la necesidad de datos de buena calidad que son insumos necesarios para el diseño eficiente de estructuras hidráulicas del tipo puentes vehiculares, permitiendo así un funcionamiento adecuado de la estructura a lo largo de su vida útil. Lo anterior hace que la inversión pública en este tipo de proyectos no sea gastada en sobrecostos debidos a un mal diseño o sea injustificada un el corto plazo por la necesidad de una reinversión por malos cálculos.

Todo estudio de drenaje vial, o en este caso, de puentes vehiculares sobre corrientes de agua, deberá tener por lo menos la localización del proyecto mostrando el contexto nacional, departamental, municipal y local, deberá contener también información sobre el clima, el suelo, la vegetación y la geomorfología de la zona, toda esta información debe ser presentada por medio de mapas a escalas adecuadas que permitan interpretar los datos y tomar decisiones sobre lo que será la obra a implantar.

Lo anteriormente expuesto, permite afirmar que los Sistemas de Información Geográfica resultan fundamentales para el procesamiento rápido, eficaz y acertado de la información requerida en estudios de este tipo, lo cual resulta en un ahorro considerable de tiempo y por lo tanto de dinero a la hora de proyectar estas estructuras.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 GOEMORFOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

La producción de agua y sedimentos de un sistema de escorrentía, es la evidencia de la interrelación entre la geología, el clima y la geomorfología. Por tal razón es posible obtener información del comportamiento hidrológico a partir de observaciones que se realicen al sistema. Es así como el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad en la ingeniería de la hidrología, pues con base a ellos es posible deducir características hidrológicas.

En los siguientes apartados se describirán algunas características relativas a la forma, relieve y así mismo se estudiarán relaciones útiles entre ellas y la red de canales que conforman una cuenca.

4.1.1 Características relativas a la forma. Estas características hacen referencia a la forma que presenta la cuenca hidrográfica al ser observada en planta. Para poder entender de forma más clara y precisa cada una de estas características es necesario tener claridad en el concepto de línea divisoria de aguas o parteaguas, por tal motivo es el primer concepto en definirse a continuación.

- **Línea divisoria de agua.** También conocida como parteaguas, corresponde a una línea curva, cerrada, fija, en la superficie del terreno tal que toda precipitación que cae dentro de la cuerva y no fuera de ella, abandone el área en forma de flujo concentrado en un solo punto (POSADA GARCÍA, 1992).
- **Área de drenaje, A.** Se define como la proyección horizontal de la superficie de drenaje que va dirigida a un cauce y que está delimitada por la divisoria de aguas o parteaguas (MONSALVE SAENZ, 1999).
- **Longitud de la cuenca, L.** Está definida como la distancia horizontal del cauce principal entre el punto aguas abajo de la cuenca y un punto aguas arriba, donde la línea proyecta del cauce principal corte el contorno de la cuenca (POSADA GARCÍA, 1992).
- **Perímetro, P.** Es la longitud sobre el plano horizontal, que recorre la línea divisoria de aguas, dicho de otro modo, corresponde a la longitud del polígono cuya proyección horizontal, contiene el área de la cuenca hidrográfica.
- **Ancho, W.** Se define como la longitud entre el área y la longitud de la cuenca.

$$W = \frac{A}{L} \quad (1)$$

- **Coefficiente de compacidad, K_c .** Se define por la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo (de radio R) que tiene la misma área de la cuenca hidrográfica. Se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2)$$

Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular posee el coeficiente mínimo ($K_c = 1$). Hay mayor tendencia a las crecientes en la medida en que este número sea próximo a la unidad (GÁMEZ MORALES, 2010; MONSALVE SAENZ, 1999). En Tabla 1 se muestra la forma de la cuenca de acuerdo con el coeficiente de compacidad de la misma.

Tabla 1. Forma de la cuenca de acuerdo con coeficiente de compacidad

Valores de K_c	Forma
1.00 - 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 - 1.50	Oval redonda a oval oblonga
1.50 - 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: GÁMEZ MORALES W. Texto básico de hidrología. Managua: Universidad Nacional Agraria.

- **Factor de forma, k_f .** Se define como el cociente entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de la cuenca.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

Si $k_f > 1$ la cuenca hidrográfica tiene una forma achatada y tiende a formar crecientes como respuesta a las lluvias. Para $k_f < 1$ la cuenca tiene forma alargada y por lo tanto reacciona de forma más lenta y no tiende a presentar crecientes (MONSALVE SAENZ, 1999).

- **Relación de elongación, R_e .** Es un parámetro de forma de la cuenca que fue formulado por Schumm como la relación entre el diámetro de un círculo (que tiene el área de la cuenca) y la longitud de la cuenca

$$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (4)$$

Se encontrado que R_e está fuertemente relacionado en el relieve. Regiones con bajo relieve presentan un valor de R_e cercano a la unidad. Mientras que regiones con alto relieve y pendientes fuertes presentan valores de R_e entre 0.6 y 0.8 (POSADA GARCÍA, 1992)

4.1.2 Parámetros relativos al relieve. El relieve de una cuenca hidrográfica puede tener más influencia en la respuesta hidrológica de la cuenca que la forma de la cuenca.

- **Pendiente del canal, S .** Es un parámetro que influye sobre la velocidad del flujo y es de igual forma importante en la forma del hidrograma (BARROS CANTILLO, 1994). La pendiente promedio del canal puede evaluarse de varias formas:
 - El cociente entre la diferencia en la elevación entre el punto más alto y el punto más bajo del perfil del río y la longitud del cauce.
 - Pendiente de una recta ajusta, de modo tal que el área bajo la recta sea igual al área bajo el perfil altimétrico.
 - Pendiente de la recta ajustada a parejas de valores obtenidos en intervalos iguales a lo largo del cauce. Para el ajuste se recomienda el uso de mínimos cuadrados
- **Pendiente media de la cuenca, S_c .** Este parámetro da una idea de la velocidad media de la escorrentía y su poder de erosión sobre la cuenca. Es un parámetro hidrológico de particular interés en cuencas pequeñas o zonas urbanas donde el flujo en laderas puede llegar a ser dominante en la determinación de la forma del hidrograma (POSADA GARCÍA, 1992).
- **Curva hipsométrica.** Es la representación gráfica del relieve de una hoya hidrográfica (MONSALVE SAENZ, 1999), por medio de una curva tal, que a cada altura le corresponde un respectivo porcentaje del área ubicada por encima de esa altura.

4.1.3 Caracterización de la red de drenaje. La red de drenaje se puede definir como la trayectoria, disposición o arreglo de los cauces y lechos por donde de manera superficial y aparente corre el agua excedente, producto de la precipitación hacia un depósito natural o artificial (GÁMEZ MORALES, 2010)

- **Cauce principal.** Es la corriente que pasa por la salida de la misma. Toda cuenca tiene una y solo una corriente principal.
- **Cota mayor y menor del cauce principal.** Corresponde a la elevación más alta y más baja del cauce principal respectivamente.
- **Densidad de drenaje, D_d .** Corresponde a la relación entre la longitud de drenaje y el área de la cuenca hidrográfica, se calcula con la siguiente expresión.

$$D_d = \frac{L_c}{A} \quad (5)$$

L_c es la longitud total de las corrientes de la hoya hidrográfica [Km]
 A Es el área de drenaje de la hoya [Km²]

- **Longitud hidráulica, L_m .** Corresponde a la mayor trayectoria de flujo desde el parte aguas de la hoya hasta el punto de salida de la misma.

4.1.4 Tiempo de concentración. Se define como el tiempo para el cual toda la hoya hidrográfica empieza a contribuir; es decir, el tiempo necesario para que toda la cuenca aporte eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe (CHOW, MAIDMENT, & MAYS, Hidrología Aplicada, 1994).

Una hipótesis ampliamente usada en hidrología es suponer que la duración de la lluvia de diseño coincide con el tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica, con lo cual se maximiza el caudal de diseño. Sin embargo, (Témez Peláez, 2003) establece una diferencia importante al expresar que el tiempo de concentración es la fase del aguacero que determina el máximo caudal, y esta fase puede ser igual o no a la duración del aguacero, ya que la duración de la lluvia es ajena al tamaño de la cuenca y es solo función de variables climáticas.

Para su cálculo se pueden emplear diferentes fórmulas que se relacionan con otros parámetros propios de la cuenca. Para la estimación del tiempo de concentración usualmente se recomienda emplear el promedio obtenido de varias ecuaciones empíricas disponibles en la literatura científica.

A continuación se muestran algunas de las ecuaciones usadas común mente en el medio para el cálculo del tiempo de concentración en cuencas hidrográficas.

- **California culvert practice.**

$$T_c = 0.95 \left(\frac{L_m^3}{H} \right)^{0.385} \quad (6)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]
 L_m es la longitud hidráulica de la cuenca en [Km]
 H es la diferencia de nivel máxima entre la divisoria de aguas y el punto de salida [m]

- **Bransby Williams.**

$$T_c = 0.605 \frac{L}{A^{0.1} \times S_m^{0.2}} \quad (7)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]
 L es la longitud del cauce principal [Km]
 S_m es la pendiente promedio del cauce principal [%]
 A es el área de la cuenca en [Km²]

- **Kirpich.**

$$T_c = 0.0663 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (8)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]
 L es la longitud del cauce principal [Km]
 S es la pendiente promedio del cauce principal [m/m]

- **Témez.**

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S_m^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (9)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]
 L es la longitud del cauce principal [Km]
 S_m es la pendiente promedio del cauce principal [%]

- **Simas – Hawkins.**

$$T_c = 0.322 \frac{\left(\frac{25400}{CN} - 254 \right)^{0.313}}{S^{0.15}} \left(\frac{A}{L} \right)^{0.594} \quad (10)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]
 L es la longitud del cauce principal [Km]
 S es la pendiente promedio del cauce principal [m/m]
 CN es el número de la curva de escorrentía de la cuenca [adimensional]

- **Pasini.**

$$T_c = 0.108 \frac{(A \times L)^{0.333}}{S^{0.5}} \quad (11)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]
 L es la longitud del cauce principal [Km]
 S es la pendiente promedio del cauce principal [m/m]
 A es el área de la cuenca en [Km²]

- **Formula del Bureau Of Reclamation (E.E. U.U.)**

$$T_c = \left(0.871 \frac{L_m^3}{H}\right)^{0.385} \quad (12)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]

L_m es la longitud hidráulica de la cuenca en [Km]

H es la diferencia de nivel máxima entre la divisoria de aguas y el punto de salida [m]

- **Formula de Corps Engineers.**

$$T_c = 0.191 \left(\frac{L}{S_m^{0.25}}\right)^{0.76} \quad (13)$$

T_c es el tiempo de concentración [h]

L es la longitud del cauce principal [Km]

S_m es la pendiente promedio del cauce principal [%]

4.2 MODELOS LLUVIA ESCORRENTÍA

Las hidrógrafas unitarias sintéticas permiten construir un hidrograma de escorrentía superficial para una lluvia de duración y profundidad unitaria para una cuenca sin registros de caudal. Las componentes principales que definen cada hidrógrafa son: el tiempo de rezago, el tiempo de concentración, el tiempo base y el tiempo al pico, dichas componentes son estimadas en función de parámetros morfométricos de la cuenca tales como el área, la pendiente promedia, cota máxima, cota mínima, distancia al centroide, etc. Variando la forma de cálculo entre diferentes metodologías.

Algunos modelos de lluvia escorrentía son discutidos en las siguientes secciones.

4.2.1 Hidrograma unitario sintético del SCS. El servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (SCS) desarrolló un hidrograma unitario adimensional a partir de una serie de hidrógrafas observadas correspondientes a cuencas de muy diversos tamaños y ubicadas en diferentes partes de los estados unidos y a continuación se presentan las componentes básicas de dicho hidrograma.

- **Tiempo de rezago del SCS.** Por definición, el tiempo de rezago para el modelo del SCS corresponde al tiempo comprendido entre el centroide del histograma de precipitación efectiva y el pico del hidrograma de escorrentía directa correspondiente. Se asume que el rezago es constante para una cuenca ya que depende de los parámetros morfométricos de la misma, por tanto el tiempo de rezago se calcula como:

$$T_R = \frac{L_c^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900S_c^{0.5}} \quad (14)$$

Donde L_c es la longitud del canal principal en pies, S es el factor de retención o almacenamiento calculado con base al número de curva (CN) y S_c es la pendiente de la cuenca en porcentaje. El factor de retención S se obtiene del método del SCS para retención o pérdidas mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{100}{CN} - 10 \quad (15)$$

Para el modelo del SCS el tiempo de concentración de la cuenca puede definirse como:

$$T_c = \frac{5}{3}T_R \quad (16)$$

- **Tiempo pico del modelo SCS.** Está dado por la siguiente ecuación:

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R \quad (17)$$

Donde T representa la duración de la lluvia efectiva en horas y T_R el tiempo de rezago en horas.

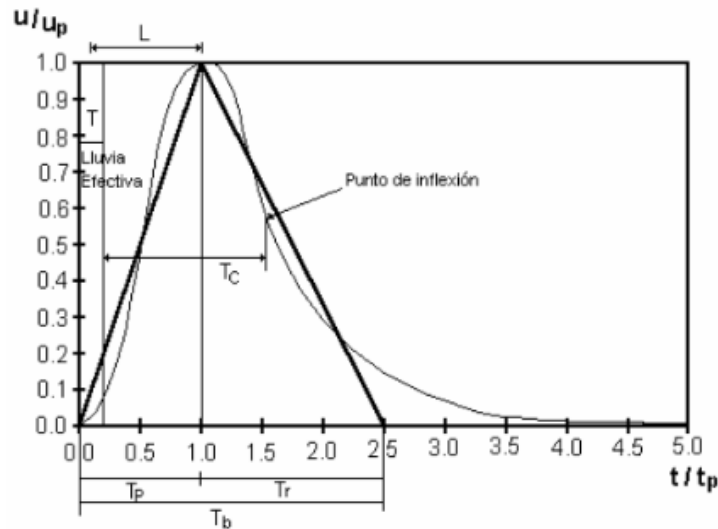
- **Caudal pico al pico del modelo SCS.** El caudal al pico en pies cúbicos por segundo por pulgada se puede calcular como:

$$U_p = \frac{484A_c}{T_p} \quad (18)$$

Donde A_c corresponde al área de la cuenca en millas cuadradas y T_p es el tiempo al pico en horas.

- **Esquema de la hidrógrafa del SCS.** El hidrograma unitario adimensional curvilíneo del SCS puede ser representado por una hidrógrafa unitario triangular equivalente con las mismas unidades de tiempo y caudal, teniendo por consiguiente el mismo porcentaje del volumen en lado creciente del hidrograma como lo muestra la Figura 3.

Figura 3. Esquema de la hidrógrafa del SCS.



Fuente: CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW - HILL Interamericana S.A.

4.2.2 Hidrograma unitario sintético de Snyder. Los principales componentes del hidrograma propuesto por *SNYDER (1939)* se describen a continuación

- **Tiempo de rezago del modelo de Snyder.** El tiempo de rezago definido como el tiempo en horas desde el centroide del histograma de precipitación efectiva hasta el caudal pico del hidrograma unitario se calcula como:

$$T_R = \frac{L_C^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900S^{0.5}} \quad (19)$$

Donde T_R representa el tiempo de rezago en horas, L_C es la longitud del canal principal en pies, S es el factor de retención o almacenamiento calculado con base al número de curva S_C es la pendiente de la cuenca en porcentaje. Si el tiempo de rezago es mayor que el tiempo de concentración se recomienda utilizar la siguiente relación:

$$T_R = 0.6T_c \quad (20)$$

Siendo T_c el tiempo de concentración en horas.

- **Duración de la lluvia según el modelo de Snyder.** Snyder consideró lluvias que estuvieran de acuerdo con el tamaño de la cuenca definiendo para ello una relación de 1/1.5 veces el tiempo de rezago; así entonces:

$$t_s = \frac{T_R}{5.5} \quad (21)$$

Donde t_s será la duración de la lluvia efectiva en horas y T_R el tiempo de rezago en horas

- **Tiempo al pico del modelo de Snyder.** El tiempo al pico puede calcularse como:

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R \quad (22)$$

Donde T_p es el tiempo al pico, T representa la duración de la lluvia en horas y T_R es el tiempo de rezago.

- **Caudal al pico de Snyder** El caudal pico por milla cuadrada u_p puede ser estimado utilizando la siguiente expresión:

$$u_p = C_p \frac{640}{T_R} \quad (23)$$

Donde u_p representa el caudal al pico por unidad de área (en $\text{pie}^3/\text{smi}^2$), T_R es el tiempo de rezago en horas y C_p es un coeficiente que depende de la topografía de la cuenca variando entre 0.5 y 0.8. La ecuación anterior es usada cuando el hidrograma unitario a construir corresponde a una precipitación efectiva cuya duración coincide con el tiempo al pico en caso contrario se utiliza la siguiente expresión:

$$u_p = C_p \frac{640}{[T_R + (T - t_s)/4]} \quad (24)$$

t_s es la duración de la lluvia en horas y T es la duración de la precipitación efectiva en horas. Una vez obtenido el caudal al pico por unidad de área, el caudal al pico total se obtiene como:

$$U_p = u_p A_c \quad (25)$$

Siendo A_c el área de la cuenca.

- **Duración de la escorrentía superficial.** El cálculo del tiempo base de Hidrograma unitario se estima mediante la siguiente expresión:

$$t_b = 3 + 3 \frac{T_R}{24} \quad (26)$$

Donde t_b es el tiempo base en días con T_R en horas, la ecuación anterior es adecuada para cuencas de tamaño considerable, pero para cuencas pequeñas arroja valores excesivamente altos, por lo que el tiempo base debe recalcularse como 5 a 6 veces el tiempo al pico.

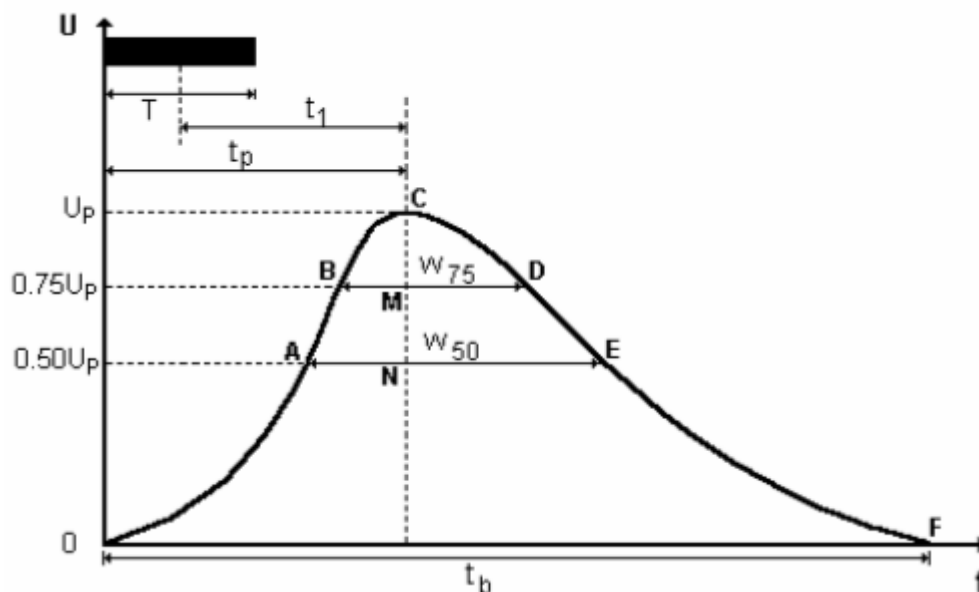
- **Esquema de la hidrógrafa unitaria de Snyder.** El cuerpo de ingenieros de los EEUU introdujo dos ecuaciones adicionales al modelo con el objeto de obtener 4 puntos del hidrograma unitario de Snyder que facilitan su definición. Dichas ecuaciones son:

$$W_{50} = \frac{770}{u_p^{1.08}} \quad (27)$$

$$W_{75} = \frac{440}{u_p^{1.08}} \quad (28)$$

Donde u_p representa el caudal al pico por unidad de área (en $\text{pie}^3/\text{smi}^2$), W_{50} es el intervalo de tiempo en horas correspondiente al 50% del caudal al pico y W_{75} es el intervalo de tiempo en horas correspondiente al 75% del caudal al pico. Cada intervalo de tiempo se ubicará en la hidrógrafa de tal forma que su tercera parte quede a la izquierda de la vertical que pasa por el pico del hidrograma unitario y las dos terceras partes a la derecha de dicha alineación como se muestra en la Figura 4 (SNYDER, 1939)

Figura 4. Esquema de la hidrógrafa de Snyder



Fuente: SNYDER, F. (1939). A conception of runoff-phenomena. *Earth & Space Science News*, 20(4), 725-738.

4.2.3 Hidrograma unitario sintético de Williams y Hann.

A principios de la década del 70 Jimmy R. Williams y Roy W. Hann propusieron un modelo para calcular el hidrograma sintético producido por una lluvia instantánea

en una cuenca, a partir de sus principales características geomorfológicas, como el área, la pendiente del canal principal y la relación largo ancho.

Las características geomorfológicas de la cuenca están representadas por dos parámetros, que son la constante de recesión K y el tiempo al pico T_p

- **Parámetros del modelo de Williams y Hann.** La constante de recesión K y el tiempo al pico T_p fueron determinados por Williams y Hann mediante análisis de regresión realizados sobre una muestra de 34 cuencas localizadas en diversos lugares de E.E.U.U. cuyas áreas oscilan entre 0.5 y 25 millas cuadradas. Dichos análisis arrojaron como resultado las siguientes ecuaciones:

$$K = 27A_c^{0.231}S_{cp}^{-0.777}\left(\frac{L_c}{W_c}\right)^{0.124} \quad (29)$$

$$T_p = 4.63A_c^{0.422}S_{cp}^{-0.48}\left(\frac{L_c}{W_c}\right)^{0.133} \quad (30)$$

Siendo A_c el área de la cuenca en m^2 , S_{cp} la pendiente media del canal principal en *pies/mi*, y L_c/W_c es la relación largo ancho de la cuenca.

- **Tiempos del modelo de Williams y Hann.** La determinación de los tiempos t_0 y t_1 y de los parámetros n y B son necesarios para la obtención del hidrograma sintético. Estos tiempos fueron deducidos por Williams y Hann y las expresiones para obtenerlos son las siguientes:

$$t_0 = T_p \left[1 + \frac{1}{(n-1)^{1/2}} \right] \quad (31)$$

El punto t_1 está localizado a una distancia igual a dos veces la constante de recesión de la cuenca ($2K$) contada a partir de t_0 , es decir:

$$t_1 = t_0 + 2K \quad (32)$$

Dentro de la literatura n es conocido como el parámetro de forma del hidrograma sintético unitario de Williams y Hann y está dado por la siguiente relación:

$$n = 1 + \left\{ \frac{1}{2(K/T_p)} + \left[\frac{1}{4(K/T_p)^2} + \frac{1}{(K/T_p)} \right]^{1/2} \right\}^2 \quad (33)$$

El coeficiente B actúa más como un parámetro de conversión de unidades que como un parámetro de significado físico. El valor de B se encuentra resolviendo la ecuación integral derivada por de Williams y Hann pero para efectos prácticos el valor de B se estima gráficamente en función de n

- **Caudal al pico del modelo de Williams y Hann.** El caudal al pico se estima como:

$$U_p = \frac{BA_c}{T_p} \quad (34)$$

- **Forma del hidrograma unitario de Williams y Hann.** Las ecuaciones propuestas por Williams y Hann para la determinación de la forma de su hidrograma unitario sintético son las siguientes:

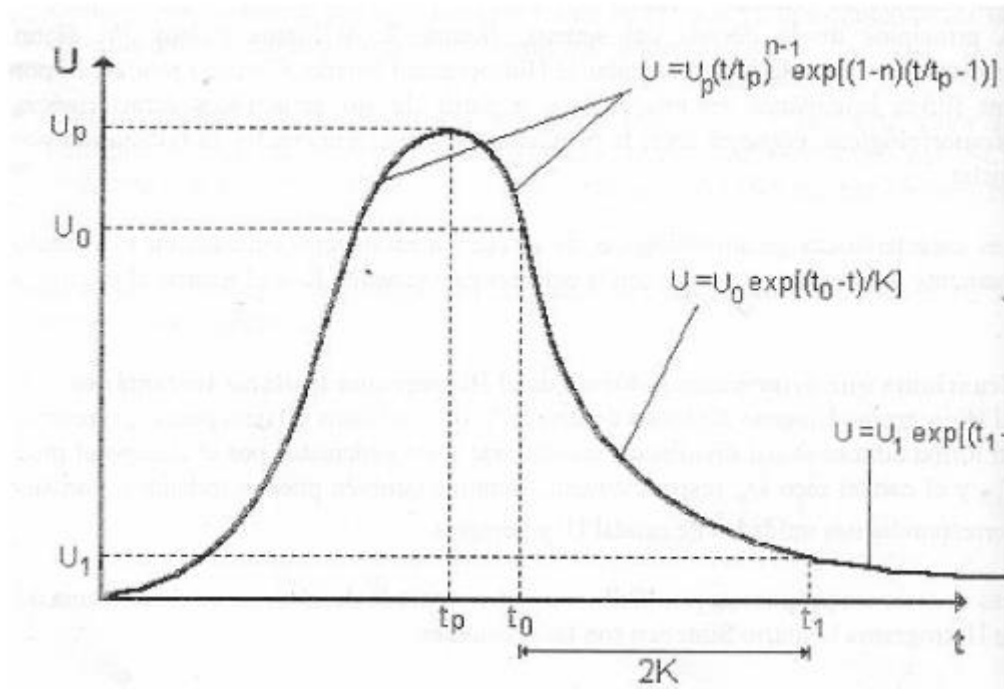
$$U = U_p \left(\frac{t}{T_p}\right)^{n-1} \exp\left[(1-n)\left(\frac{t}{T_p} - 1\right)\right] \Rightarrow t < t_0 \quad (35)$$

$$U = U_0 \exp\left(\frac{t_0-t}{K}\right) \Rightarrow t_0 \leq t \leq t_1 \quad (36)$$

$$U = U_1 \exp\left(\frac{t_1-t}{3K}\right) \Rightarrow t \geq t_1 \quad (37)$$

Un esquema del hidrograma unitario sintético de Williams y Hann se presenta en la

Figura 5. Esquema de hidrograma unitario de Williams y Hann



Fuente: CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW - HILL Interamericana S.A.

4.2.4 Método racional.

Según este método el caudal es el resultado de multiplicar tres factores, como se muestra en siguiente expresión:

$$Q = \frac{CIA}{3.6} \quad (38)$$

Donde C, es el coeficiente de escorrentía. I, intensidad de la lluvia en mm/h. A, área de la subcuenca km²

El coeficiente de escorrentía se determina como un promedio ponderado tomando en cuenta la distribución de áreas y usos del suelo de la cuenca en estudio (CHOW, MAIDMENT, & MAYS, Hidrología Aplicada, 1994). En la Tabla 2 y en el Cuadro 1 se muestra los tipos de suelo y los valores del coeficiente C para el método racional respectivamente

Tabla 2. Tipos de uso del suelo método racional

Tipo	Usos del suelo
1	Forestal protector
2	Uso mixto
3	Uso mixto urbano-rural (Residencial 38% impermeable)
4	Áreas y corredores de actividad múltiple de cobertura zonal
5	Corredor barrial
6	Equipamientos generales o de ciudad (Residencial 38% impermeable)
7	Residencial tipo 1 (65% impermeable)
8	Verdes

Fuente: CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW - HILL Interamericana S.A.

Cuadro 1. Valores del Coeficiente C para diferentes periodos de retorno

Uso del suelo	Tr = 2.33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
1	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52
2	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55
3	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
4	0.75	0.80	0.83	0.88	0.82	0.97
5	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95
6	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
7	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55
8	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52

Fuente: CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW - HILL Interamericana S.A.

4.3 PRECIPITACIÓN DE DISEÑO

Una precipitación de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de este se calculan utilizando procedimientos de lluvia – escorrentía y tránsito de caudales. Una precipitación de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de lluvia en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación, o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación (CHOW, MAIDMENT, & MAYS, Hidrología Aplicada, 1994).

4.3.1 Periodo o tiempo de retorno. Según (CHOW, MAIDMENT, & MAYS, Hidrología Aplicada, 1994) el periodo de retorno puede definirse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud específica. La probabilidad de ocurrencia del evento $X \geq x_T$ en cualquier observación puede relacionarse con el periodo de retorno de la siguiente manera.

$$T = \frac{1}{P(X \geq x_T)} = \frac{1}{1 - P(X \leq x_T)} \quad (39)$$

(Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, 2009) establece que se deben adoptar los siguientes periodos de retorno (ver Tabla 3) para el cálculo de caudales máximos instantáneos anuales en obras de drenaje vial.

Tabla 3 Periodos de diseño en obras de drenaje vial

Tipo de obra	Periodo de retorno [años] ^(*)
Cunetas	5
Zanjas de coronación	10
Estructuras de caída	10
Alcantarillas de 0.90 m diámetro	10
Alcantarillas mayores de 0.90 m de diámetro	20
Puentes menores (luz menor a 10 m)	25
Puentes de luz mayor o igual a 10 m y menor a 50 m	50
Puentes de luz mayor o igual a 50 m	100
Drenaje subsuperficial	2

^(*) El periodo de diseño de las obras podrá variarse, a juicio del ingeniero consultor, para casos especiales debidamente justificados.

Fuente: INVIAS. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá.

4.3.2 Precipitación máxima probable. (CHOW, MAIDMENT, & MAYS, Hidrología Aplicada, 1994) la define como la mayor profundidad de precipitación estimada analíticamente para una duración dada que sea físicamente posible y que caracterice razonablemente una región geográfica particular en un determinado periodo del año.

4.3.3 Análisis de frecuencia de precipitación. Se define al análisis de frecuencias como un procedimiento para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos pasados o futuros (Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, 2009). Dicho procedimiento se hace con el uso de distribuciones de probabilidad (CHOW, MAIDMENT, & MAYS, Hidrología Aplicada, 1994). Una de las funciones de distribución de probabilidad comúnmente usada en el análisis de eventos extremos es la distribución de Gumbel. Esta función se describirá más adelante.

- **Valores extremos tipo I o distribución de Gumbel.** Es una distribución de probabilidad utilizada usualmente para valores máximos aleatorios extraídos de poblaciones suficientemente grandes (INVIAS, 2009). La función de distribución de probabilidad está dada por:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-u}{\alpha}}} \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (40)$$

Los parámetros u y α se calculan de la siguiente manera

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi}s; \quad u = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad (41)$$

Definiendo y como variable reducida se tiene que

$$y = \frac{x-u}{\alpha} \quad (42)$$

Sustituyendo y resolviendo para la variable reducida en la función de distribución se obtiene

$$y = -\ln \left[\ln \left(\frac{1}{F(x)} \right) \right] \quad (43)$$

Y como ya se vio anteriormente

$$T = \frac{1}{1-P(X \leq x_T)} = \frac{1}{1-F(x_T)} \quad (44)$$

De donde

$$F(x) = \frac{T-1}{T} \quad (45)$$

Por lo cual

$$y_T = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (46)$$

Finalmente x_T se relaciona con y_T mediante la siguiente ecuación

$$x_T = u + \alpha y_T \quad (47)$$

4.3.4 Curvas IDF. Las curvas IDF son una de las herramientas más importantes para el diseño hidrológico de caudales máximos. Son la herramienta fundamental de los modelos lluvia-escorrentía, como son los hidrogramas unitarios y el método racional. Las curvas IDF dependen del lugar de medición de la lluvia. (Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, 2009) las define como arreglos en los cuales se presentan las lluvias (estimadas como intensidad de precipitación) contra su duración y el periodo de retorno. Se obtienen a partir de datos históricos de precipitación de una estación provista de pluviógrafo. Cuando no se disponga de datos pluviográficos, (Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, 2009) propone el uso del método simplificado para la obtención de las curvas IDF. El procedimiento consiste en usar la siguiente expresión

$$i = \frac{aT^b M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \quad (48)$$

Donde:

i es la intensidad de precipitación [mm/h]

T es el periodo de retorno [años]

M es la precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual [mm]

t es la duración de la lluvia [min]

a, b, c y d son parámetros de ajuste de regresión que fueron regionalizados.

En la Tabla 3Figura 66 se observan las regiones de Colombia para la definición de los parámetros. El Cuadro 2 muestra los valores de los parámetros según la región para el cálculo de las curvas IDF para Colombia.

Cuadro 2 Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas IDF para Colombia

Región	a	b	c	d
R1	0.94	0.18	0.66	0.83
R2	24.86	0.22	0.50	0.10
R3	13.92	0.19	0.58	0.20
R4	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: INVIAS. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá.

Figura 6 Regiones de Colombia para definición de parámetros a, b, c y d



Fuente: INVIAS. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá.

4.4 LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SUS APLICACIONES EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

Los SIG dan múltiples posibilidades de almacenar, gestionar y analizar la información espacial de forma precisa, haciendo de estos una herramienta fundamental en la toma de decisiones en diversos campos como medio ambiente, ordenamiento territorial, geomarketing, etc.

4.4.1 SIG e información hidrológica. Mediante el uso de SIG es posible obtener Modelos Digitales del Terreno, delimitar y caracterizar cuencas, estudiar y analizar la distribución espacial de los recursos hídricos o evaluar la pérdida de suelo.

En cuanto al estudio y delimitación de cuencas hidrológicas los SIG proporcionan diferentes aplicaciones y procesos que permiten realizar esto de forma sencilla y rápida. La herramienta ArcHydrotools de ArcGIS proporciona varias herramientas para delinear y caracterizar cuencas tomando como base el Modelo Digital del Terreno. Permitiendo describir los componentes físicos de una superficie mediante la identificación de sumideros, cálculo de direcciones de flujo y acumulación del mismo (Benayas, 2015).

Otra herramienta de los SIG de gran utilidad en la hidrología es el proceso de interpolación espacial. Los SIG permiten analizar la distribución espacial de variables partiendo de datos puntuales en ubicaciones concretas. Esta herramienta es útil para analizar la distribución espacial de las precipitaciones, cuyo análisis es la base de todo estudio hidrológico (Benayas, 2015).

4.4.2 Modelos hidrológico-hidráulico y SIG. Los SIG no son instrumentos diseñados para la simulación mediante modelos matemáticos, ya que no se prestan con facilidad a estudios dinámicos, sin embargo son herramientas que ayudan al pre y post proceso de la información espacial del modelo hidráulico. Por ejemplo, en el estudio de un cauce, los SIG se utilizan en el estudio hidrológico y cálculo de caudales previo al cálculo hidráulico, para regionalizar o agregar las variables y parámetros y utilizar sus resultados como entradas del modelo. Posteriormente el flujo de agua es modelado en un software diseñado específicamente para ello. Las salidas de este modelo son nuevamente exportadas a un SIG para su procesamiento y representación gráfica (Molero, 2011).

Como el ejemplo anterior son muchos los usos que se le ha dado a los SIG como herramienta aislada a los modelo de flujo, para regionalizar, agregar y/o calcular variables y parámetros, usando los resultados como entradas a los modelos. Últimamente se han desarrollado aplicaciones, macros, extensiones o módulos que conectan directamente SIG y modelo. Dentro de esta línea surgen las conexiones entre los programas HEC-HMS para hidrología y HEC-RAS para hidráulica, con los productos ESRI, a través de las extensiones HEC-GeoHMS y HECGeoRAS, respectivamente. El primero de ellos, el HEC-GeoHMS, permite extraer información

topográfica, topológica e hidrológica desde un modelo digital de elevaciones, para luego ser introducidas al HEC-HMS como ayuda en la elaboración del modelo de cuenca. El segundo, HEC-GeoRAS, permite conectar el SIG y el modelo hidráulico unidimensional en una doble dirección: desde el modelo digital de elevación se extrae la información geométrica necesaria que, una vez empleada en HEC-RAS, permite ser de nuevo exportada al SIG para obtener zonas inundables, batimetría o velocidades (Molero, 2011).

Figura 7 Interfaz gráfica HEC-GeoRAS



Fuente: Molero. (2011). La modelización hidrológica-hidráulica y los sistemas de información geográfica

En cuanto a la modelación bidimensional todas las aplicaciones se apoyan en los SIG, tanto para dar formato a los datos de entrada, como la para la implementación de los cálculos internos y los formatos de salida. Así programas como MIKE-Flood y su componente bidimensional MIKE21, SOBECK, o GUAD precisan datos SIG de entrada, generalmente en formato matricial, como lo modelos de digitales de elevación o parámetros de rugosidad del terreno a la escorrentía superficial en régimen de lámina libre (valores de n de Manning). Finalmente, se resalta el modelo de flujo bidimensional GISPLANA (CEDEX) concebido como un verdadero Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD), al estar formado por un SIG, un modelo hidráulico y una interfaz gráfica.

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE TRABAJO

El trabajo presentado en este documento corresponde a un trabajo del tipo aplicativo, más que investigativo, ya que en el mismo se aplican conocimientos adquiridos en la formación profesional, en un proyecto.

5.2 PROCEDIMIENTO

5.2.1 Fase 1. Evaluación del proceso de transformación lluvia – escorrentía.

Elaboración de la caracterización morfométrica, de suelos y cobertura requerida para la evaluación del proceso de transformación lluvia – escorrentía la zona de estudio.

- **Actividad 1.** Recopilación de la cartografía a escalas 1:100,000 o mayor si es posible.
 - Se obtuvo la cartografía base a escala 1:100,000 desde los servidores del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
 - Se procesó, con el uso de herramientas computacionales, la cartografía requerida de la zona de estudio.
- **Actividad 2.** Recopilación de la información climatológica de la zona de estudio.
 - Se identificaron las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que tienen incidencia en el área de estudio.
 - Se solicitó la información de Precipitación máxima en 24 horas, número de días de lluvia, precipitación y evaporación mensual, temperatura media máxima, temperatura media mínima y humedad relativa de las estaciones del IDEAM seleccionadas para realizar el estudio.
- **Actividad 3.** Recopilación de la información topográfica y geomorfológica.
 - Con base de la topografía realizada en el sitio del proyecto, se obtuvo el perfil longitudinal y las secciones transversales de la corriente, de igual forma se obtuvieron las dimensiones (ancho, longitud) actuales de las estructuras existentes (puentes, canales, etc.).

- Se realizó la descripción del estado actual de la superficie del cauce y estructuras involucrados en el proyecto.
- **Actividad 4.** Caracterización morfométrica, de relieve y red hidrográfica de la zona del proyecto.
 - Se obtuvo el modelo digital de elevaciones de la zona del proyecto.
 - Se delimitaron el parteaguas, las corrientes de drenaje, el centroide y la longitud hidráulica de la cuenca hidrográficas involucrada en el proyecto.
 - Se realizó el análisis de la forma, densidad de drenaje, relieve y tiempos de concentración de las hoyas hidrográficas del proyecto.
- **Actividad 5.** Caracterización de suelos y de coberturas de la zona del proyecto.
 - Se realizó la clasificación hidrológica de los suelos tomando como punto base, el estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de sucre.
 - Se realizó la clasificación de las coberturas presentes en las hoyas hidrográficas involucradas en la zona del proyecto, tomando como punto de partidas, las imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8
 - Se Generaron los mapas del número de la curva de las cuencas hidrográficas involucradas en la zona de estudio.

5.2.2 Fase 2. Estimación del comportamiento climatológico. Estimación del comportamiento climatológico y la precipitación máxima probable, en el área de estudio, para los tiempos de retorno recomendados en las normativas vigentes en Colombia.

- **Actividad 1.** Análisis y caracterización del clima de la zona.
 - Se realizó el análisis y descripción del comportamiento que tienen en la zona del proyecto los siguientes parámetros climatológicos: Precipitación mensual, temperatura media máxima, temperatura media mínima y humedad relativa.
- **Actividad 2.** Estimación de la precipitación máxima probable para diferentes tiempos de retorno.

- Se realizó el análisis estadístico de los valores de precipitación máxima en 24 horas aplicando distribuciones de probabilidad de valores extremos.
- Se Obtuvieron las curvas Intensidad - Duración - Frecuencia, para la zona del proyecto, usando el método simplificado descrito en el numeral 2.6.6.3 del manual de drenajes del INVIAS.
- Se calculó la precipitación máxima en 24 horas para los tiempos de retorno aplicables a cada caso.
- Se Obtuvieron los hietogramas de lluvias espaciales de diseño por el método de los bloques alternos para los tiempos de retorno aplicables a cada caso.

5.2.3 Fase 3. Pronóstico de los caudales máximos. Pronosticar los caudales máximos probables para revisión y diseño de obras hidráulicas en el sitio de proyecto.

- **Actividad 1.** Aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS.
 - Se Creó el modelo de cuenca hidrográfica incluyendo parámetros fisiográficos, método de perdida de precipitación y método de transformación precipitación - escorrentía.
 - Se Creó el modelo meteorológico basado en el hietograma de lluvia de diseño.
 - Se Definieron los tiempos de cálculo para la obtención de lo hidrogramas de caudal de la cuenca hidrográfica.
 - Se Ejecutó el modelo y se obtuvieron los caudales máximos probables para el chequeo y diseño hidráulico de las estructuras del proyecto.

5.2.4. Fase 4. Chequeo y diseño de las secciones hidráulicas. Diseño de las secciones hidráulicas necesarias de acuerdo al caudal máximo y cotas máximas

- **Actividad 1.** Aplicación del modelo hidráulico HEC-RAS para el chequeo y diseño de las obras.
 - Se definió de la geometría de la corriente incluyendo eje, secciones transversales, obras mayores y obras menores.

- Se obtuvieron los valores de rugosidad de la corriente de drenaje.
- Se ingresaron y evaluaron las condiciones de frontera y los caudales de diseño.
- Se realizó el diseño de la sección del puente y se calcularon las cotas máximas de agua alcanzadas por la corriente en el sitio del proyecto.

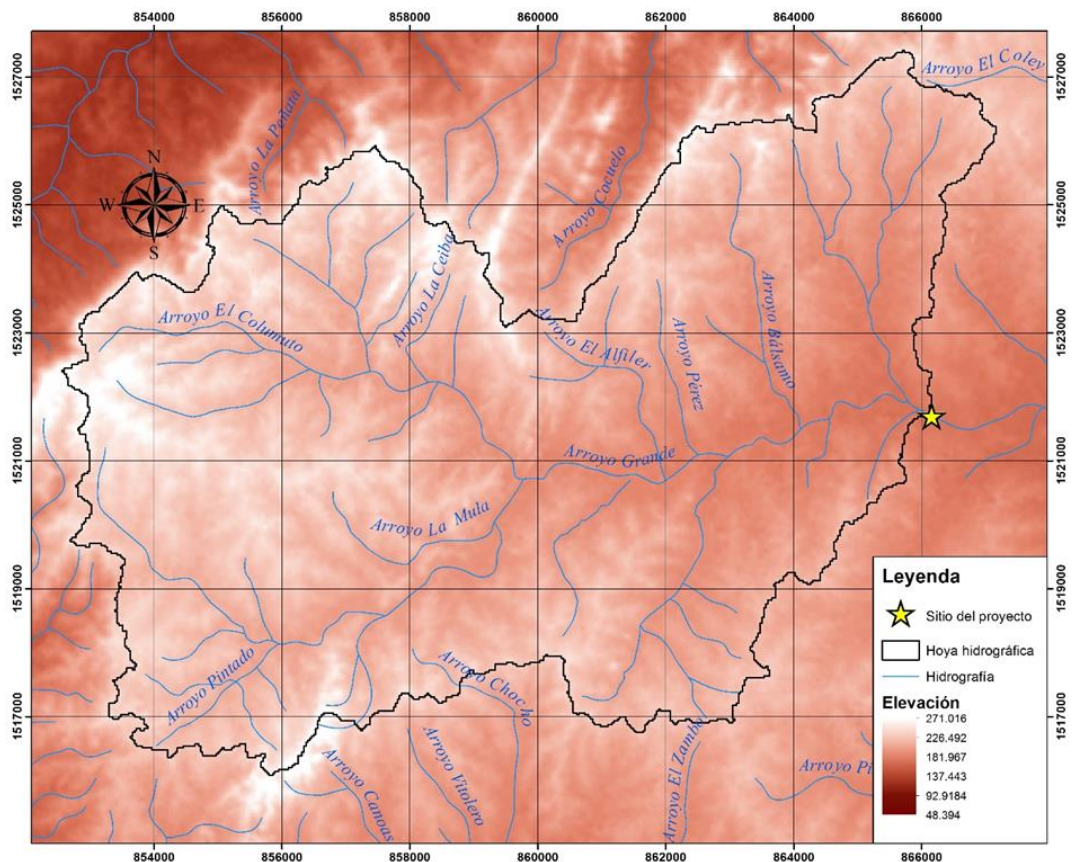
6. RESULTADOS

6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

6.1.1 Caracterización morfométrica. Para el análisis morfométrico de la zona de estudio se usó, como información base, el modelo digital de elevaciones de 1 segundo de arco de resolución espacial (30 m aproximadamente) del proyecto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), el cual fue llevado a cabo entre la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en el mes de febrero del año 2000 y cuyo fin fue obtener un modelo digital de elevaciones de la zona del globo terráqueo comprendida entre los 56° de latitud sur y los 60° de latitud norte, de modo que genere una completa base de mapas topográficos digitales de alta resolución de la tierra (USGS, 2015).

En la Figura 8 se muestra la porción del modelo de elevaciones utilizado para caracterizar la hoya hidrográfica del proyecto.

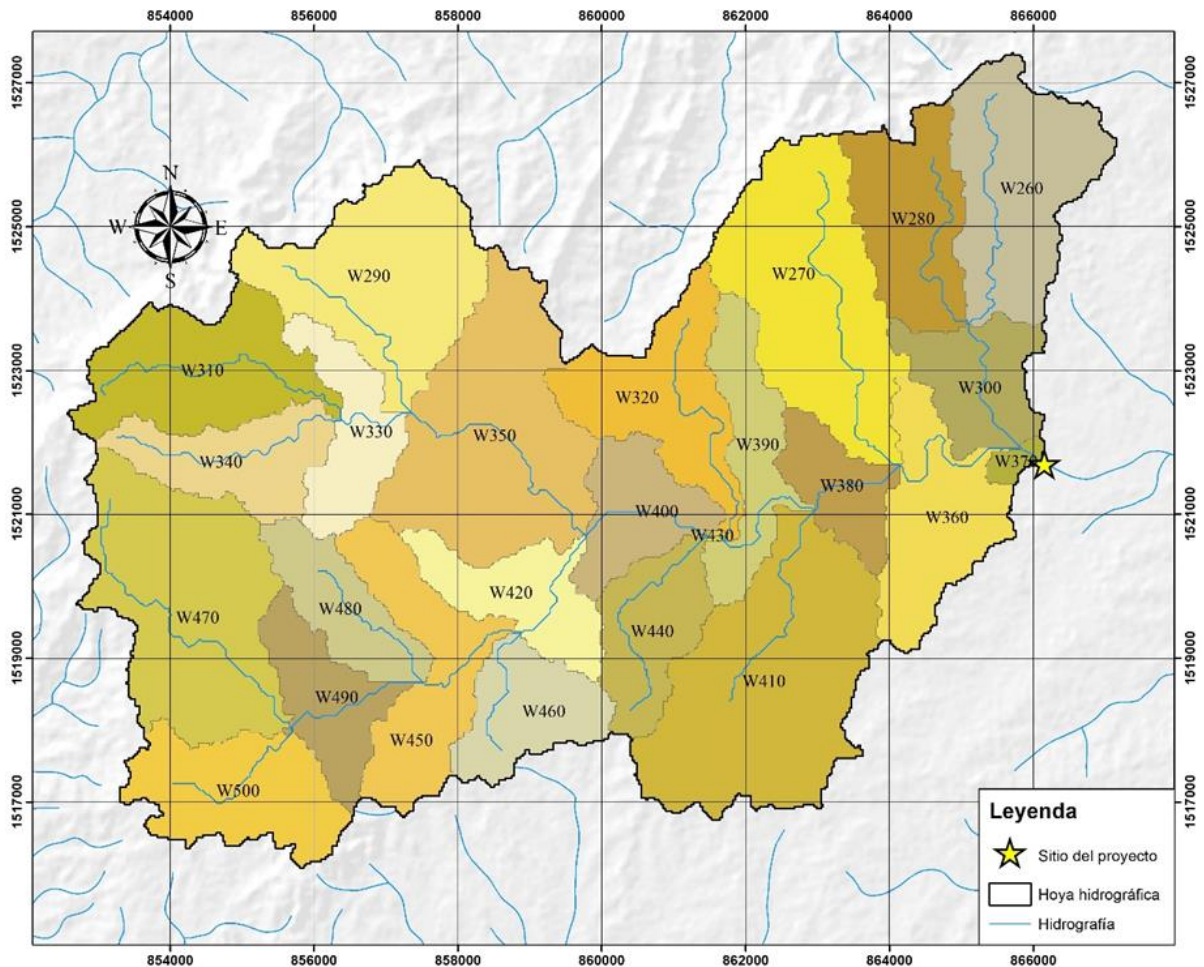
Figura 8 Modelo digital de elevaciones SRTM de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

Con el uso de herramientas SIG., se procesó el modelo de elevaciones (Figura 8), dividiendo el área de estudio en subcuencas hidrográficas que permitieron evaluar a mejor escala los parámetros de la cuenca hidrográfica, en la Figura 98 se observa el resultado de la división ya mencionada con los nombres asignados a cada subcuencas y con las corrientes de drenaje obtenidas del modelo digital de elevaciones de forma automática con algunos ajustes realizados con base en la cartografía a escala 1:100.000 suministrada por el IGAC.

Figura 9 Subcuencas hidrográficas del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades morfométricas de cada una de las subcuencas de estudio se muestra en el Cuadro 3.

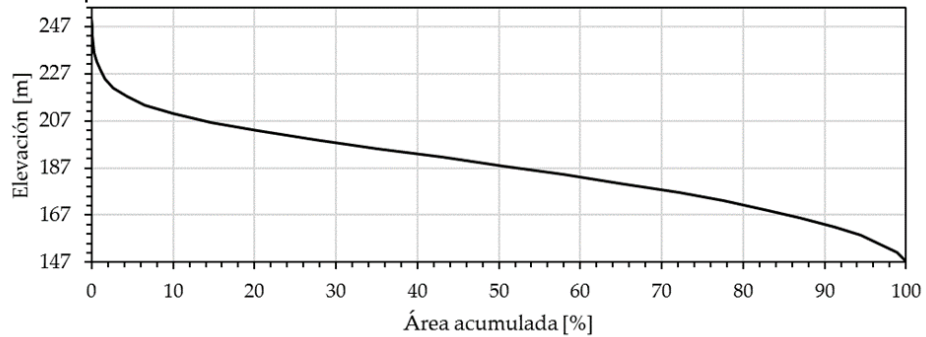
Cuadro 3 Propiedades morfométricas de las subcuencas.

Subcuenca	Área [km ²]	Perímetro [km]	K _c	K _f	Forma
W260	5.495	14.500	1.745	0.218	Alargada y rectangular
W270	7.346	17.363	1.807	0.181	Alargada y rectangular
W280	3.864	12.428	1.784	0.197	Alargada y rectangular
W290	6.324	16.206	1.818	0.279	Alargada y rectangular
W300	2.705	10.418	1.787	0.284	Alargada y rectangular
W310	4.772	15.657	2.022	0.160	Alargada y rectangular
W320	4.180	16.144	2.228	0.134	Alargada y rectangular
W330	2.597	12.245	2.143	0.246	Alargada y rectangular
W340	3.069	12.550	2.021	0.165	Alargada y rectangular
W350	7.906	18.155	1.821	0.216	Alargada y rectangular
W360	4.023	15.109	2.125	0.121	Alargada y rectangular
W370	0.325	3.229	1.598	0.308	Alargada y rectangular
W380	1.989	9.260	1.852	0.249	Alargada y rectangular
W390	2.888	15.109	2.508	0.150	Alargada y rectangular
W400	2.580	10.296	1.808	0.290	Alargada y rectangular
W410	9.040	18.825	1.766	0.262	Alargada y rectangular
W420	2.765	12.916	2.191	0.155	Alargada y rectangular
W430	0.049	1.401	1.782	0.184	Alargada y rectangular
W440	2.878	10.296	1.712	0.166	Alargada y rectangular
W450	4.097	16.632	2.318	0.227	Alargada y rectangular
W460	2.755	9.687	1.646	0.351	Alargada y rectangular
W470	7.723	18.338	1.861	0.207	Alargada y rectangular
W480	2.461	10.113	1.819	0.182	Alargada y rectangular
W490	2.657	12.245	2.119	0.166	Alargada y rectangular
W500	4.032	14.134	1.986	0.317	Alargada y rectangular

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Caracterización del relieve. En cuanto al relieve de una cuenca hidrográfica, se pueden definir varios parámetros topográficos que controlan la velocidad con que se da la escorrentía superficial y por lo tanto el tiempo de concentración. A continuación se dan estas características para la cuenca de estudio, iniciando con la curva hipsométrica (ver 9).

Figura 10 Curva hipsométrica de la cuenca de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de relieve de la cuenca se muestran en Tabla 4 y los parámetros de relieve de cada una de las subcuencas se describen en el Cuadro 4

Tabla 4 Características del relieve de la cuenca de estudio.

Elevación máxima [m]	Elevación mínima [m]	Elevación media [m]	Pendiente media [%]
257.982	146.504	189.985	6.116

Fuente: Elaboración propia

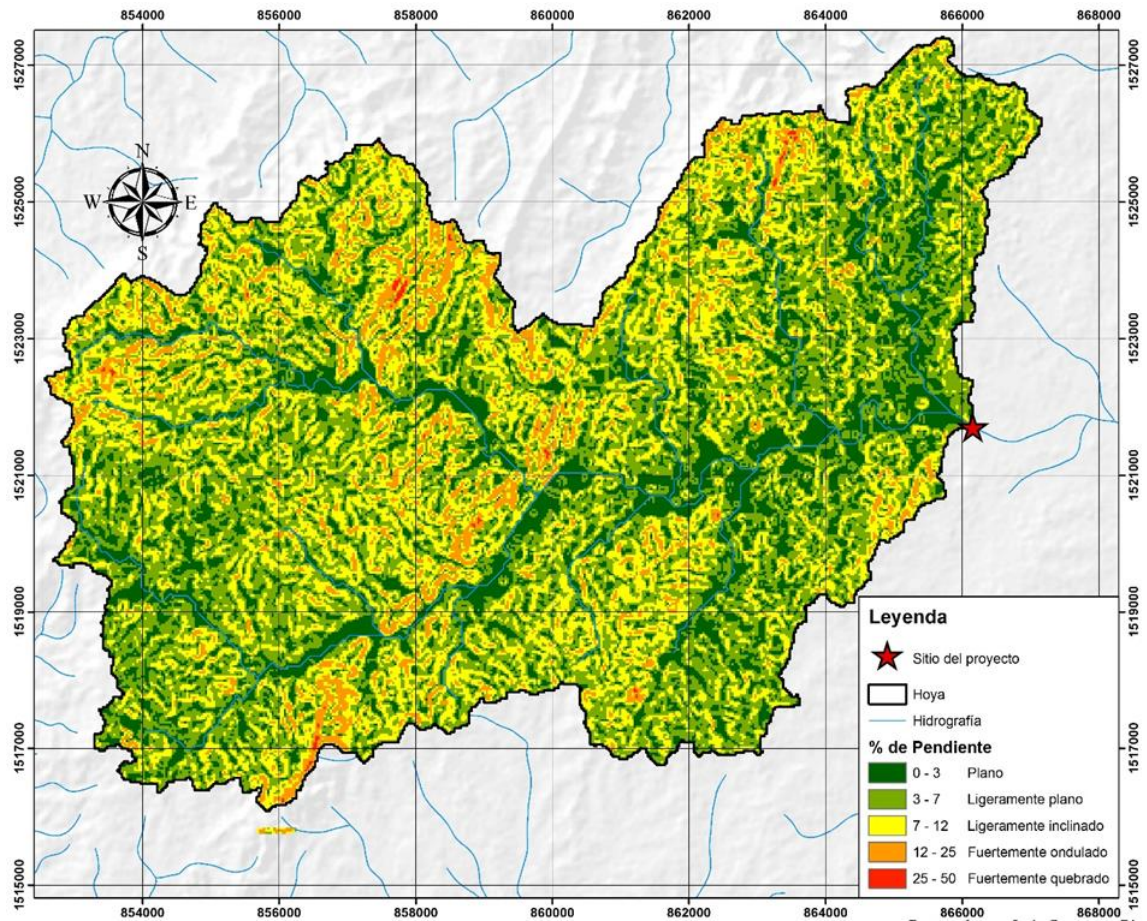
Cuadro 4 Características del relieve de las subcuencas de estudio.

Subcuenca	Elevación máxima [m]	Elevación mínima [m]	Pendiente media [%]
W260	215.95	155.35	5.20
W270	243.11	150.92	6.44
W280	206.50	155.66	5.94
W290	241.30	174.56	7.64
W300	184.61	146.00	3.95
W310	237.70	176.65	7.52
W320	225.02	158.52	6.16
W330	224.57	175.00	5.83
W340	251.67	176.48	6.34
W350	240.81	165.21	7.30
W360	196.07	146.00	5.54
W370	153.97	146.83	3.40
W380	182.85	151.19	4.46
W390	211.71	155.08	5.65
W400	180.09	160.15	5.80
W410	200.79	155.08	5.39
W420	213.53	165.21	6.75
W430	160.72	158.52	2.05
W440	213.92	159.02	6.36
W450	234.52	167.63	7.39
W460	209.45	167.63	6.26
W470	250.58	178.51	5.02
W480	220.88	176.29	5.91
W490	218.73	175.70	6.39
W500	215.00	177.68	5.83

Fuente: Elaboración propia

EL mapa de pendientes de la cuenca hidrográfica de estudio se muestra en la Figura 1110.

Figura 11 Mapa de pendientes de la cuenca de estudio.



Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Caracterización de la red de drenaje. Las características de la red de drenaje de cada una de las subcuencas de estudio se muestran en el

Cuadro 5 Parámetros de la red de drenaje de las subcuencas.

Subcuenca	Long. Cauce principal [km]	Pendiente del cauce [%]	Cota mayor [m]	Cota menor [m]	Densidad de drenaje [km/km ²]	Longitud hidráulica [km]
W260	4.32	0.00678	185.01	155.70	0.79	5.02
W270	5.44	0.00709	190.04	151.49	0.74	6.38
W280	3.31	0.00926	186.33	155.70	0.86	4.43
W290	3.32	0.00605	195.11	175.01	0.53	4.76
W300	2.27	0.00392	155.70	146.78	0.84	3.09
W310	4.69	0.00725	210.51	176.48	0.98	5.46
W320	4.28	0.00723	189.46	158.52	1.02	5.59
W330	1.27	0.00116	176.48	175.01	0.49	3.25
W340	3.94	0.01191	223.39	176.48	1.28	4.31

Subcuenca	Long. Cauce principal [km]	Pendiente del cauce [%]	Cota mayor [m]	Cota menor [m]	Densidad de drenaje [km/km ²]	Longitud hidráulica [km]
W350	3.84	0.00255	175.01	165.21	0.49	6.05
W360	2.86	0.00164	151.49	146.78	0.71	5.78
W370	0.41	0.00069	146.78	146.50	1.26	1.03
W380	1.62	0.00222	155.08	151.49	0.82	2.83
W390	1.95	0.00177	158.52	155.08	0.67	4.38
W400	1.98	0.00317	165.21	158.93	0.77	2.98
W410	3.57	0.00481	172.25	155.08	0.39	5.87
W420	1.90	0.00168	168.40	165.21	0.69	4.23
W430	0.31	0.00132	158.93	158.52	6.34	0.52
W440	3.67	0.00908	192.29	158.93	1.28	4.17
W450	1.92	0.00445	176.95	168.40	0.47	4.25
W460	2.17	0.00996	190.00	168.40	0.79	2.80
W470	5.32	0.00623	210.87	177.68	0.69	6.11
W480	2.49	0.00642	192.96	176.95	1.01	3.67
W490	2.16	0.00034	177.68	176.95	0.81	4.01
W500	2.53	0.00660	194.40	177.68	0.63	3.57

Fuente: Elaboración propia

6.1.4 Tiempo de concentración. Los tiempos de concentración calculados por diferentes métodos descritos anteriormente se muestran en Cuadro 6, para cada una de las subcuencas de estudio.

Cuadro 6 Tiempo de concentración en las subcuencas de estudio.

Subcuenca	California Culvert practice	Bransby Williams	Kirpich	Témez	Simas - Hawkins	Pasini	Bureau of Reclamation	Corps Engineers	Mediana [horas]	Mediana [minutos]	Tiempo de retardo [minutos]*
W260	1.26	2.38	1.40	1.43	3.56	3.77	1.26	0.63	1.41	84.82	50.89
W270	1.41	2.89	1.64	1.78	3.61	4.38	1.41	0.74	1.71	102.58	61.55
W280	1.17	1.77	1.01	1.01	3.31	2.62	1.17	0.48	1.17	70.00	42.00
W290	1.14	1.85	1.19	1.13	4.92	3.83	1.14	0.52	1.17	70.11	42.06
W300	0.86	1.50	1.05	0.86	3.18	3.16	0.85	0.43	0.96	57.50	34.50
W310	1.39	2.59	1.45	1.53	3.04	3.57	1.38	0.66	1.49	89.38	53.63
W320	1.38	2.39	1.35	1.39	2.94	3.32	1.37	0.61	1.38	83.04	49.82
W330	0.82	1.07	1.07	0.65	5.23	4.71	0.82	0.34	0.95	56.93	34.16
W340	0.97	2.06	1.05	1.13	1.97	2.27	0.97	0.52	1.09	65.43	39.26

Subcuena	California Culvert practice	Bransby Williams	Kirpich	Témez	Simas - Hawkins	Pasini	Bureau of Reclamation	Corps Engineers	Mediana [horas]	Mediana [minutos]	Tiempo de retardo [minutos]*
W350	1.44	2.48	1.86	1.62	5.67	6.66	1.43	0.69	1.74	104.38	62.63
W360	1.60	2.16	1.76	1.35	4.60	6.01	1.59	0.60	1.68	100.68	60.41
W370	0.46	0.47	0.55	0.24	3.71	2.10	0.46	0.16	0.47	27.96	16.78
W380	0.83	1.24	1.01	0.71	3.87	3.39	0.83	0.37	0.92	55.39	33.23
W390	1.11	1.50	1.27	0.90	4.50	4.57	1.10	0.44	1.19	71.35	42.81
W400	1.06	1.37	1.03	0.79	3.79	3.30	1.06	0.40	1.06	63.55	38.13
W410	1.69	2.01	1.38	1.29	5.68	4.95	1.68	0.58	1.68	101.05	60.63
W420	1.13	1.48	1.27	0.89	4.86	4.57	1.13	0.44	1.20	71.94	43.16
W430	0.33	0.38	0.35	0.16	1.24	0.74	0.33	0.12	0.34	20.24	12.14
W440	1.06	2.04	1.10	1.13	2.32	2.49	1.06	0.52	1.12	66.97	40.18
W450	1.00	1.19	0.88	0.71	4.87	3.22	1.00	0.37	1.00	60.06	36.04
W460	0.74	1.19	0.71	0.65	3.06	1.96	0.74	0.34	0.74	44.45	26.67
W470	1.48	2.89	1.70	1.80	3.19	4.72	1.48	0.74	1.75	104.84	62.91
W480	0.99	1.51	0.94	0.84	2.50	2.47	0.99	0.42	0.99	59.31	35.59
W490	1.11	2.33	2.60	1.51	4.76	10.52	1.11	0.65	1.92	115.17	69.10
W500	1.02	1.45	0.94	0.84	3.61	2.88	1.02	0.42	1.02	61.42	36.85
W. EST.	5.42	8.08	5.48	6.75	9.74	23.82	5.41	2.04	6.12	367.09	220.25

* Equivalente a 0.6 Tc

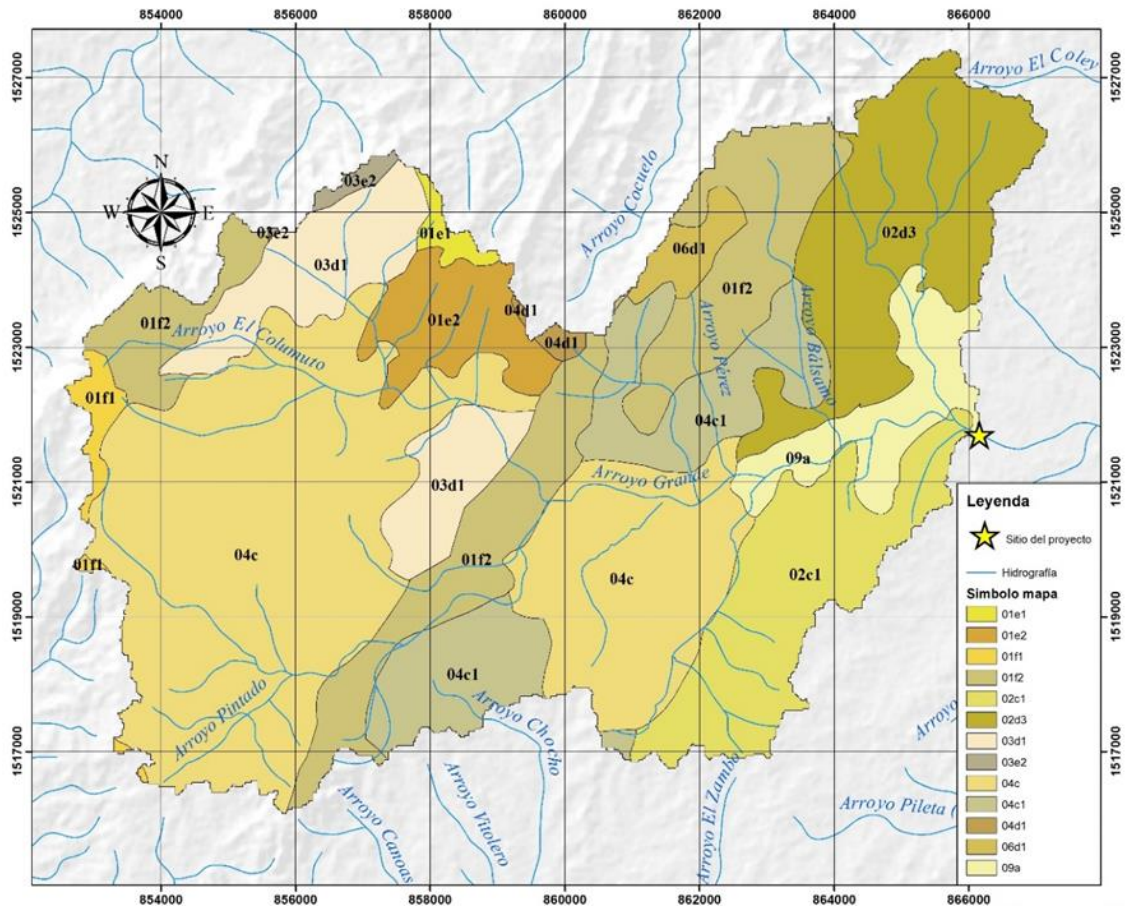
Fuente: Elaboración propia.

6.1.5 Tipos de suelo y coberturas. El suelo constituye un componente fundamental dentro de un modelo hidrológico, lo anterior debido a que influye directamente en el proceso de transformación lluvia – escorrentía, bien sea por sus características físicas como la textura, estructura, profundidad, o por su uso y cobertura.

- **Clasificación general de suelos.** Para la caracterización de los suelos de la zona de estudio se toma como información base, el estudio de suelos y zonificación de tierras del departamento de Sucre (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (Colombia), 1999). En la zona de estudio se encuentran suelos que tienen texturas arcillosas, franca fina y franca gruesa, y van de muy

superficiales a moderadamente profundos. A continuación, se muestra el mapa (ver Figura 1211) y la cuadro de clasificación de los suelos presentes en el área estudiada.

Figura 12 Mapa general de suelos del área de estudio.



Fuente: Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Sucre.

Cuadro 7. Características de los suelos de la zona de estudio.

Símbolo mapa	Paisaje	Tipo de relieve	Litología sedimentos	Características de relieve	Clima	Unidad cartográfica y componentes taxonómicos	Características principales de los suelos	
							Particulares	Comunes
01e1, 01e2, 01f1, 01f2	Montaña	Hoback barras y crestones	Areniscas calcáreas y/o calizas	Relieve quebrado, fuertemente quebrado y escarpado, con derrubios frecuentes, erosión hídrica por escurrimiento concentrado; disolución química.	Cálido Seco	Asociación Lithic Haplustolls Typic Ustorthents	Textura franca fina, superficiales, reacción neutra. Textura franca gruesa, moderadamente profundos, moderadamente ácidos.	Excesivamente drenados, fertilidad moderada.

Símbolo mapa	Paisaje	Tipo de relieve	Litología sedimentos	Características de relieve	Clima	Unidad cartográfica y componentes taxonómicos	Características principales de los suelos	
							Particulares	Comunes
02c1, 02d3	Lomerío	Lomas	Areniscas calcáreas poco consolidadas	Relieve ligeramente ondulado hasta escarpado: alta susceptibilidad a la erosión.	Cálido Seco	Asociación Lithic Ustorthents Typic Ustorthents	Textura arenosa, muy superficiales, drenaje excesivo. Textura franca gruesa gravilosa, moderadamente profundo, bien drenados.	Neutros y ligeramente alcalinos, erosión moderada a severa, alta fertilidad.
03d1, 03e2	Lomerío	Lomas	Areniscas	Relieve moderadamente ondulado y fuertemente quebrado; alta susceptibilidad a la erosión; Escurrimiento difuso y concentrado.	Cálido Seco	Asociación Typic Ustropepts Vertic Ustropepts	Textura franca gruesa, moderadamente profundos, neutros, drenaje excesivo. Textura franca fina, profundos, bien drenados, moderadamente ácidos.	Fertilidad moderada.
04c, 04c1, 04d1	Lomerío	Lomas	Arcillas carbonatadas	Relieve ligera a fuertemente ondulado, quebrado y fuertemente quebrado.	Cálido Seco	Consociación Chromic Haplusterts Typic Haplusterts	Textura arcillosa fina, moderadamente profundos, neutros.	Fertilidad alta.
06d1	Lomerío	Lomas	Arcillas acidas gravas y arenas	Relieve ligeramente ondulado a moderadamente quebrado; escurrimiento difuso, concentrado e intenso.	Cálido Seco	Asociación Typic Ustorthents Ustoxic Dystrapepts	Textura franca gruesa, muy fuertemente ácidos. Textura franca sobre arcilla, extremadamente ácidos.	Fertilidad baja, bien drenados, moderadamente profundos.
09a	Lomerío	Vallecito	Sedimentos finos	Relieve plano y plano cóncavo, acumulaciones coluvio - aluviales.	Cálido Seco	Asociación Typic Haplusterts Vertic Topaquepts	Textura arcillosa, bien drenados, superficiales, limitados por arcillas compactas. Textura arcillosa muy fina, pobremente drenados, superficiales, limitados por fluctuaciones de nivel freático.	Reacción neutra, fertilidad alta.

Fuente: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (Colombia). (1999). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Sucre. Bogotá.

- **Clasificación hidrología de los suelos.** Para el cálculo de los caudales hidrológicos se utiliza el método del número de la curva CN del Natural Resources Conservation Service (NRCS) (FERRER, 2000), en el cual se clasifica los suelos de la siguiente manera.
 - A (Bajo potencial de esorrentía). Arenas profundas, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

- B (Moderadamente bajo potencial de escorrentía) Suelos poco profundos depositados por el viento, margas arenosas.
- C (Moderadamente alto potencial de escorrentía) Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con alto contenido de arcilla.
- D (Alto potencial de escorrentía) Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Para establecer la equivalencia entre las clases texturales mostradas en el Cuadro 7, y los grupos hidrológicos de suelos *FERRER (2000)* propone el uso de la Tabla 5.

Tabla 5 Equivalencias entre clases texturales y grupos hidrológicos de suelo.

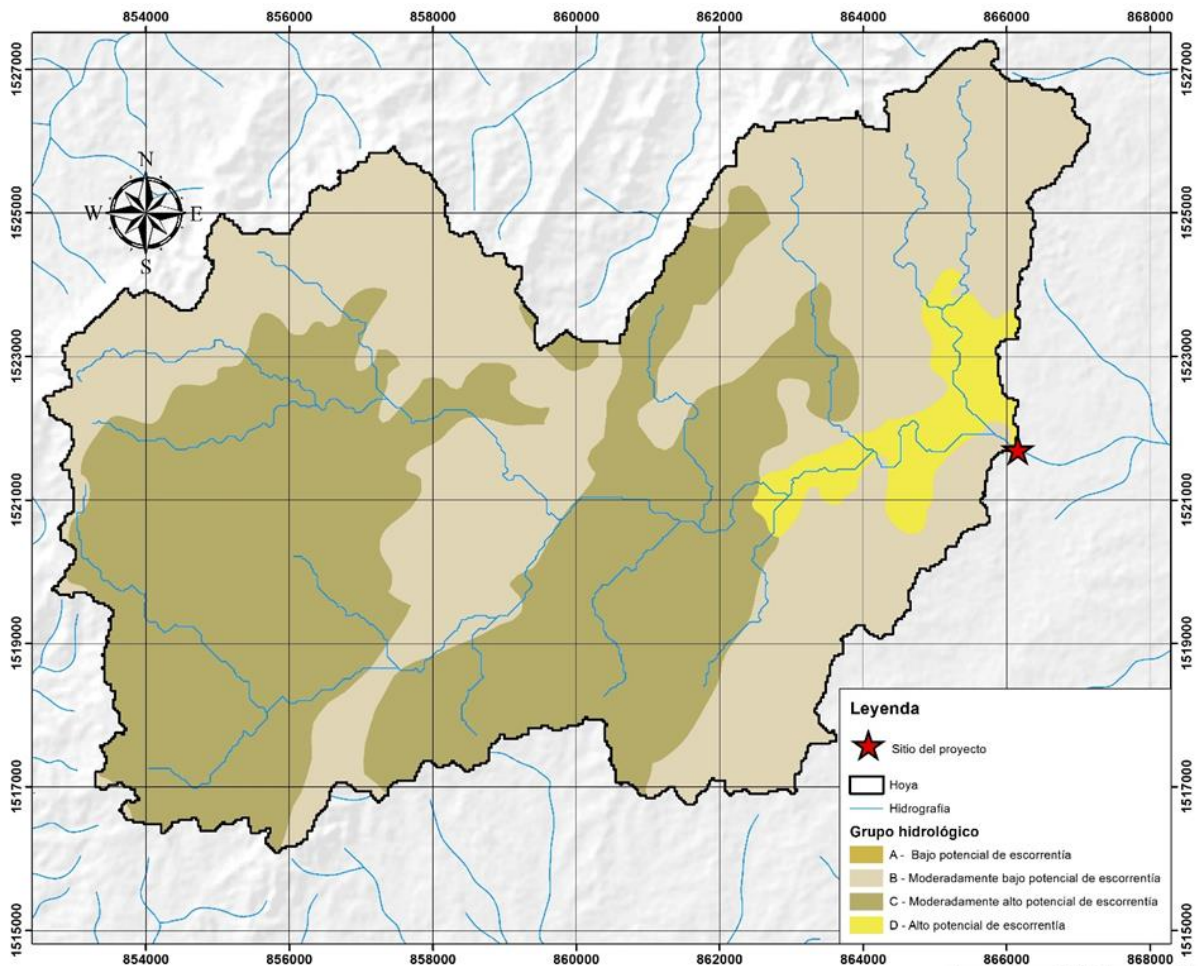
Textura	Grupo hidrológico
Arenosa	A
Arenoso - Franca	A
Arcillosa	D
Arcillo - Arenosa	C
Arcillo - Limosa	D
Franca	C
Franco - Arenosa	B
Franco - Arcillosa	C
Franco - Arcillo - Arenosa	C
Franco - Arcillo - Limosa	C
Franco - Limosa	C
Limosa	D

Fuente. FERRER, J. Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro Numero de la Curva: perfiles de suelo y teledetección.

Con base en los datos de Tabla 5 y la información del mapa de la 11, se genera el mapa de clasificación en grupos hidrológicos de la zona de estudio tal como se muestra en la

Figura 132. En la Tabla 6 se muestra el porcentaje de áreas por cada grupo hidrológico presente en la zona de estudio.

Figura 13 Mapa de clasificación hidrológica de los suelos.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6 Porcentaje de área por cada grupo hidrológico.

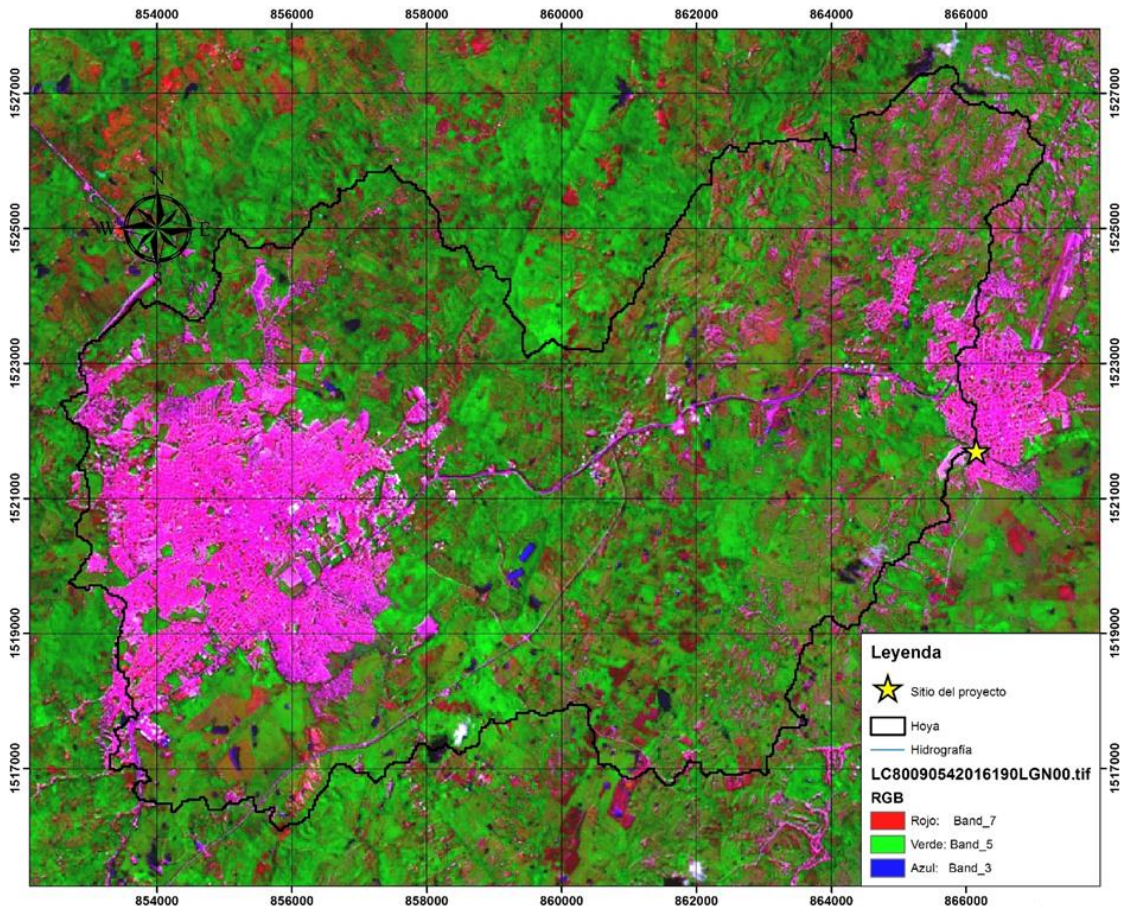
Grupo hidrológico	Área [km ²]	Porcentaje
A	0.00	0.00%
B	47.76	48.48%
C	46.36	47.06%
D	4.39	4.46%

Fuente: Elaboración propia.

- Cobertura de los suelos.** Al igual que las propiedades físicas, la cobertura del suelo juega un papel importante en el proceso de transformación lluvia – escorrentía. Para el análisis de coberturas de la zona de estudio se utiliza una

imagen multiespectral del satélite Landsat 8 (USGS, 2015) capturada el 22 de julio del 2016, el id de la escena utilizada es LC80090542016190LGN00. Esta imagen fue procesada software SIG, permitiendo hacer el análisis de coberturas combinando las diferentes bandas espectrales tal como se ve en la Figura 143.

Figura 14 Escena LC80090542016190LGN00, combinación de falso color 7 5 3.



Fuente. Misión Landsat 8.

Como se ve en la Figura 143, resulta fácil distinguir las zonas urbanas, los cuerpos de aguas, vías y caminos, y algunos tipos de vegetación. La

Figura 154 corresponde al mapa de coberturas de la zona de estudios obtenido a partir de la imagen satelital.

Para el cálculo de los caudales hidrológicos por el método del número de la curva, se genera un mapa de este parámetro para la zona de estudio (ver

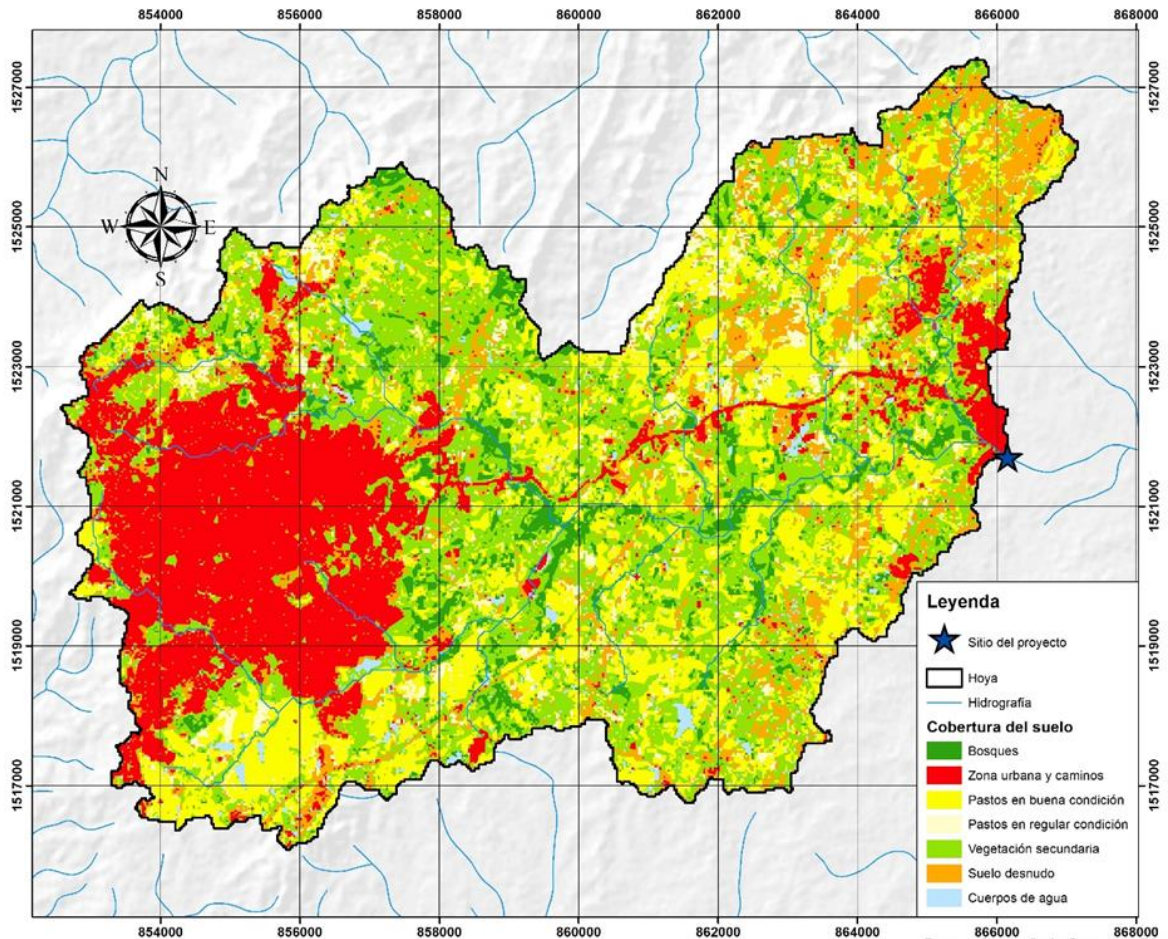
Figura 165). El proceso consiste asignar un valor del CN a cada tipo de cobertura en función de la clasificación del grupo hidrológico de suelos. En el Cuadro 8 se relaciona el CN, el grupo hidrológico y las coberturas.

Cuadro 8 Tabla de relación CN – grupo hidrológico – coberturas.

Cobertura del suelo	Grupo hidrológico de suelos			
	A	B	C	D
Bosques	30	55	70	77
Zona urbana y caminos	59	74	82	86
Pastos en buena condición	39	61	74	80
Pastos en regular condición	59	69	79	84
Vegetación secundaria	35	56	70	77
Suelo desnudo	59	74	82	86
Cuerpos de agua	90	90	90	90

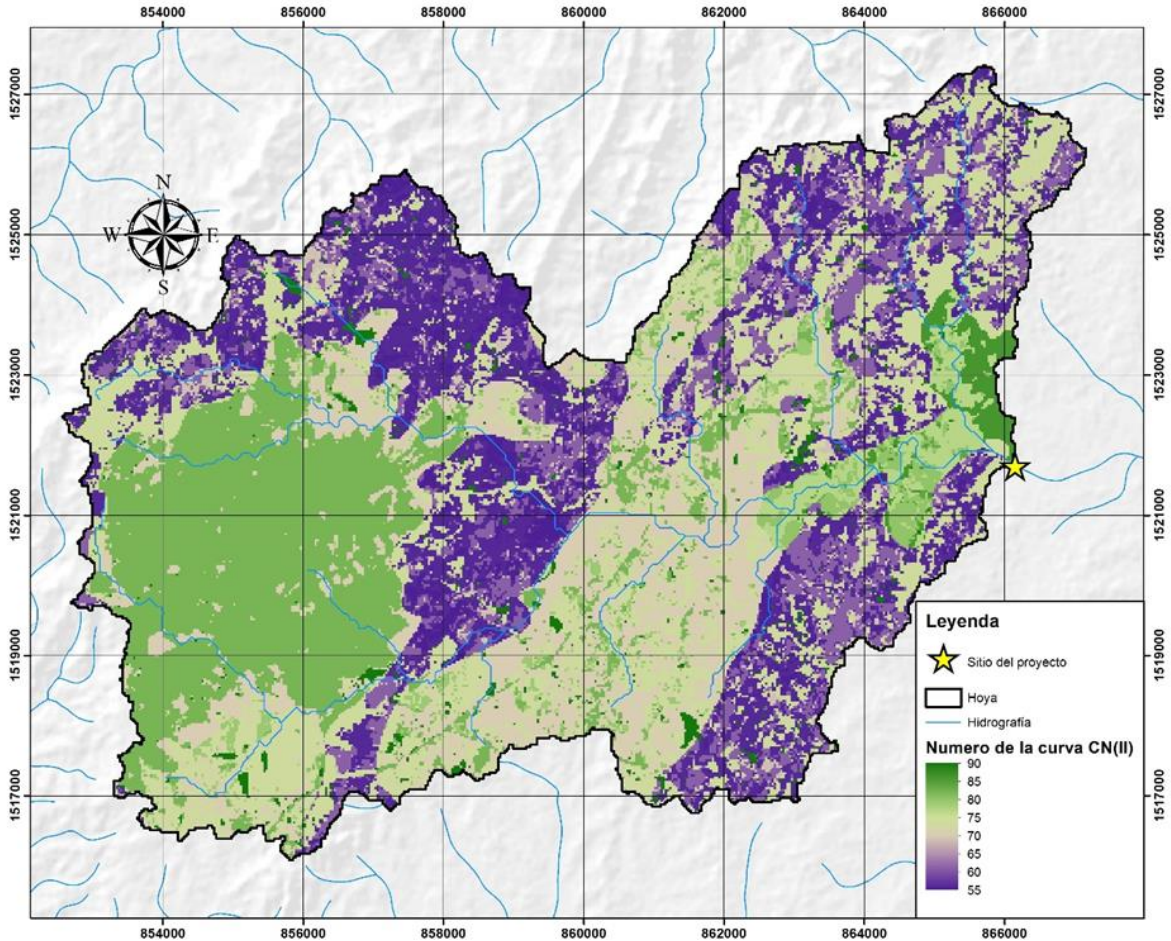
Fuente: CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW - HILL Interamericana S.A.

Figura 15 Mapa de coberturas de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16 Mapa del número de la curva para condiciones normales CN(II).



Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo hidrológico se usa la condición más crítica, por lo que se debe calcular el CN(III), S(III) e $I_a(III)$, para conocer la fundamentación teórica del método consultar (CHOW, MAIDMENT, & MAYS, Hidrología Aplicada, 1994). A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo de los parámetros requeridos en el modelo hidrológico.

- Número de la curva para la condición antecedente de humedad 3, CN(III)

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

$CN(III)$ número de la curva para la condición antecedente de humedad 3 [adimensional]

$CN(II)$ número de la curva para la condición antecedente de humedad normal [adimensional]

- Retención potencial máxima para la condición antecedente de humedad 3, $S(III)$

$$S(III) = \frac{25400}{CN(III)} - 254$$

$CN(III)$ número de la curva para la condición antecedente de humedad 3 [adimensional]

$S(III)$ retención potencial máxima para la condición antecedente de humedad 3 [mm]

- Abstracción inicial para la condición antecedente de humedad 3, $I_a(III)$

$$I_a(III) = 0.2S(III)$$

$S(III)$ retención potencial máxima para la condición antecedente de humedad 3 [mm]

$I_a(III)$ abstracción inicial para la condición antecedente de humedad 3 [mm]

Para cada una de la subcuencas los parámetros del CN requeridos por el modelo hidrológico son calculados los resultados se muestran en el cu.

Cuadro 9 Parámetros del CN requeridos por el modelo hidrológico.

Subcuenca	CN(II)	CN(III)	S(III)	$I_a(III)$
W260	66.97	82.34	54.46	10.89
W270	68.13	83.10	51.66	10.33
W280	65.37	81.28	58.51	11.70
W290	62.20	79.10	67.11	13.42
W300	76.98	88.49	33.03	6.61
W310	68.14	83.10	51.65	10.33
W320	68.70	83.46	50.32	10.06
W330	77.42	88.74	32.21	6.44
W340	80.28	90.35	27.13	5.43
W350	64.72	80.84	60.20	12.04
W360	68.19	83.14	51.53	10.31
W370	68.62	83.41	50.51	10.10
W380	71.22	85.06	44.62	8.92
W390	70.97	84.90	45.17	9.03
W400	71.49	85.23	44.03	8.81

Subcuenca	CN(II)	CN(III)	S(III)	Ia(III)
W410	66.52	82.05	55.58	11.12
W420	65.50	81.37	58.16	11.63
W430	71.28	85.10	44.49	8.90
W440	73.57	86.49	39.67	7.93
W450	70.94	84.89	45.23	9.05
W460	73.16	86.24	40.52	8.10
W470	79.39	89.86	28.68	5.74
W480	79.88	90.13	27.82	5.56
W490	76.16	88.02	34.57	6.91
W500	75.11	87.41	36.59	7.32

Fuente: Elaboración propia.

6.1.6 Análisis climatológico. El clima de la zona de estudio es cálido seco, para el análisis de su comportamiento se analizaron los datos de la estación meteorológica Univ. de Sucre con código 25025270 que pertenece a la red de estaciones del IDEAM. En el Cuadro 10 Datos climatológicos de la estación Univ. de Sucre., se muestran los valores medios mensuales de precipitación, temperatura media máxima, temperatura media mínima, temperatura media, humedad relativa y evaporación media, que fueron extraídas de las series de tiempo de 31 años suministrados por el IDEAM (ver anexos), también se muestran los datos de evapotranspiración calculados por el método del tanque evaporímetro clase A.

Cuadro 10 Datos climatológicos de la estación Univ. de Sucre.

Mes	Precipitación media mensual [mm]	Temperatura media máxima [°C]	Temperatura media mínima [°C]	Temperatura media [°C]	Humedad relativa media mensual [mm]	Evaporación media mensual [mm]	Evapotranspiración media mensual [mm]*
Enero	17	35.2	20.4	26.9	78	153.3	122.6
Febrero	27.6	36	20.8	27.1	77	155.5	124.4
Marzo	38.4	36.3	21.2	27.3	77	165.8	132.6
Abril	117.9	35.7	21.5	27.4	80	140.9	112.7
Mayo	159.7	34.6	21.1	27.1	83	118.4	94.7
Junio	150.4	34.5	20.7	27.2	83	125	100.0
Julio	128.7	34.8	20.5	27.2	82	138.2	110.6
Agosto	170.5	34.7	20.2	26.9	83	129.1	103.3
Septiembre	167.5	34	20.6	26.6	84	149.2	119.4
Octubre	138	33.4	20.9	26.4	85	109.9	87.9
Noviembre	104	33.5	21.1	26.4	84	104	83.2
Diciembre	43	34	20.8	26.8	82	126.4	101.1
Suma	1262.7	N/A	N/A	N/A	N/A	1615.7	1292.6
Media	N/A	34.7	20.8	26.9	81.5	N/A	N/A

* Evapotranspiración calculada por el método del tanque evaporímetro Clase A

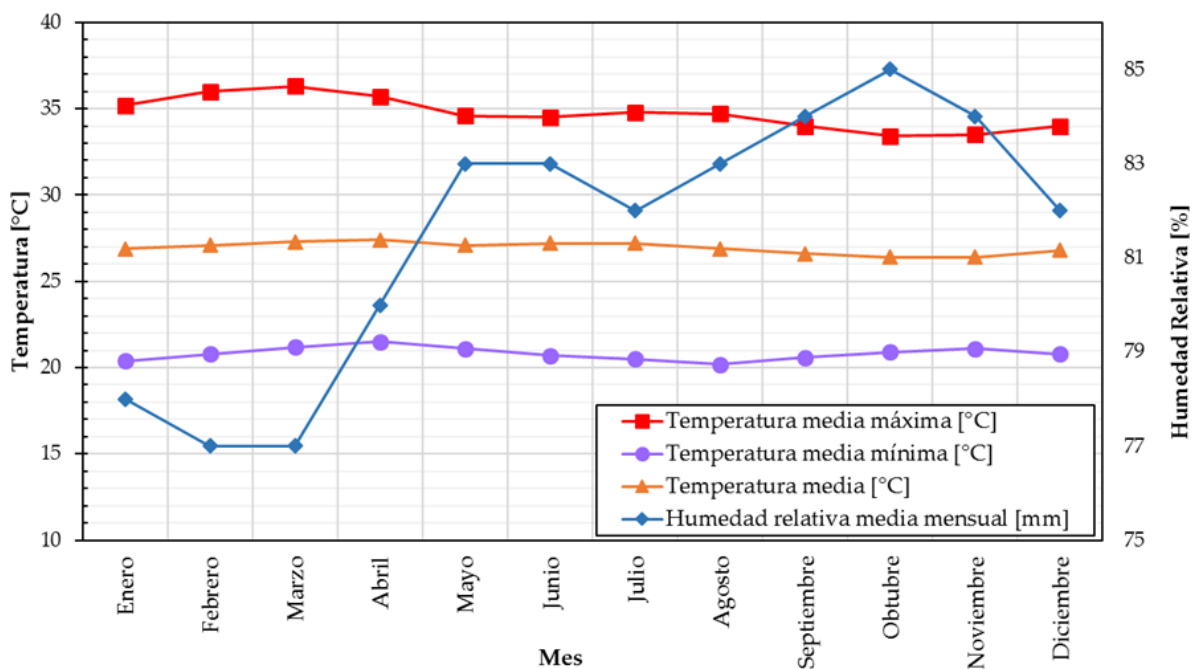
Fuente. Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM

En el cuadro anterior se aprecia que la temperatura media anual es de 26.9 °C, y que oscila entre una media mínima de 20.8 °C y una media máxima de 34.7 °C, siendo los meses de enero, febrero, marzo y abril los que reportan las temperaturas más altas, durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, se estabiliza cerca de la media con la llegada de las lluvias y finalmente en septiembre, octubre, noviembre y diciembre se aprecian las temperaturas más bajas, (ver Figura 17 y Figura 18). La humedad relativa media es del 81.5 % registrando los valores más bajos en los cuatro primeros meses del año y los más altos en los cuatro meses finales, oscilando entre el 77% y el 85%.

La precipitación media anual en la zona de estudio es del orden de los 1263 mm, siendo mayo, junio, agosto, septiembre y octubre los meses más lluviosos, y julio el mes en que se presenta una pequeña disminución de la precipitación, lo cual le confiere un comportamiento bimodal. El periodo de escasez de lluvias lo conforman los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (ver Figura 187).

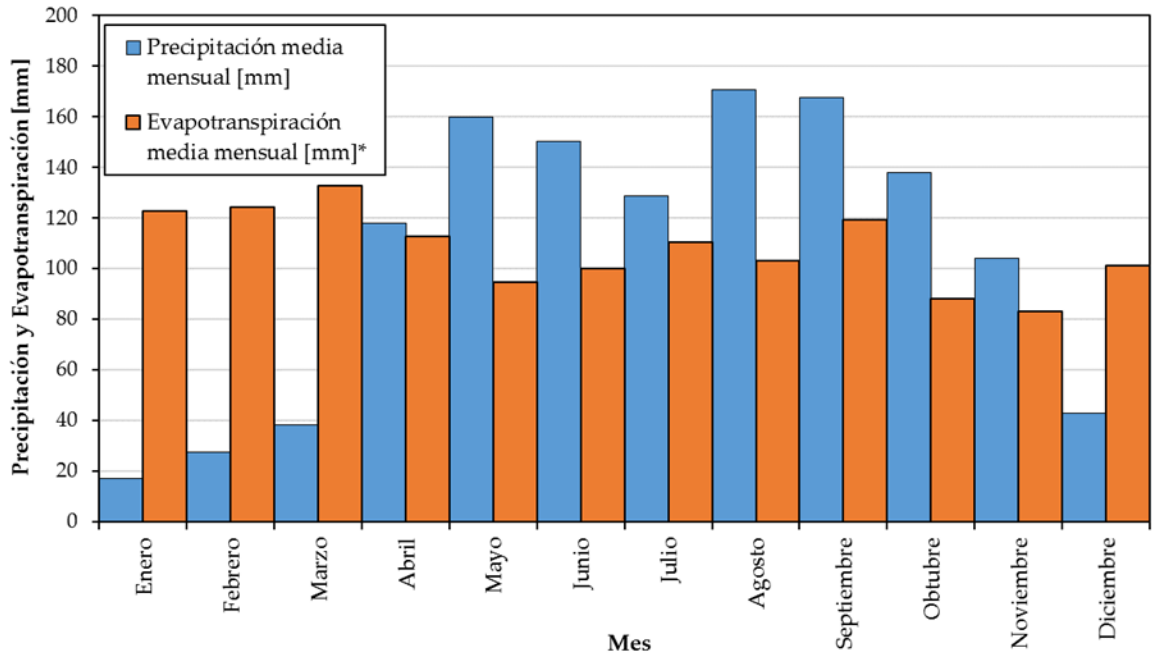
La evapotranspiración ha sido calculada a partir de los datos de evaporación del tanque evaporímetro clase A, obteniéndose los valores mostrados en el Cuadro 10. Los resultados muestran que la oferta hídrica es superada por la demanda, lo que se constituye en un déficit del recurso hídrico y que este solo resulta aprovechable en los meses en que la precipitación resulta mayor que las pérdidas generadas sobre la cuenca hidrográfica (ver Figura 187).

Figura 17 Temperatura y humedad relativa mensual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18 Precipitación y evapotranspiración media mensual.



Fuente: Elaboración propia.

6.1.7 Precipitación de diseño. Dentro de la zona de estudio se cuenta con datos de la estación pluviométrica libra arriba con código 25020400 del municipio de Corozal, los datos reportados por esta estación son el objeto del análisis de esta numeral. En dicho análisis se realiza un análisis de eventos extremos mediante el un ajuste a una función de distribución de probabilidad tipo Gumbel para determinar la precipitación de diseño. En la Tabla 7 se muestra la precipitación máxima en 24 horas ($P_{m\acute{a}x}$) para la estación de estudio.

Tabla 7 Precipitación máxima estación libra arriba

Año	$P_{m\acute{a}x}$ 24 h [mm]
1987	73.0
1988	66.0
1989	72.0
1990	80.0
1991	71.0
1992	87.0
1993	70.0
1994	154.0
1995	95.0
1996	87.5
1997	68.4
1998	116.0
2000	56.0
2001	75.0
2002	70.0

Año	P _{máx} 24 h [mm]
2003	85.0
2004	85.0
2005	95.0
2007	70.2
2008	103.7
2009	100.5
2010	69.5
2011	111.1
2012	59.5
2013	104.5
2014	78.2

Fuente: IDEAM, modificada por los autores.

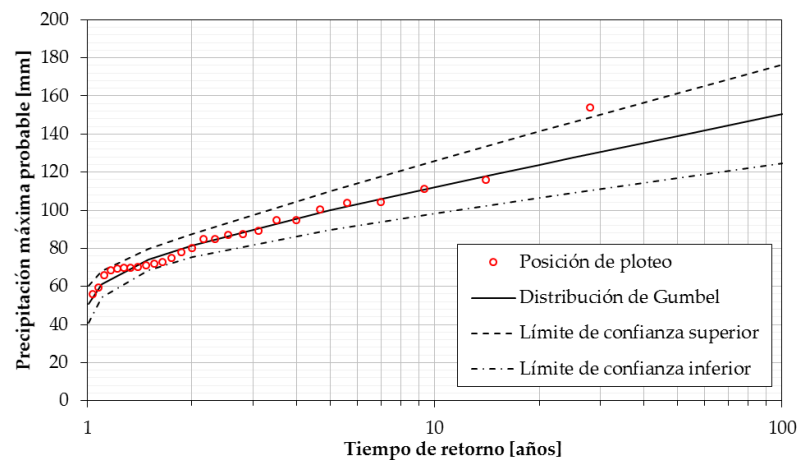
Los parámetros utilizados para el cálculo de ajuste de distribución a la función Gumbel son mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8 Parámetros para el cálculo de la distribución de Gumbel, estación libra arriba

Parámetro	Valor
N° de datos	27
Media	84.9037
Desviación estándar	20.8652
Coficiente de asimetría	1.4857
α	16.2685
μ	75.5135
Nivel de confianza β	90 %
Nivel de significancia α	5 %
Probabilidad acumulada	95 %
Z	1.6465

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19 Distribución de Gumbel para P max. en 24 horas, estación libra arriba



Fuente: Elaboración propia.

- **Curva intensidad, duración y frecuencia.** Como se explicó previamente es necesario conocer la intensidad de la lluvia, así como su duración para un periodo de tiempo determinado (frecuencia). Figura 66 se observa que la zona de estudio se encuentra en la región R2, por lo tanto, los parámetros de regresión y datos para determinar las curvas IDF son los siguientes (ver Cuadro 11):

Cuadro 11 Parámetros para el cálculo de curvas I – D – F en la zona de estudio

REGION	a	b	c	d	M*
R2	24.85	0.22	0.5	0.1	84.904

* M corresponde a la media de la muestra presentada en la Tabla 8

Fuente: INVIAS. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá.

A continuación en el Cuadro 12 se muestran valores de intensidad calculados para diferentes tiempos de retorno.

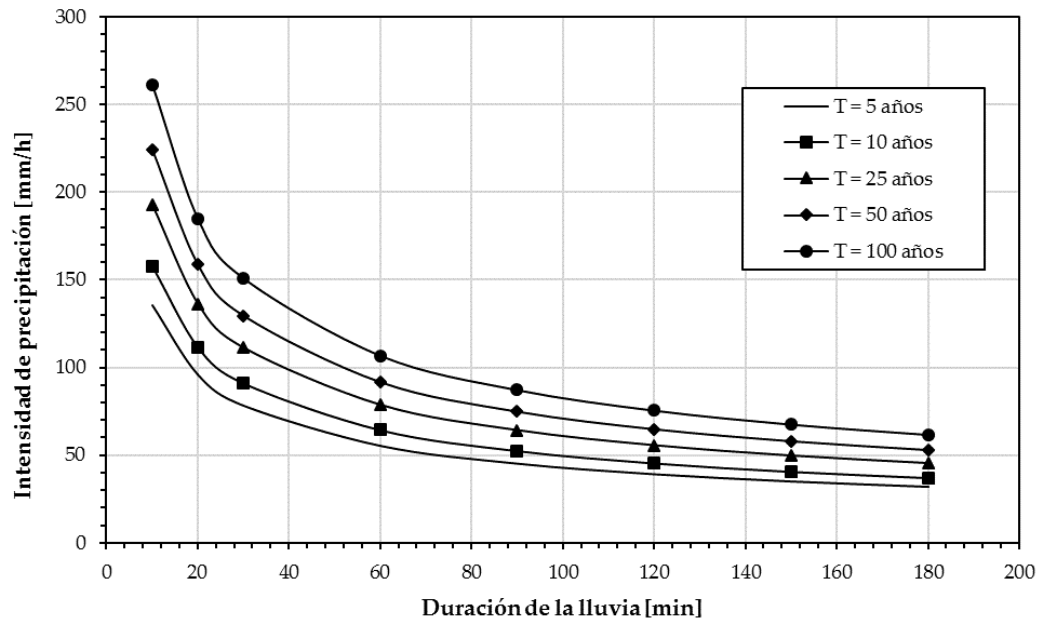
Cuadro 12 Valores de Intensidad para varios tiempos de retorno y duración

Duración de la lluvia [min]	Periodo de retorno [años]				
	5	10	25	50	100
10	135.23	157.51	192.68	224.42	261.39
20	95.62	111.37	136.25	158.69	184.83
30	78.07	90.94	111.25	129.57	150.92
60	55.21	64.30	78.66	91.62	106.71
90	45.08	52.50	64.23	74.81	87.31
120	39.04	45.47	55.62	64.79	75.46
150	34.92	40.67	49.75	57.95	67.49
180	31.87	37.12	45.42	52.90	61.61

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Figura 20 se muestran la curvas IDF calculadas para diferentes tiempo de retorno.

Figura 20 Curvas IDF estación libra arriba (25020400) en Corozal



Fuente: Elaboración propia.

- Hietograma de lluvias espaciales.** Los hietogramas de lluvia puntual se deben transformar a hietogramas de lluvia espacial, para tener en cuenta el hecho de la espacialidad de la hoya y que la precipitación promedio en un aguacero en una hoya es menor a medida que aumenta su área de drenaje.

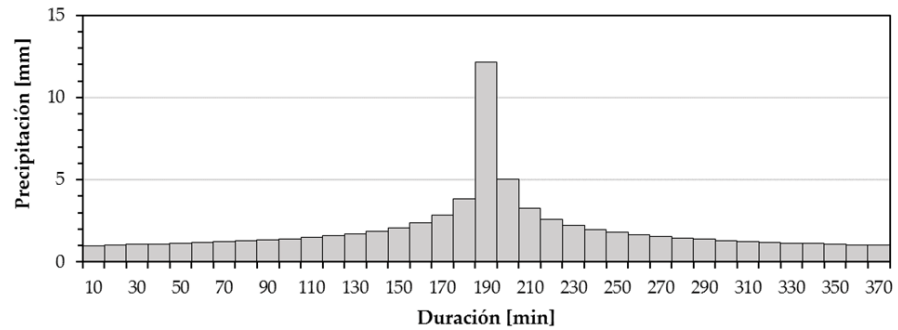
Para obtener el hietograma puntual de la lluvia de diseño en la zona de estudio se utilizó el método de los bloques atenuados (GÁMEZ MORALES, 2010) y las curvas IDF mostradas en la Figura 209. Se consideró una duración de la lluvia de 6 horas y 10 minutos que equivale al tiempo de concentración de toda la hoya hidrográfica estudiada y se aplicó el factor de reducción por área (FRA) de Fhrüling tal como se indica en el manual de drenaje de carreteras del INVIAS y se obtuvieron los hietogramas de lluvia espacial para tiempos de retorno de 10 (ver Tabla 9 y Figura), 25 (ver Tabla 10 y Figura) y 50 (ver Tabla 11 y Figura 2120) años tal como se ve a continuación.

Tabla 9 Base para estimación de hietograma de lluvia espacial para T = 10 años

Tiempo de retorno	10
Duración de la lluvia (Tc) [min]	367.09
Número de bloques	37
Intervalo de tiempo aprox. [min]	9.92
Intervalo de tiempo seleccionado [min]	10.00
Factor de reducción por área	0.462

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18 Hietograma de lluvia espacial para T = 10 años



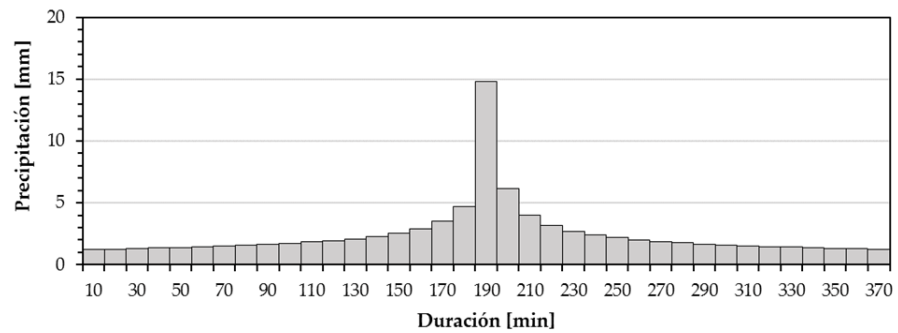
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10 Base para estimación de hietograma de lluvia espacial para T = 25 años

Tiempo de retorno	25
Duración de la lluvia (Tc) [min]	367.09
Número de bloques	37
Intervalo de tiempo aprox. [min]	9.92
Intervalo de tiempo seleccionado [min]	10.00
Factor de reducción por área	0.462

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19 Hietograma de lluvia espacial para T = 25 años



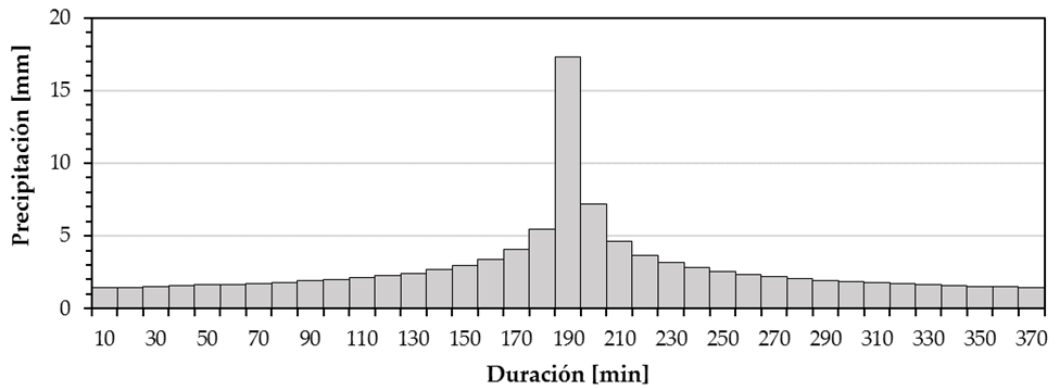
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Base para estimación de hietograma de lluvia espacial para T = 50 años

Tiempo de retorno	50
Duración de la lluvia (Tc) [min]	367.09
Número de bloques	37
Intervalo de tiempo aprox. [min]	9.92
Intervalo de tiempo seleccionado [min]	10.00
Factor de reducción por área	0.462

Fuente: Elaboración propia.

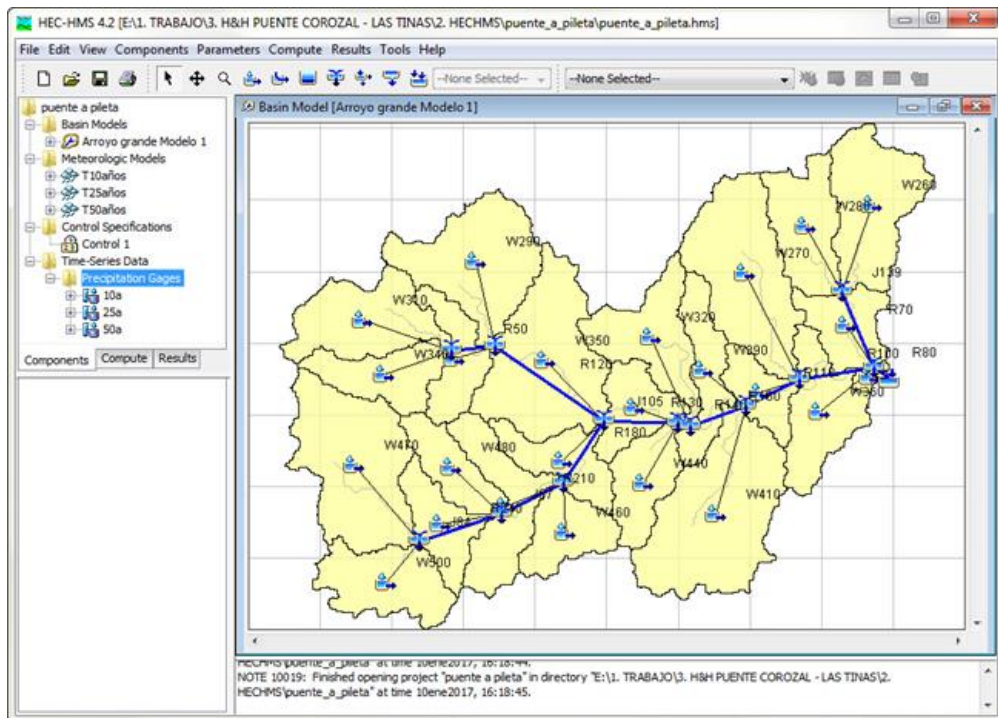
Figura 21 Hietograma de lluvia espacial para T = 50 años



Fuente: Elaboración propia.

6.1.8 análisis de caudales. Una vez obtenidas la precipitación de diseño y se conocen las características físicas de la cuenca de diseño (suelos y coberturas) se utiliza el software HEC-HMS, con el fin de implementar un modelo hidrológico de la zona de estudio y obtener así los caudales máximos probables para casa tiempo de retorno. En la Figura se muestra el modelo hidrológico resultante para la cuenca Hidrológica de interés.

Figura 21 Modelo hidrológico HEC-HMS.



Fuente: Elaboración propia.

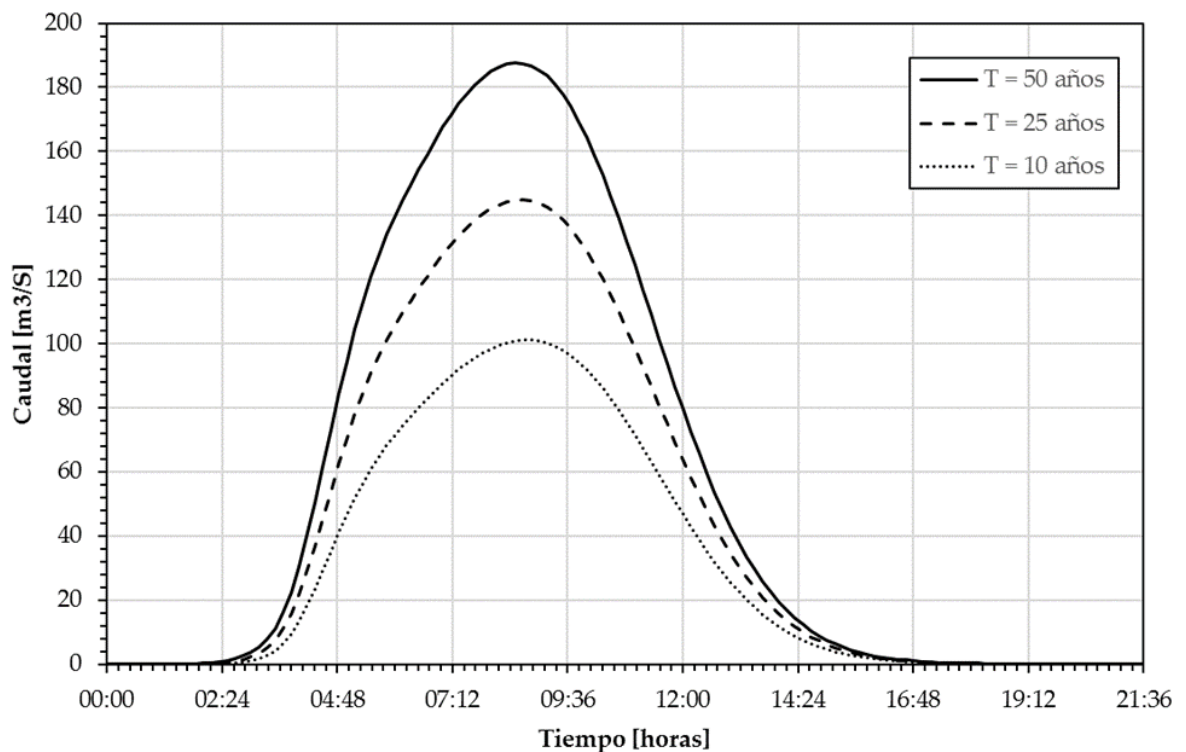
Los caudales máximos probables obtenidos con el modelo hidrológico HEC-HMS aplicando los métodos ya descritos, constituyen la base para el diseño hidráulico que será abordado en el siguiente numeral. A continuación los resultados obtenidos del modelo hidrológico (ver Tabla 12 y Figura 224).

Tabla 12 Caudales máximos probables.

Periodo de retorno [años]	Caudal máximo probable [m ³ /s]
10	101.1
25	144.8
50	187.6

Fuente: Elaboración propia.

Figura 222 Hidrogramas de crecida para diferentes tiempos de retorno.



Fuente: Elaboración propia.

6.1.9 Modelo hidráulico del sitio de interés. Para un análisis hidráulico básico se requiere de la topografía del canal (secciones transversales, perfil longitudinal), de la rugosidad de la superficie del terreno (coeficiente de rugosidad de Manning) y las condiciones de frontera que se encargan de definir el comportamiento del modelo en la primera sección (aguas arriba) y en la última (aguas abajo). Cuando se modela con flujo uniforme estas condiciones pueden ser: un nivel de aguas en alguna sección de control, el tirante crítico definido por las condiciones de la sección

hidráulica, el tirante normal que está en función de la sección transversal y la pendiente del canal y, finalmente una curva de calibración de caudales si se tiene.

- **Coefficiente de Manning.** El valor del coeficiente de rugosidad de Manning fue obtenido con el procedimiento desarrollado por Cowan tal como se explica en (CHOW, Hidraulica de canales abiertos, 1994), donde n puede calcularse según:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

Y los valores correspondientes a las variables anteriores se extraen del siguiente

Cuadro 13 Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad según Cowan.

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.025
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variación de la sección transversal	Gradual	n_2	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0.000
	Menor		0.010 - 0.015
	Apreciable		0.020 - 0.030
	Severo		0.040 - 0.060
Vegetación	Baja	n_4	0.005 - 0.010
	Media		0.010 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.050
	Muy alta		0.050 - 0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m_5	1
	Apreciable		1.15
	Severo		1.3

Fuente: CHOW, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Bogotá: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A.

Con base en las condiciones del sitio (ver Figura 233) y aplicando el procedimiento anterior se obtiene los valores para el coeficiente de rugosidad de la parte del canal sin revestir (ver Cuadro 14).

Figura 233. Fotografías de las condiciones existentes en el sitio del proyecto.



(1) Vista aguas abajo



(2) Vista aguas arriba



(3) Cara del puente aguas abajo



(4) Cara del puente aguas arriba

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14 Coeficiente de rugosidad de Manning de canal sin revestimiento.

n_0	n_1	n_2	n_3	n_4	m_5	n
0.020	0.005	0.005	0.000	0.005	1.000	0.035

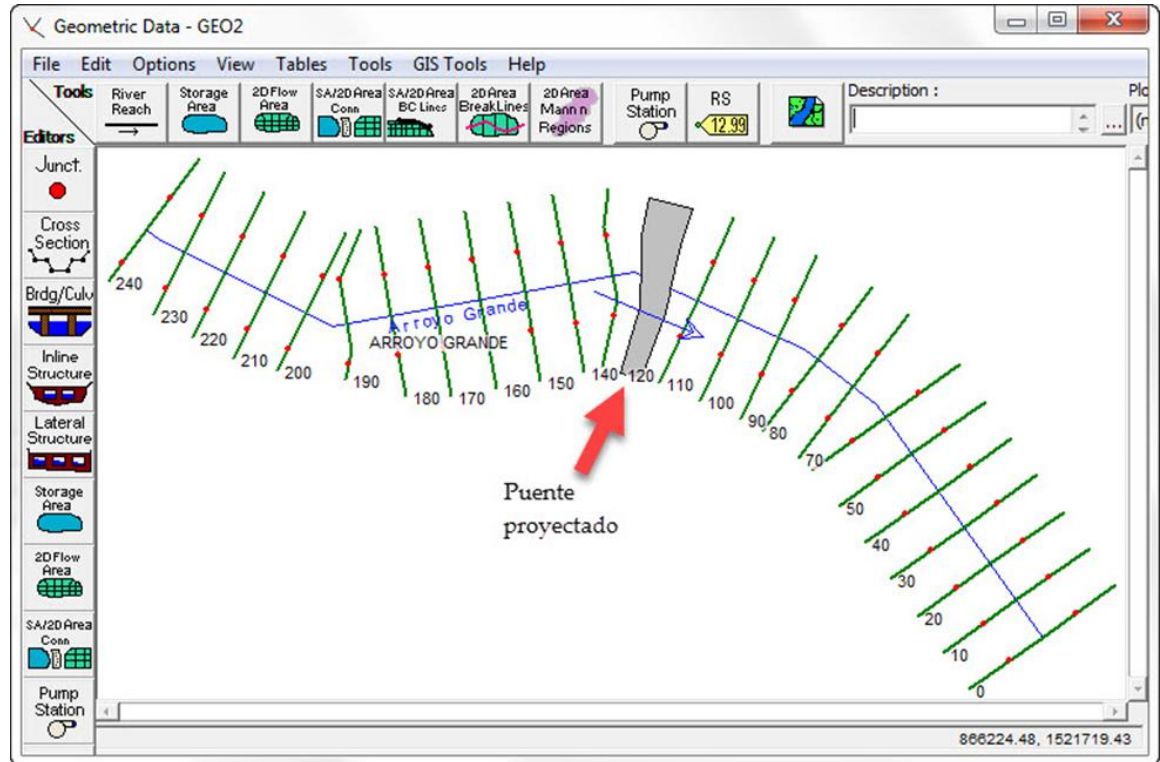
Fuente: Elaboración propia.

Para seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning de la parte revestida en concreto, se utilizó la tabla del anexo H, obteniendo un valor de $n = 0.014$.

- **Condiciones de frontera.** Las condiciones de frontera se definieron tanto aguas arriba como aguas abajo para realizar un análisis de flujo en régimen mixto (normal y crítico), se usó la condición del tirante normal con una pendiente de fondo de 0.001 m/m extraída de la topografía del sitio.

- **Escenario de puente proyectado sin revestimiento de canal aguas arriba.** A continuación se muestra el modelo hidráulico y sus resultados implantando un puente apoyado sobre estribos que no interfiera con la sección del canal construido aguas abajo.

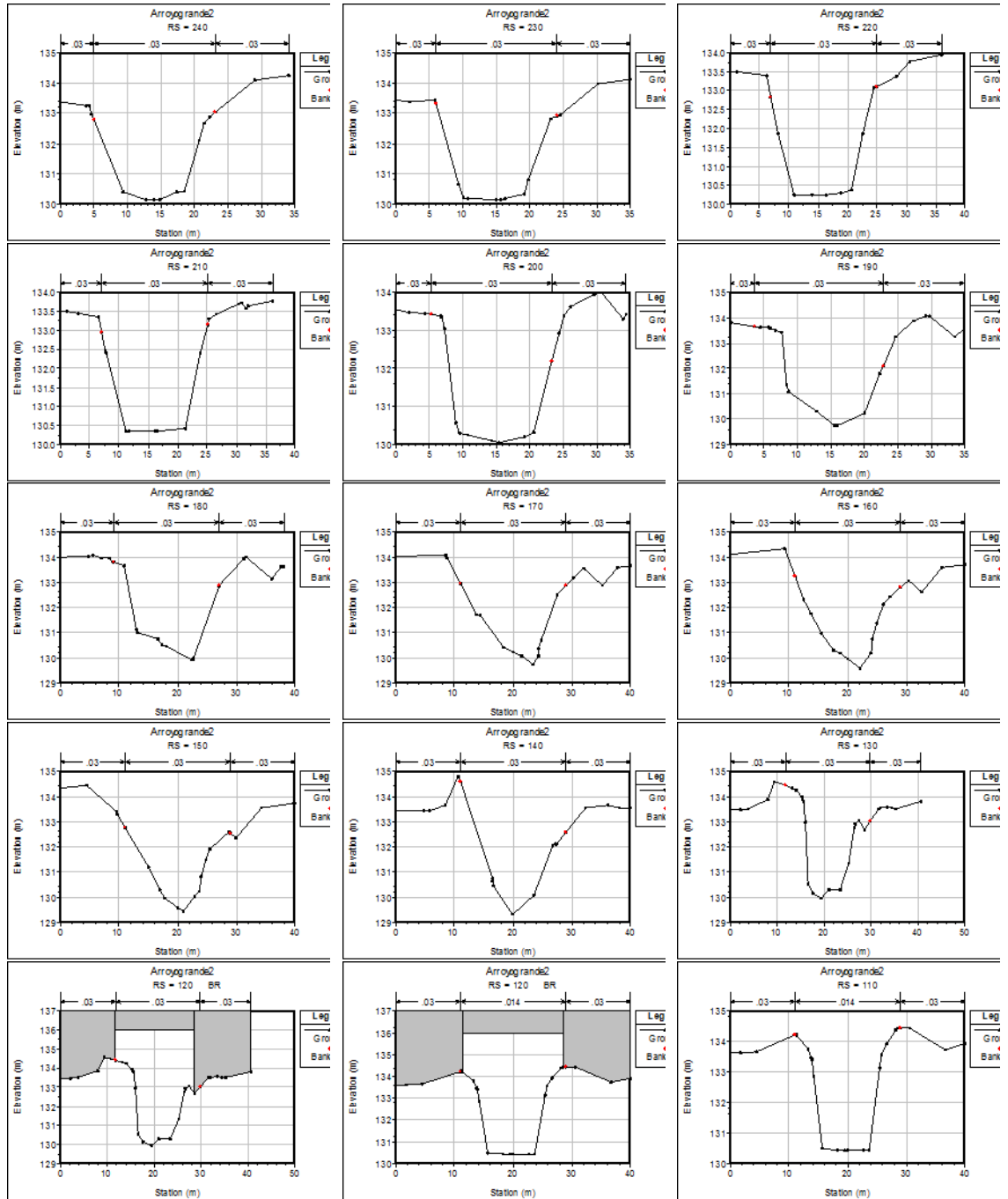
Figura 244 Geometría del tramo en estudio – planta.



Fuente: Elaboración propia.

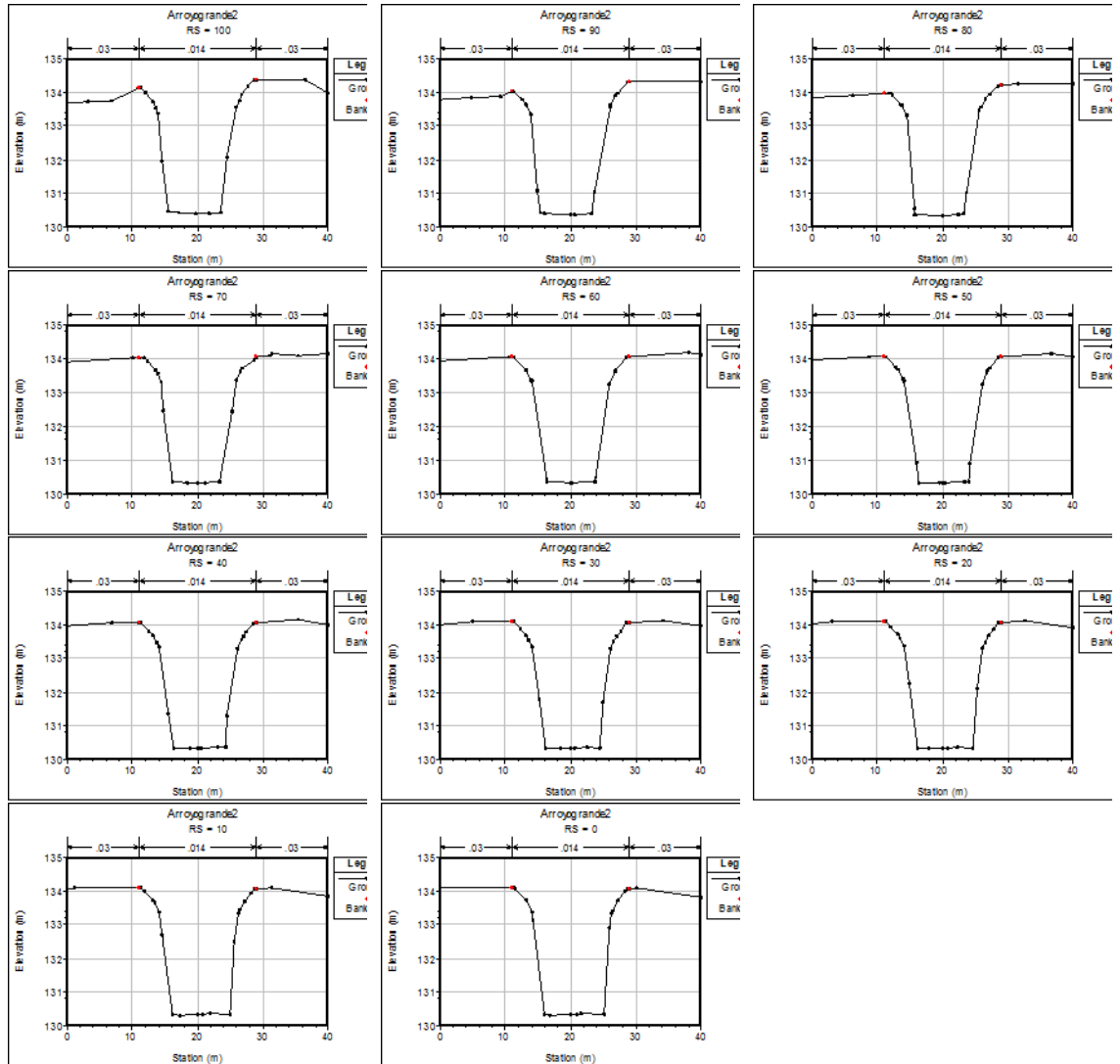
Los estribos del puente se proyectaron con la pared vertical con luz libre entre ellos de 16 metros y el canto inferior de las vigas de la superestructura se estableció en la cota 135.50 m.

Figura 255 Secciones del canal desde RS 240 hasta RS 110.



Fuente: Elaboración propia.

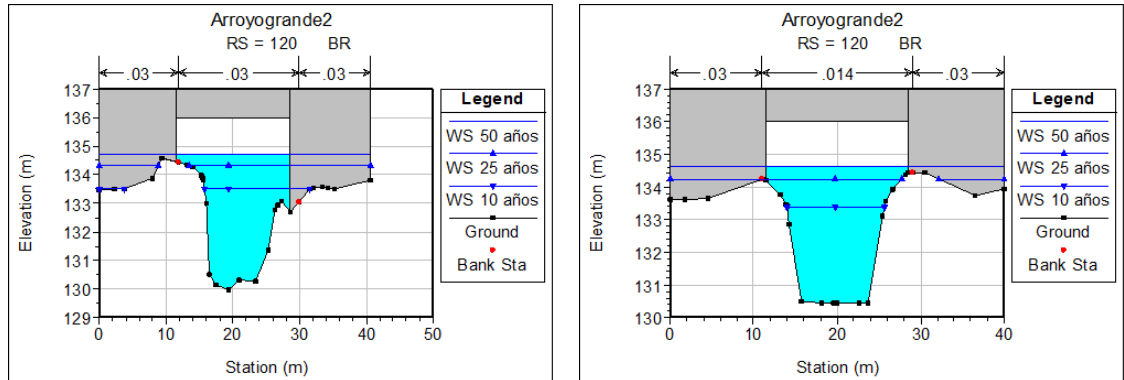
Figura 266 Secciones del canal desde RS 100 hasta RS 0.



Fuente: Elaboración propia.

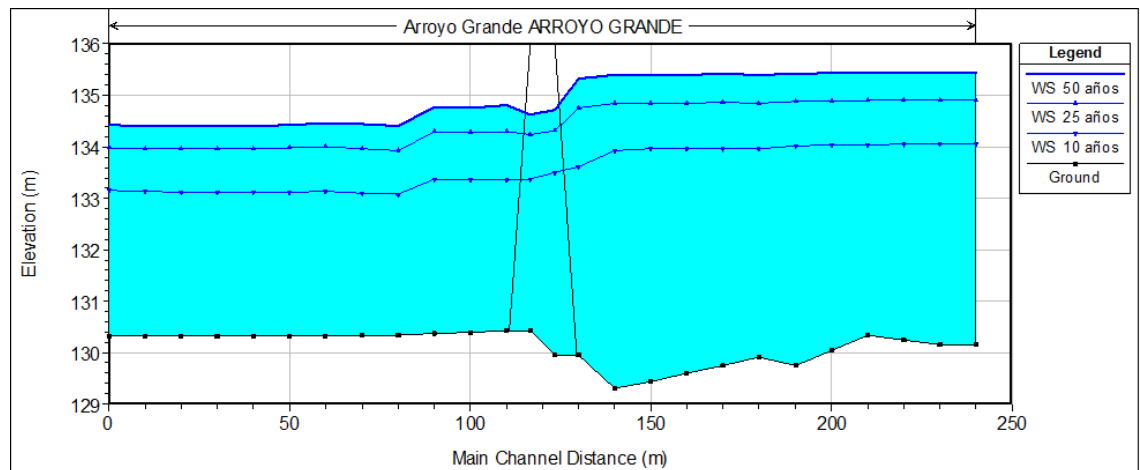
Con la geometría del canal definida dentro del modelo HEC-RAS y el puente implantado en el sitio correspondiente, se realizó la simulación hidráulica para los caudales de diseño de los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años calculados en el estudio hidrológico. A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada caso.

Figura 277 Niveles de agua en el puente para el escenario sin revestimiento aguas arriba.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28 Perfiles de flujo para el escenario sin revestimiento aguas arriba.

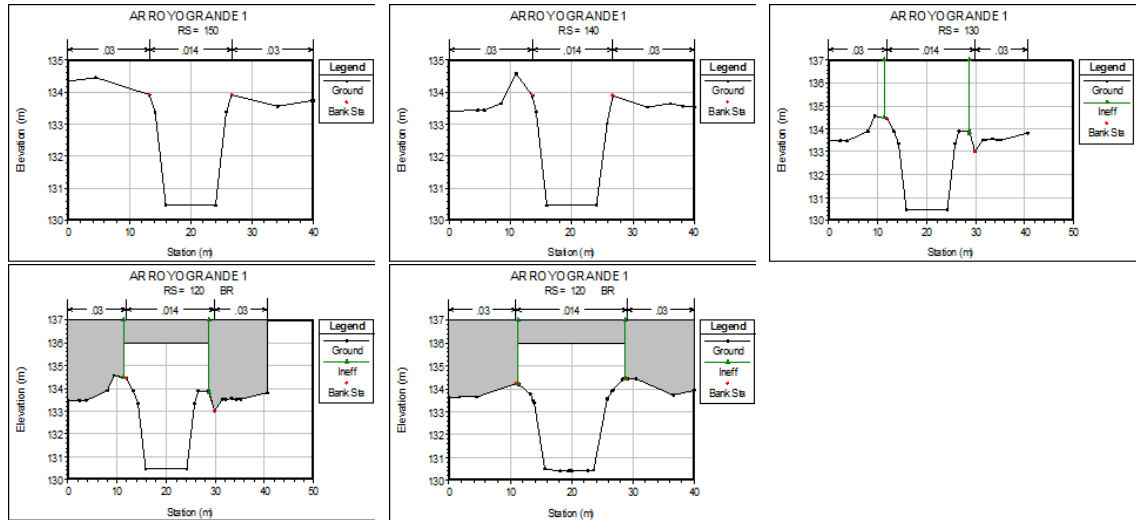


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 277 se observa que la sección hidráulica del puente es suficiente para que circule sin inconvenientes el caudal de diseño para los tiempos de retorno especificados, sin embargo, en la Figura se aprecia que los tirantes aguas arriba sufren una sobreelevación debida probablemente a la contracción del puente y las condiciones actuales del perfil del fondo del arroyo.

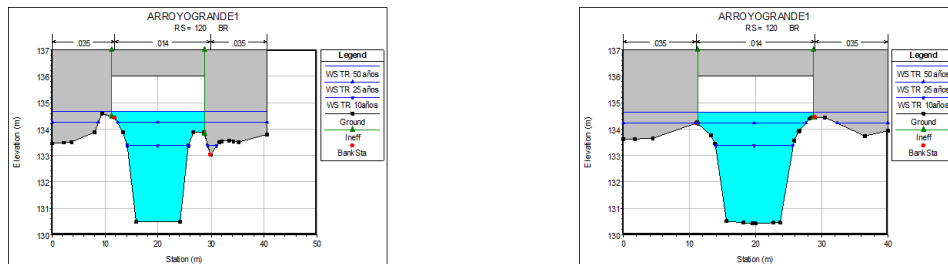
- **Escenario de puente proyectado con revestimiento de canal aguas arriba.** Para mejorar las condiciones de flujo se plantea canalizar el arroyo 30 metros aguas arriba de la sección del puente utilizando la misma sección que existe aguas abajo. A continuación se muestran las secciones modificadas y los resultados del nuevo modelo.

Figura 29 Secciones propuestas para RS 150 hasta RS 120.



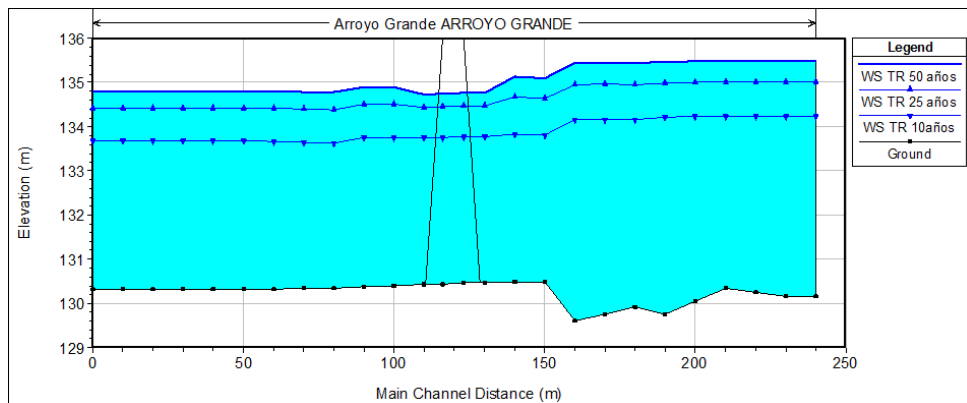
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30 Niveles de agua en el puente para el escenario con revestimiento aguas arriba.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31 Perfiles de flujo para el escenario con revestimiento aguas arriba.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura se observa que la solución planteada de canalizar 30 metros del arroyo aguas arriba es satisfactoria para estabilizar el flujo antes del puente. Con

base en todo lo mostrado hasta ahora, se plantea como solución, la construcción de un puente con luz libre de 16 metros de ancho con una cota inferior de viga de 135.5 y canalizado 30 metros aguas arriba del sitio de puente proyectado

6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se pudo observar, la información base para el desarrollo del estudio fue procesada sin inconvenientes con el uso de las herramientas SIG. El modelo digital de elevaciones SRTM de 30 metros de resolución espacial demostró ser fiable a la hora de analizar la forma y relieve de la cuenca hidrográfica del proyecto, aunque se deberá tener especial cuidado con áreas demasiado pequeñas en donde el modelo de elevaciones no sea lo suficientemente representativo para generar la red de drenajes ni determinar los parámetros morfométricos de la cuenca.

Los procedimientos aplicados en este trabajo, muestran que es posible realizar estudios hidrológicos encaminados a la estimación de caudales máximos probables requeridos para el diseño de obras hidráulicas involucradas en la infraestructura vial y en proyectos en donde la información sea escasa. Gracias a múltiples investigaciones realizadas por otros autores se pudieron establecer relaciones entre información de suelos y coberturas de la tierra requeridas para modelar los procesos de transformación lluvia – escorrentía, en este caso particular, el mapa de suelos y zonificación de tierras del departamento de Sucre, el cual fue elaborado por el IGAC, permitió realizar una clasificación hidrológica de los suelos necesaria para definir su potencial de producir altos o bajos caudales en el sitio de interés, como se observó en los resultado, en la zona de estudio predominan los grupos hidrológicos de suelos “B” y “C” por lo que se afirma que la cuenca del arroyo grande de Corozal tiene una capacidad media de producir escorrentía.

Como resultado final, se obtuvo una sección hidráulica de 16 metros de luz libre y una altura promedio de 4.9 metros, la cual es acorde y se ajusta a las condiciones existentes en el sitio del proyecto. Lo anterior demuestra que los Sistemas de Información Geográfica permiten generar información importante para ser aplicada por otras ciencias y que finalmente influyen en la toma de decisiones acertadas para el bienestar de una comunidad, en este caso particular, se generó la información requerida en hidrología e hidráulica para solucionar un problema de movilidad existente en el municipio de Corozal departamento de Sucre.

7. CONCLUSIONES

Luego de haber realizado el análisis hidrológico y el modelamiento hidráulico se puede concluir lo siguiente:

- El uso de SIG permitió manipular las variables relacionadas con los procesos hidrológicos que se presentan en la cuenca del arroyo grande de Corozal, de tal modo que se pueden evaluar multiplicidad de escenarios y eventos que podrían ocurrir dentro de ella. Lo anterior convierte a los SIG en una herramienta poderosa debido a su potencial para manipular información, presentarla visualmente a través de mapas, realizar cálculos en grandes áreas, relacionar datos alfanuméricos con datos gráficos y modificar información que ya existe o que fue generada dentro del mismo estudio.
- La cuenca hidrográfica estudiada posee relieve variable que va de plano a fuertemente quebrado con pendiente menores al 50%
- En toda el área de estudio se distinguen solo tres de los cuatro grupos hidrológicos de suelos y se observó predominancia de suelos con grupo hidrológico "B" con un 48.48% y "C" con un 47.06% los cuales poseen de medio a alto potencial para generar escorrentía.
- Con respecto a las coberturas existentes en la cuenca se observó que la vegetación predominante son los pastos y la vegetación secundaria con presencia de pequeños bosques, también se tiene una gran cantidad de zona urbana con alto potencial de generar escorrentía.
- El clima de la zona de estudio es cálido seco, la temperatura media anual es de 26.9 °C y oscila entre una mínima de 20.8 °C y una máxima de 34.7 °C. La precipitación media anual es del orden de los 1263 mm y tiene un comportamiento bimodal con los picos más altos en los meses de mayo y agosto.
- Se logró hacer la estimación de los caudales hidrológicos máximos probables para la estructura del proyecto, obteniendo valores de 101.1 m³/S, 144.8 m³/S, y 187.6 m³/S para periodos de retorno de 10, 25 y 50 años respectivamente. Con estos cuales se realizaron los cálculos hidráulicos requeridos para definir la sección de la estructura.
- Como resultado de los cálculos hidráulicos se definió la sección para el puente de 16 metros de luz libre con una altura aproximada de 4.95 metros de alto.

8. RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta que los modelos hidrológicos en los que intervienen procesos de transformación lluvia – escorrentía son muy sensibles a las propiedades del suelo y a la cobertura de la tierra, se recomienda que para este tipo de estudio se haga una clasificación supervisada de coberturas en el cual se realice una verificación en campo de lo que se está interpretando en campo, más aún cuando el profesional que desarrolla la actividad se encuentre en una zona nueva o desconocida para él.
- Para obtener resultados más acertados y que puedan ser usados en otras estructuras ubicadas sobre el arroyo grande de Corozal, cerca de la zona del proyecto, se recomienda realizar un estudio en el cual se midan los caudales generados por las lluvias que se presenten en la cuenca con el objeto de calibrar el modelo hidrológico elaborado en el software HEC-HMS.

BIBLIOGRAFÍA

- BARROS CANTILLO, G. A. (1994). *Curso de Hidrología*. Sincelejo: Universidad de Sucre.
- Benayas, R. (2015). *Los Sistemas de Información Geográfica y sus aplicaciones en Hidrología*. Obtenido de GEASIG: <http://www.geasig.com/los-sig-y-sus-aplicaciones-en-hidrologia>
- CHOW, V. T. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*. Bogotá: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW - HILL Interamericana S.A.
- Diez Hernández, J. M. (2011). *Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS) e Hidráulico Fluvial (HEC-RAS)*. Cali: Universidad de Valladolid.
- DIEZ HERNÁNDEZ, J. M. (2011). *Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS) e hidráulico fluvial (HEC-RAS)*. universidad de Valladolid.
- FERRER, J. (2000). *Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro Numero de la Curva: Perfiles de suelo y teledetección*. Madrid: Centro de estudios y experimentación de obras publicas.
- GÁMEZ MORALES, W. (2010). *Texto básico de hidrología*. Mangua: Univesidad Nacional Agraria.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (Colombia). (1999). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Sucre*. Bogotá.
- INVIAS. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá.
- Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje de carreteras*. Bogotá.
- MINISTERIO DE VIVIENDA (Colombia). (2012). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico:Título D. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias*. Bogotá: Viceministerio de Aguas y Saneamiento Básico.
- Molero, F. E. (2011). *La modelización hidrológica-hidráulica y los sistemas de información geográfica*. Obtenido de Guía Nueva Cultura del Agua: <https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/agua-y-territorio/la-modelizacion-hidrologica-hidraulica-y-los-sistemas-de-informacioin-geografica?&imprimir=1>
- MONSALVE SAENZ, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- POSADA GARCÍA, L. (1992). *Hidráulica Fluvial*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- SNYDER, F. (1939). A conception of runoff-phenomena. *Earth & Space Science News*, 20(4), 725-738.
- Témez Peláez, J. R. (2003). Facetas del Cálculo Hidrometeorológico y estadístico de Máximos Caudales. *Rev. de Obras Publicas*(3430), 47-51.

USGS. (2015). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Recuperado el 15 de 8 de 2016, de <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>

Anexo G. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad ii)

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Anexo H. Valores del coeficiente de rugosidad de Mannig

(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
A-1. Metal			
<i>a.</i> Latón, liso	0.009	0.010	0.013
<i>b.</i> Acero			
1. Estriado y soldado	0.010	0.012	0.014
2. Riveteado y en espiral	0.013	0.016	0.017
<i>c.</i> Hierro fundido			
1. Recubierto	0.010	0.013	0.014
2. No recubierto	0.011	0.014	0.016
<i>d.</i> Hierro forjado			
1. Negro	0.012	0.014	0.015
2. Galvanizado	0.013	0.016	0.017
<i>e.</i> Metal corrugado			
1. Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
2. Drenaje de aguas lluvias	0.021	0.024	0.030
A-2. No metal			
<i>a.</i> Lucita	0.008	0.009	0.010
<i>b.</i> Vidrio	0.009	0.010	0.013
<i>c.</i> Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
<i>d.</i> Concreto			
1. Alcantarilla, recta y libre de basuras	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras	0.011	0.013	0.014
3. Bien terminado	0.011	0.012	0.014
4. Alcantarillado de aguas residuales, con pozos de inspección, entradas, etc., recto	0.013	0.015	0.017
5. Sin pulir, formaleta o encofrado metálico	0.012	0.013	0.014
6. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera lisa	0.012	0.014	0.016
7. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera rugosa	0.015	0.017	0.020
<i>e.</i> Madera			
1. Machihembrada	0.010	0.012	0.014
2. Laminada, tratada	0.015	0.017	0.020
<i>f.</i> Arcilla			
1. Canaleta común de baldosas	0.011	0.013	0.017
2. Alcantarilla vitrificada	0.011	0.014	0.017
3. Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
4. Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
<i>g.</i> Mampostería en ladrillo			
1. Barnizada o lacada	0.011	0.013	0.015
2. Revestida con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
<i>h.</i> Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones	0.012	0.013	0.016
<i>i.</i> Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso	0.016	0.019	0.020
<i>j.</i> Mampostería de piedra, cementada	0.018	0.025	0.030