

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ACOTAMIENTO DE LA RONDA HÍDRICA EN SISTEMAS LÓTICOS

Elaborado por:

Karen Lizeth Martínez Jaimes

Practicante Empresarial

Estudiante UIS

Presentado a:

IBG Ingeniería

Colombia

Bucaramanga

2024

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	5
2. INSUMOS NECESARIOS	5
2.1. INFORMACIÓN GEOMORFOLÓGICA:	5
2.2. DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS:	6
2.3. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA:	6
2.4. HERRAMIENTAS Y SOFTWARE:	6
3. PARÁMETROS CLAVES	6
3.1. DELIMITACIÓN DEL CAUCE PERMANENTE EN SISTEMAS LÓTICOS	6
3.1.1. ETAPAS PARA LA DELIMITACIÓN DEL CAUCE PERMANENTE	8
3.1.2. RESULTADOS ESPERADOS	9
3.2. DEFINICIÓN DEL LÍMITE FÍSICO DE LA RONDA HÍDRICA	9
3.2.1. ETAPAS PARA LA DELIMITACIÓN DEL COMPONENTE HIDROLÓGICO ..	11
3.2.2. RESULTADOS ESPERADOS	12
4. METODOLOGÍA	12
4.1. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	12
4.1.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA	13
4.1.2. LONGITUD DEL CAUCE	13
4.1.3. PENDIENTE DEL CAUCE	13
4.1.4. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	13
4.2. ANÁLISIS HIDROCLIMATOLÓGICO	15
4.2.1. IDENTIFICACIÓN DE VALORES ATÍPICOS	15
4.2.2. POLIGONOS DE THIESSEN	16
4.2.3. ANÁLISIS PROBABILISTICO	16
4.2.4. CURVAS IDF	23
4.2.5. TORMENTA DE DISEÑO	26
4.3. ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE INTERES	27
4.4. CÁLCULO DE CAUDALES	28
4.5. MODELACIÓN HIDRAULICA	29
4.5.1. MÓDULOS DE ANÁLISIS FLUVIAL	29

4.5.2.	CONCEPTOS HIDRÁULICOS APLICADOS.....	30
4.5.3.	ENERGÍA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS.....	34
4.5.4.	ECUACIÓN DE MANNING.....	35
4.5.5.	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD	35
5.	PROCEDIMIENTO GENERAL.....	36
5.1.	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	36
5.1.1.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	36
5.1.2.	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA EN ARCGIS	38
5.1.3.	CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	40
5.2.	ANÁLISIS HIDROCIMATOLÓGICO	40
5.2.1.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	40
5.2.2.	POLÍGONOS DE THIESSEN	42
5.2.3.	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO.....	45
5.2.4.	CRUVAS IDF Y TORMENTA DE DISEÑO.....	48
5.3.	ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE INTESRES	48
5.4.	CALCULO DE CAUDALES	49
5.5.	MODELACIÓN HIDRÁULICA	49
6.	PRODUCTOS ESPERADOS	50
6.1.	DELIMITACIÓN DEL CAUCE PERMANENTE.....	50
6.2.	DEFINICION DEL LIMÍTE FISICO.....	51
7.	REFERENCIAS	53

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Insumos, actividades y productos para definir el cauce permanente en sistemas lóticos.....	7
Figura 2. Insumos, actividades y productos para definir para definir el componente hidrológico.....	10
Figura 3. Software para análisis probabilístico	23
Figura 4. Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d	25
Figura 5. Curvas típicas IDF.....	26
Figura 6. Hietograma de precipitación	27
Figura 7. Cruce de información hidrológica y testimonios de la comunidad asentada en el corredor vial.....	28
Figura 8. Continuidad de flujo no permanente	33
Figura 9. Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos	34
Figura 10. Geoportal del IGAC	37
Figura 11. Conectar carpetas en ArcGIS	38
Figura 12. Crear un nuevo Shapefile	39
Figura 13. Create Features.....	40
Figura 14. Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos	41
Figura 15. Creación de polígonos de Thiessen	43
Figura 16. Polígono de Thiessen	44
Figura 17. Distribuciones disponibles en HidroEsta	45
Figura 18. Datos de ingreso en HidroEsta.....	46
Figura 19. Distribución Normal.....	47
Figura 20. Análisis de Frecuencia máxima	49
Figura 21. Descarga de resultados de módulo hidráulico en ShapeFile	50
Figura 22. Delimitación del cauce permanente	51
Figura 23. Definición del límite físico.....	52

1. INTRODUCCIÓN

El presente manual tiene como objetivo estandarizar el procedimiento técnico para el acotamiento de rondas hídricas en sistemas lóticos, asegurando su gestión sostenible y la preservación de los recursos hídricos y ecosistemas asociados. Este manual es una herramienta aplicable en proyectos de ordenamiento territorial, gestión ambiental y prevención de riesgos asociados a eventos hidrometeorológicos extremos.

El acotamiento de rondas hídricas permite:

- Delimitar el cauce permanente que se refiere a la identificación y marcación del área donde se presenta el flujo constante de agua en un sistema lótico.
- Definir el límite físico, específicamente el componente hidrológico, el cual implica establecer un área de protección alrededor del cauce permanente de un cuerpo de agua, siendo esencial para la conservación del recurso hídrico y los ecosistemas acuáticos.

Delimitar estos dos componentes es necesario para establecer medidas de manejo y protección para mitigar riesgos de inundación y preservar los servicios ecosistémicos, cumpliendo con las normativas nacionales, como el Decreto 2245 de 2017 y la Resolución 957 de 2018.

2. INSUMOS NECESARIOS

2.1. INFORMACIÓN GEOMORFOLÓGICA:

- Cartografía básica escala 1:25000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi- IGAC.
- Información batimétrica de la quebrada La Palmira.
- Información topográfica de detalle con una precisión en la vertical de: en áreas rurales 20 cm o mayor precisión, y en áreas urbanas 10 cm o mayor precisión.
- Imágenes de sensores remotos y fotos aéreas disponibles para diferentes periodos históricos desde las más antiguas.
- Modelo Digital de Elevación - MDE desde el que se pueda caracterizar morfológicamente la red de drenaje y base para el estudio hidrológico. El tamaño adecuado de pixel para la consideración de procesos geomorfológicos e hidrológicos es de 10 metros de lado (Zhang y Montgomery, 1994). Sin embargo, para la cuantificación de atributos morfológicos de la corriente tales como la amplitud del cinturón de meandros (en sistemas meándricos), la extensión de la llanura potencialmente inundable, el grado de confinamiento, entre otros, se recomienda un

tamaño de pixel menor o igual a cuatro veces el ancho promedio de banca llena medido o estimado.

- Geomorfología a escala semidetallada (1 :25000) para la cuenca hidrográfica del cuerpo de agua de interés, y detallada (1: 10000 o mayor) para las áreas pertenecientes al paisaje fluvial.
- Mapa de geomorfología, suelos, coberturas y usos de la tierra en la cuenca hidrográfica del cuerpo de agua de interés para el establecimiento del modelo hidrológico.

2.2.DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS:

- Hidrográfica nacional (IDEAM, 2013a). Series hidroclimáticas a escala diaria, con registros iguales o superiores a 15 años, de estaciones localizadas en la cuenca hidrográfica del cuerpo de agua objeto de estudio, considerando como mínimo los niveles de zona y subzona hidrográfica de la zonificación.

2.3.INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA:

- Recopilación de estudios e información cartográfica básica y temática existente, así como levantamiento en campo de información predial y de infraestructura social y económica requerida para la realización del estudio.
- Registros históricos de eventos de inundaciones.

2.4.HERRAMIENTAS Y SOFTWARE:

- ArcGIS para análisis geoespacial.
- HEC-HMS para el modelamiento hidrológico al tener un área de cuenca mayor a los 2.5 km², en caso contrario se hace uso del método racional.
- HEC-RAS para modelación hidráulica.

3. PARÁMETROS CLAVES

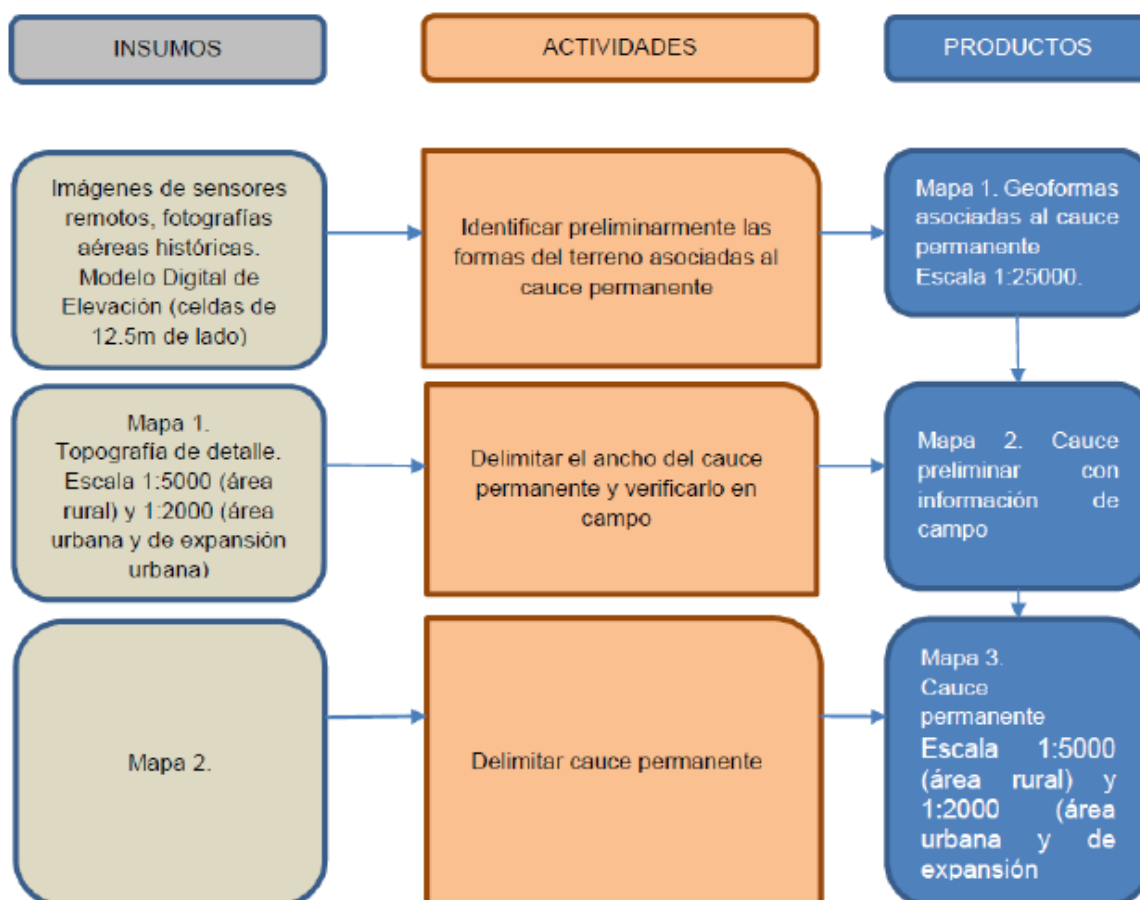
3.1. DELIMITACIÓN DEL CAUCE PERMANENTE EN SISTEMAS LÓTICOS

La delimitación del cauce permanente se refiere a la identificación y marcación del área donde se presenta el flujo constante de agua en un sistema lótico. Esta delimitación se basa en los criterios morfológicos e hidrológicos, así como en las características del flujo del agua. “El cauce permanente se definirá a partir de una aproximación jerárquica desde el análisis de las formas de terreno, teniendo en cuenta que éste corresponde a la zona de terreno sobre la

cual fluye la corriente de agua con sus sedimentos en condiciones de flujo de caudales sin que se llegue a producir desbordamiento de sus márgenes naturales" (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

De acuerdo a lo establecido en el ítem 5.1 de la guía para el acotamiento de las rondas hídricas, la Figura 1 define el proceso de delimitación del cauce permanente en sistemas lóticos con los respectivos insumos, actividades y productos. Este proceso se valida mediante la incorporación de las evidencias de campo que permitan elaborar el mapa definitivo del cauce permanente de la quebrada La Palmira objeto de acotamiento. Esto tiene como objetivo establecer las zonas de protección y el manejo sostenible del recurso hídrico.

Figura 1. Insumos, actividades y productos para definir el cauce permanente en sistemas lóticos.



Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

En sistemas lóticos, el cauce permanente se define como el lecho natural del río que representa su máxima capacidad de almacenamiento y transporte de agua. Este cauce natural activo tiene la capacidad hidráulica para movilizar los caudales asociados a eventos de crecida que ocurren durante un año típico. Dichos eventos suelen estar relacionados con fenómenos climáticos, como la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, que genera precipitaciones intensas y transitorias.

3.1.1. ETAPAS PARA LA DELIMITACIÓN DEL CAUCE PERMANENTE

3.1.1.1. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

- Recopilación de datos topográficos y batimétricos detallados, integrando las geoformas y los márgenes naturales del cauce, para la delimitación de la cuenca hidrográfica.
- Procesamiento de las series de datos históricos hidroclimatológicos asociados a las estaciones con mayor influencia sobre la zona de estudio. Asegurando que estas series de datos abarquen un mínimo de 15 años de registros diarios, con menos del 10% de datos faltantes, según lo establecido en el ítem 6.1.2.2.1.1 de la guía de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas (Pag. 77).
- Desarrollo de un Modelo Digital de Elevación (MDE) que incluya todas las posibles ramificaciones del cauce. Este modelo será validado con información obtenida directamente en campo.

3.1.1.2. ASOCIACIÓN DE PERIODOS DE RETORNO CON CAUDALES MÁXIMOS

Uso de caudales máximos anuales con periodos de retorno específicos:

- **2.33 años** en zonas rurales.
- **15 años** en zonas urbanas.

Estos valores son establecidos en el ítem 5.1 de la Guía para el Acotamiento de Rondas Hídricas (Pag. 46) y representan un criterio estándar para delimitar la zona de flujo permanente.

3.1.1.3. MODELACIÓN HIDRÁULICA

- Empleo del software HEC-RAS para realizar simulaciones hidráulicas de los caudales asociados a los periodos de retorno seleccionados.
- Identificación de las áreas inundables y verificación de que la delimitación propuesta considera adecuadamente los niveles de agua y velocidades de flujo en escenarios de crecida.

3.1.2. RESULTADOS ESPERADOS

Se identifican las áreas susceptibles a inundaciones, delimitando el cauce permanente y las zonas adyacentes que deben ser protegidas. Se ajusta el mapa preliminar mediante la inclusión de estas evidencias de campo, teniendo como resultado el mapa definitivo del cauce permanente de la quebrada La Palmira.

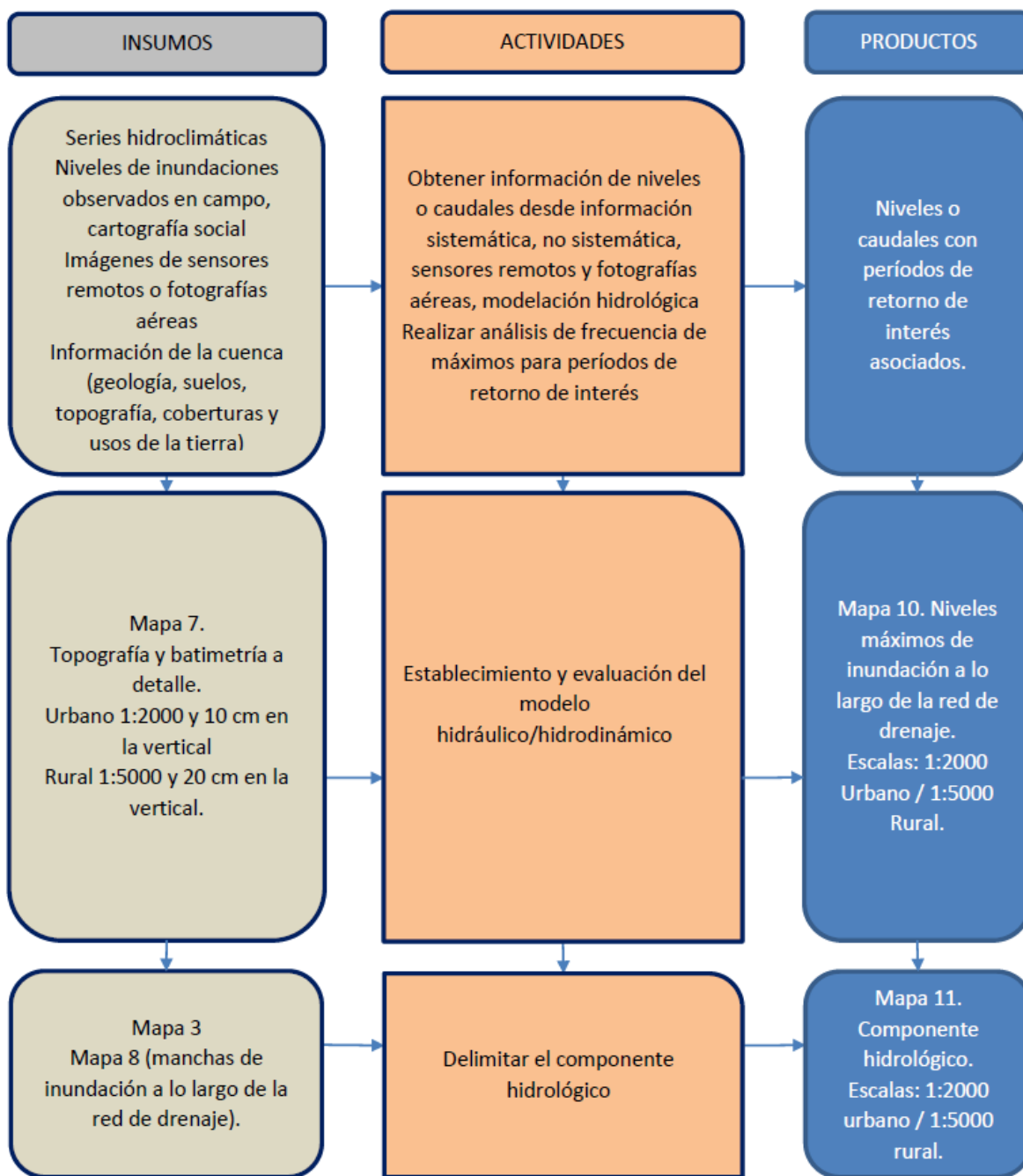
3.2. DEFINICIÓN DEL LÍMITE FÍSICO DE LA RONDA HÍDRICA

El límite físico es el resultado de un análisis de los componentes: geomorfológico, hidrológico y ecosistémico. A partir de la dinámica que existe entre los tres componentes mencionados, se establecen posteriormente las actividades para integrarlos y definir el límite físico de la ronda hídrica, cuyos resultados son la base para la definición de las estrategias para su manejo ambiental.

El componente hidrológico de la ronda hídrica desempeña un papel fundamental en el correcto funcionamiento del sistema fluvial, especialmente en lo que respecta a la gestión de los eventos extremos más frecuentes. Estos eventos, que incluyen crecidas y fluctuaciones en el caudal, son cruciales para el establecimiento de una conexión dinámica entre los cuerpos de agua loticos y lenticos. Esta interacción permite el intercambio constante de sedimentos, nutrientes y organismos entre estos cuerpos hídricos, lo cual es esencial para el mantenimiento de los ciclos biológicos de las especies que habitan en el área de estudio.

Para la delimitación del componente hidrológico de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira, se seguirá el proceso esquematizado de la Guía en mención, como se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Insumos, actividades y productos para definir para definir el componente hidrológico.



Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

3.2.1. ETAPAS PARA LA DELIMITACIÓN DEL COMPONENTE HIDROLÓGICO

3.2.1.1. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA (INFORMACIÓN SISTEMÁTICA)

- Recopilación de datos topográficos y batimétricos detallados, integrando las geoformas y los márgenes naturales del cauce, para la delimitación de la cuenca hidrográfica.
- Procesamiento de las series de datos históricos hidroclimatológicos asociados a las estaciones con mayor influencia sobre la zona de estudio. Asegurando que estas series de datos abarquen un mínimo de 15 años de registros diarios, con menos del 10% de datos faltantes, según lo establecido en el ítem 6.1.2.2.1.1 de la guía de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas (Pag. 77).
- Desarrollo de un Modelo Digital de Elevación (MDE) que incluya todas las posibles ramificaciones del cauce. Este modelo será validado con información obtenida directamente en campo.

3.2.1.2. EVALUACIÓN DE MODIFICACIONES ANTROPOGÉNICAS

- Identificar alteraciones significativas en la morfología del cauce debido a construcciones, como canalizaciones o intervenciones en el lecho fluvial y ajustar el análisis hidrológico para considerar las implicaciones de estas alteraciones sobre el flujo y la capacidad hidráulica.

3.2.1.3. DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO

- Para sistemas loticos con modificaciones considerables en su morfología se establece un período de retorno mínimo de **100 años** para definir la zona de flujo permanente, según lo establecido en el ítem 6.1.2.1.2 de la guía para el acotamiento de la ronda hídrica (Pag. 73).
- Verificar que los resultados del modelado no excedan una sobreelevación de la lámina de agua superior a 30 cm ni un incremento de velocidad del flujo mayor al 10%, según lo establecido en el ítem 6.1.2.1.2 de la guía para el acotamiento de la ronda hídrica (Pag. 74).

3.2.1.4. ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE INTERES

- Incorporación de la información no sistemática, es decir la recopilación de los testimonios de residentes locales para obtener información cualitativa sobre eventos históricos de inundación.
- Integrar esta información en los modelos de inundación para validar resultados y mejorar la precisión del análisis de frecuencia de máximos, según lo establecido en el ítem 6.1.2.2.2 de la guía de criterios para el acotamiento de la ronda hídrica (Pag. 81).
- Comparar los modelos de inundación generados con la información obtenida de la comunidad y los registros históricos.

3.2.1.5. MODELACIÓN HIDRÁULICA

- Empleo del software HEC-RAS para realizar simulaciones hidráulicas de los caudales asociados a los periodos de retorno seleccionados.
- Identificación de las áreas inundables y verificación de que la definición propuesta considera adecuadamente los niveles de agua y velocidades de flujo en escenarios de crecida.

3.2.2. RESULTADOS ESPERADOS

- **Área de Protección:** Una delimitación clara y funcional alrededor del cauce permanente que conserve los ecosistemas y gestione adecuadamente los riesgos de inundación.
- **Mapas Temáticos:** Identificación precisa de zonas de riesgo, áreas de inundación y límites del componente hidrológico.

4. METODOLOGÍA

4.1. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

Las características morfométricas, que incluyen propiedades geométricas y topográficas como forma, tamaño y pendiente, son esenciales para delimitar una ronda hídrica. Estas medidas permiten identificar las áreas que contribuyen al escurrimiento y abastecimiento de agua, lo que facilita la gestión sostenible de los recursos hídricos. También ayudan a evaluar la disponibilidad y distribución del agua, detectar zonas vulnerables a inundaciones o sequías, y son clave para la conservación del medio ambiente. En resumen, las características morfométricas son fundamentales para comprender la dinámica hidrológica de una cuenca, evaluar su respuesta a eventos climáticos y desarrollar modelos que apoyen decisiones informadas en la gestión del agua.

4.1.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

Consiste en establecer los límites geográficos que definen la zona de captación de agua hacia el cuerpo hídrico de interés, considerando aspectos clave como la topografía y el relieve. Este proceso es esencial para estimar el volumen de agua que fluye hacia el cauce, analizar la interacción entre precipitación, escorrentía y caudal, y promover una gestión sostenible de los recursos hídricos, la conservación ambiental y la mitigación de riesgos de inundación.

Para esta tarea, se emplean herramientas SIG como ArcGIS, que permiten trazar la cuenca y ajustar sus límites utilizando datos de curvas de nivel, drenajes principales y cartografía básica a escala 1:25,000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Además, se incorpora información topobatemétrica detallada para delimitar con precisión la cuenca hidrográfica en la zona de estudio y generar el mapa correspondiente. Este análisis integral facilita la comprensión del comportamiento hídrico y sustenta estudios hidrológicos más precisos y efectivos.

4.1.2. LONGITUD DEL CAUCE

Es la medida de la distancia que recorre el agua desde el inicio hasta el final de la quebrada. Esta longitud afecta el tiempo que tarda el agua en llegar a diferentes puntos del cauce y puede influir en la dinámica del flujo, la erosión y la sedimentación. Un cauce más largo puede tener más zonas de acumulación de sedimentos y variaciones en la velocidad del flujo.

4.1.3. PENDIENTE DEL CAUCE

La pendiente es la relación entre la diferencia de altitud a lo largo del cauce y su longitud, y tiene un impacto directo en la velocidad del flujo, la erosión y la capacidad de transporte de sedimentos. Este dado por la siguiente formula:

$$S = \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

- S: Pendiente (m/m).
- Δh : Diferencia de altitud entre el punto más alto y el más bajo del cauce (en metros).
- L: Longitud del cauce principal (en metros).

4.1.4. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración es el período que tarda el agua de lluvia en llegar al punto más bajo de la cuenca, como la quebrada. Este periodo se ve influenciado por diversos factores, como la topografía, el uso del suelo y las características del suelo mismo. Para calcularlo, se

utilizan ecuaciones empíricas que consideran aspectos como la longitud del flujo, el área y la pendiente de la cuenca, lo que permite estimar de manera efectiva el tiempo necesario para que el agua recorra toda la cuenca. Un tiempo de concentración corto puede provocar un aumento rápido del caudal en la quebrada, lo que conlleva un mayor riesgo de inundaciones, mientras que un tiempo más prolongado permite una absorción más gradual, resultando en una respuesta más moderada del flujo. Las metodologías recomendadas para su determinación son presentadas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2009).

7.5.1 ECUACIÓN DE KIRPICH

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima del cauce principal, en (m/m).

1.1.2 ECUACIÓN DE TÉMEZ

$$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje (%).

7.5.2 ECUACIÓN DE GIANDOTTI

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.50L}{0.8(LS)^{0.5}}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km²).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

4.2. ANÁLISIS HIDROCLIMATOLÓGICO

Se presenta como un proceso crítico para establecer las rondas hídricas, que son franjas de protección alrededor de cuerpos de agua. Este proceso implica un análisis minucioso de las características hidrológicas de la cuenca, que incluye la medición de la precipitación, el flujo de agua superficial y subterránea, así como los niveles de inundación y patrones de escorrentía. La información obtenida permite identificar áreas en riesgo de inundación y determinar la extensión de las rondas hídricas necesarias para proteger los ecosistemas acuáticos y garantizar la seguridad de las comunidades circundantes. Siendo fundamental para implementar estrategias de manejo y conservación del recurso hídrico, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la resiliencia ante eventos hidrometeorológicos extremos.

4.2.1. IDENTIFICACIÓN DE VALORES ATÍPICOS

Se utilizó la metodología denominada “Detección de valores atípicos basada en el Rango Intercuartílico (RI)” adaptado por Baker en 1994. El objetivo de esta metodología es detectar y excluir valores anómalos en los datos hidrológicos para garantizar la calidad de los análisis. Esto se hace evaluando cada valor en el contexto de su distribución estadística mensual para un periodo de años.

Para identificar valores atípicos, se calcula el rango intercuartílico (RI), que representa la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1), es decir, el rango donde se encuentra el 50% central de los datos. Los límites para considerar un dato como extremo se determinan con las siguientes formulas:

$$\text{Límite superior} = Q3 + f * RI$$

$$\text{Límite inferior} = Q1 - f * RI$$

Donde “f” es un factor que controla la detección de los valores atípicos y en esta metodología es de 4 para datos de precipitación, debido a su alta variabilidad, y de 3 para otros parámetros. Si un dato excede estos límites, se clasifica como atípico y se revisa para determinar su validez.

Para visualizar los resultados, se emplean diagramas de caja de bigotes, que permiten resumir y analizar de forma gráfica la distribución de los datos. En estos diagramas, la caja central representa el rango intercuartílico (Q1 a Q3), la línea central marca la mediana, y los bigotes se extienden hasta los valores más cercanos dentro de los límites aceptables. Los puntos que caen fuera de los bigotes son considerados valores extremos. Este enfoque facilita la identificación de valores anómalos, la comprensión de la variabilidad de los datos y la comparación antes y después de los ajustes, asegurando así la confiabilidad de los análisis hidrológicos y climatológicos.

4.2.2. POLIGONOS DE THIESSEN

Los polígonos de Thiessen son una herramienta utilizada en análisis hidroclimático para dividir un área en regiones basadas en la proximidad de estaciones hidrometeorológicas. Estos polígonos ayudan a asignar valores de variables como la precipitación, temperatura o caudal, a áreas geográficas específicas, dependiendo de la cercanía a las estaciones. Cada polígono representa el área en la que una estación tiene la mayor influencia, delimitada por la mitad de la distancia entre estaciones vecinas. Así, se puede distribuir espacialmente la información de las estaciones, lo que es útil para interpolar datos en zonas donde no hay estaciones cercanas.

Se recopilan datos de estaciones hidrometeorológicas que cubren variables como la precipitación, brillo solar, humedad relativa y temperatura en un periodo determinado. Posteriormente, se utilizan herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como ArcGIS, para construir los polígonos de Thiessen alrededor de cada estación. Estos polígonos asignan valores de las estaciones a las zonas circundantes, lo que permite la interpolación de datos y la creación de mapas que muestran la distribución de variables climáticas en áreas sin estaciones cercanas. Este enfoque es clave para comprender patrones hidroclimáticos y realizar evaluaciones de riesgo, como la gestión de caudales y el análisis de la variabilidad espacial y temporal de los datos.

4.2.3. ANÁLISIS PROBABILISTICO

En estudios hidráulicos, se requiere la evaluación de la magnitud de las características hidrológicas que podrían ocurrir con cierta frecuencia, especialmente en relación con los valores máximos durante un período específico. Durante esta evaluación, se examina la frecuencia con la que se alcanzan los distintos valores de caudal, precipitación u otras variables relevantes. Este análisis probabilístico permite identificar patrones y tendencias, lo que es crucial para entender cómo las variables hidrológicas pueden comportarse en el futuro. A partir de esta información, se pueden determinar las probabilidades teóricas asociadas a eventos hidrológicos extremos, lo que permite anticipar fenómenos como inundaciones o sequías.

Para el análisis probabilístico se usan las distribuciones como Gumbel tipo I, normal, log-normal y log Gumbel, fundamentales para la gestión del agua y el diseño de infraestructuras hídricas. La distribución acumulada está dada por la siguiente ecuación:

$$F(X) = \exp^{-\exp\left(-\frac{x-u}{\pi}\right)}$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{s\sqrt{6}}{\pi} \quad u = 0,5772\alpha$$

Definiendo la variable reducida,

$$\delta = \frac{x - u}{\alpha}$$

Se tiene entonces que,

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} = e^{-e^{-b}}$$

Dónde:

x : Variable en estudio (Precipitación).

\bar{x} : Media de la variable en estudio.

S : Desviación estándar de la variable en estudio

La probabilidad de ocurrencia de un evento con un valor igual o mayor que un valor dado x se expresa con la ecuación, la cual permite determinar la magnitud de la variable hidrológica correspondiente a un periodo de retorno dado.

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} = e^{-e^{-b}}$$

4.2.3.1. DISTRIBUCIÓN NORMAL

Función densidad

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)^2}$$

Para $-8 < x < 8$

Dónde:

f(x): función densidad normal de la variable x

x: variable independiente 38X

S: parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x

- **Función densidad de la distribución normal estándar**

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Para $-8 < Z < 8$

Dónde:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S}$$

- **Función de distribución acumulada**

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2} dx$$

$$F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

- **Cálculo de la función de distribución acumulada**

Abramowitz y Stegun (1965), han dado varias aproximaciones para la F.D.A. de la variable normal estandarizada Z. Una aproximación polinomial con un error menor que 10⁻⁵ es:

$$F(Z) \sim 1 - f(Z) (0.4361836 t - 0.1201676 t^2 + 0.9372980 t^3)$$

Dónde:

F(Z): es la función de distribución acumulada

f(Z): es la función densidad de la variable estandarizada

t: es definido para Z = 0, como:

$$t = \frac{1}{1 + 0.2316419|Z|}$$

Si $Z < 0$, la F.D.A. se calcula como:

$$1 - F(Z)$$

- **Cálculo de la inversa de la normal estándar**

Una aproximación para el cálculo de la inversa de la distribución normal estándar, válida para $10^{-7} < F(Z) < 0.5$, es:

$$Z = \frac{y^2[(4y + 100)y + 205]}{\sqrt{[(2y + 56)y + 192]y + 131}}$$

Dónde:

$$y = -\ln(F(Z))$$

- **Estimación de parámetros método de momentos y máxima verosimilitud**

$$\bar{X} = \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

$$s = \sigma = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- **Estimación de parámetros método de momentos lineales**

$$\bar{X} = \mu = \lambda_1$$

$$S = \sqrt{\pi \lambda_2}$$

Dónde:

λ_1 : primer momento lineal

λ_2 : segundo momento lineal

4.2.3.2. DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL

Función densidad

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right]^2}$$

Para $0 < x < \infty$

Donde μ_y , σ_y , son la media y desviación estándar de los logaritmos naturales de x , es decir de $\ln x$, y representan respectivamente, el parámetro de escala y el parámetro de forma de la distribución.

- **Función de la distribución acumulada**

$$F(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right]^2} dx$$

Si

$$Z = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}$$

Se tiene la distribución normal estándar:

$$F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ$$

Estimación de parámetros método de momentos

$$\mu_y = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{X^2}{1 + C_v^2}\right)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\ln(1 + C_v^2)}$$

Dónde:

\bar{X} = media aritmética de x

C_v = Coeficiente de variación

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}}$$

Estimación de parámetros método de máxima verosimilitud

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu_y)^2$$

Estimación de parámetros método de momentos lineales

$$\mu_y = \lambda_1$$

$$\sigma_y = \sqrt{\pi} \lambda_2$$

Dónde:

λ_1, λ_2 = primer y segundo momento lineal calculados con los $y_i = \ln x_i$

4.2.3.3. DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL

Función de la distribución acumulada

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{(\ln x - \mu)}{a}}}$$

La variable aleatoria reducida Log-Gumbel, se define como:

$$y = \frac{\ln X - \mu}{a}$$

Con lo cual, la función acumulada reducida Log-Gumbel es:

$$G(y) = e^{-e^{-y}}$$

Proceso de cálculo

Para el cálculo de los parámetros de la serie de datos:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$

Se convierte a sus logaritmos, luego se calcula la media y desviación estándar, con las siguientes ecuaciones:

Media:

$$\bar{X} \ln x = \frac{\sum \ln x}{N}$$

Desviación estándar:

$$S_{\ln x} = \sqrt{\frac{\sum (\ln x - \bar{X} \ln x)^2}{N - 1}}$$

Estimación de parámetros método de momentos

$$a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_{\ln x} = 0,78 S_{\ln x}$$

$$\mu = \bar{X} \ln 0,57721 a = \bar{X} \ln x 0,45 S_{\ln x}$$

Estimación de parámetros método de momentos lineales

Los parámetros de la distribución Log-Gumbel, por el método de los momentos lineales se encuentran con las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{\lambda_2}{\ln 2} \quad \mu = \lambda_1 - 0,577215664901532861a$$

Dónde:

λ_1 = primer momento lineal

λ_2 = segundo momento lineal

Nota: para calcular los momentos lineales λ_1 , λ_2 , trabajar con los $y_i = \ln x_i$.

Para este cálculo se utiliza el software HIDROESTA 2, el cual se alimenta con los datos de precipitación máxima en 24 horas. Primero el programa verifica la bondad de ajuste escogida, y determina su confiabilidad de acuerdo al número de datos y valores. Este software fue desarrollado por Máximo Villón Béjar. Software para cálculos hidrológicos utilizando Visual Basic y su uso es libre.

Figura 3. Software para análisis probabilístico



Fuente: HIDROESTA 2

4.2.4. CURVAS IDF

Es una herramienta fundamental en la hidrología que se utilizan para estimar la intensidad de las lluvias extremas en función de su duración y frecuencia de ocurrencia. Estas curvas representan gráficamente la relación entre la intensidad de la precipitación en [mm/h], la duración en minutos y la frecuencia en años.

La metodología usada para el cálculo de curvas IDF fue el método simplificado. En este se divide el territorio nacional en cinco grandes zonas, permitiendo un análisis independiente de estaciones dentro de las mismas regiones geográficas y buscando condiciones meteorológicas similares. La clasificación, propuesta por Vélez (1983), incluye las regiones Andina (R1), Caribe (R2), Pacífica (R3), Orinoquia (R4) y Amazonia (R5). A partir de esta división, se calcularon los índices necesarios para las ecuaciones correspondientes (Díaz-Granados & Vargas M., 1997). Por otro lado, la información de entrada para estimar estas curvas proviene de resúmenes multianuales de precipitación máxima en 24 horas y la ecuación aplicada es:

$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{(t/60)^c}$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

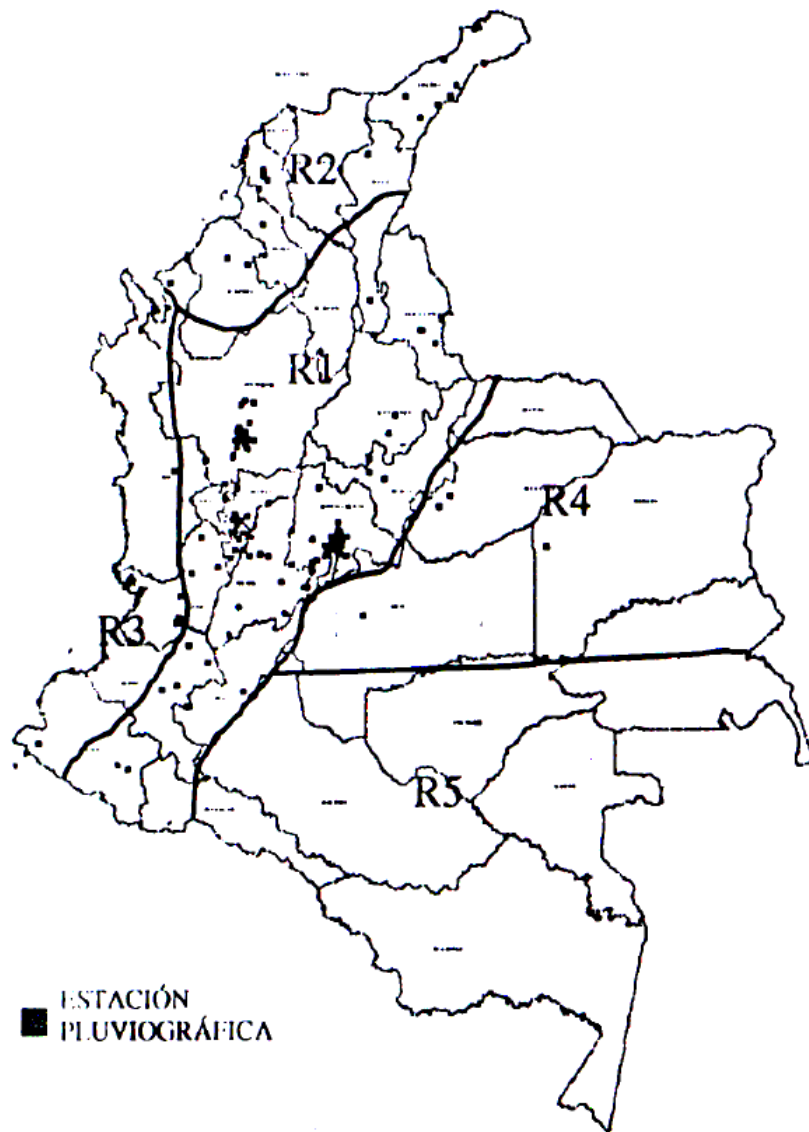
a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión.

Tabla 1. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas IDF

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

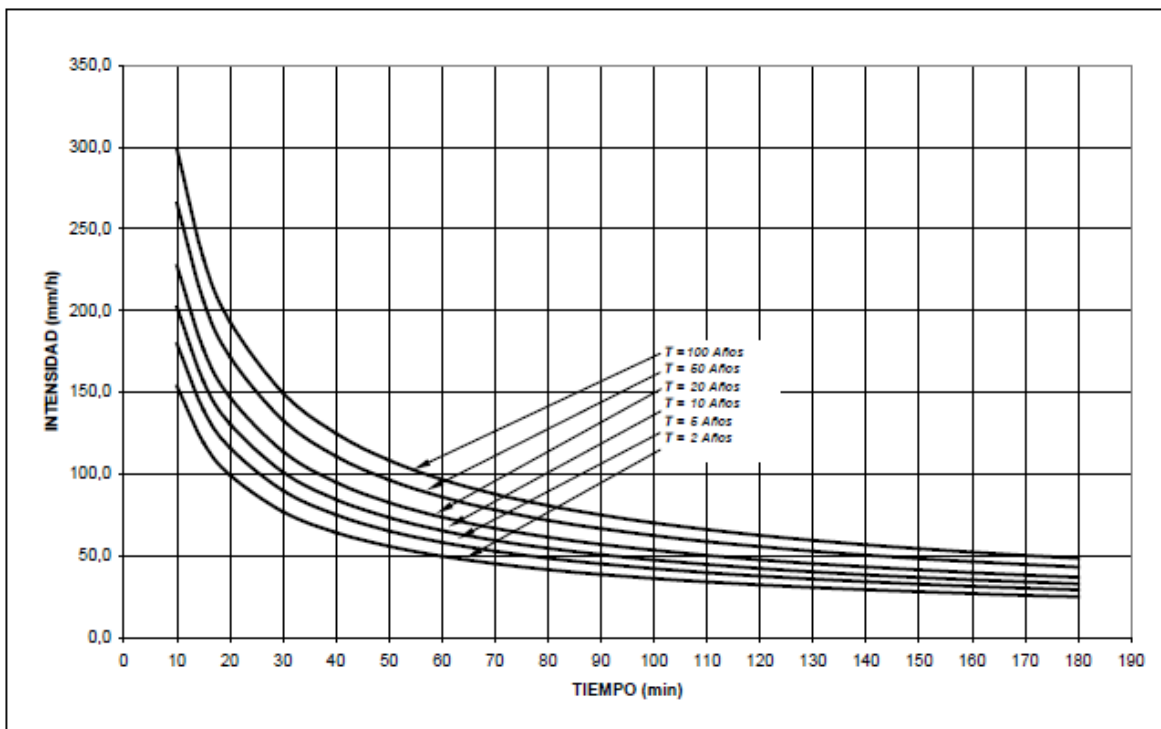
Fuente: (INVIAS, 2009)

Figura 4. Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d



Fuente: (INVIAS, 2009)

Figura 5. Curvas típicas IDF



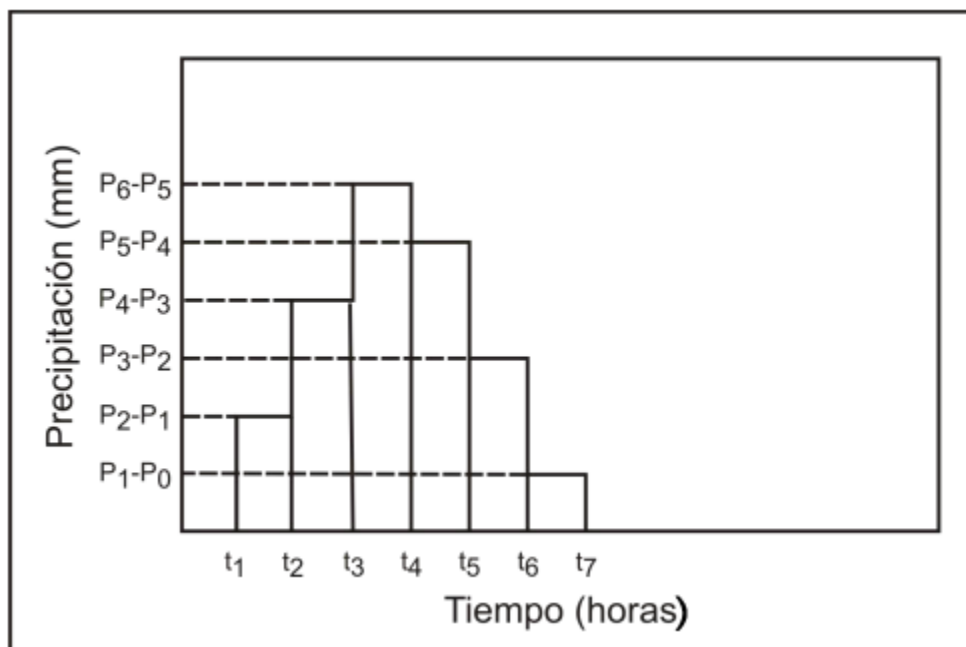
Fuente: (INVIAS, 2009)

4.2.5. TORMENTA DE DISEÑO

La tormenta de diseño o hietograma, es una representación gráfica que ilustra la intensidad y duración de una tormenta en una zona específica, permitiendo estimar la cantidad de agua que puede acumularse durante eventos de precipitación extrema. La metodología para construir hietogramas de diseño mediante el método del Bloque Alternado comienza con la obtención de datos de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la estación meteorológica representativa de la cuenca hidrográfica. A partir de estas curvas, se calculan las curvas de masas acumuladas para diferentes duraciones (de 0 a 180 minutos) y periodos de retorno definidos, utilizando intervalos de tiempo consistentes con la duración efectiva de la lluvia (T_r). Posteriormente, se derivan los incrementos de lluvia en cada intervalo, construyendo un hietograma base. Para hacer el hietograma más crítico, se aplica el método del Bloque Alternado, que reorganiza los incrementos de lluvia en un patrón alternado: el menor valor se coloca al inicio, el siguiente menor al final, y así sucesivamente, hasta completar el ordenamiento como se muestra en la Figura 6. El resultado es un hietograma de diseño que

simula una distribución más concentrada y crítica del aguacero, útil para el diseño de obras hidráulicas y análisis hidrológicos.

Figura 6. Hietograma de precipitación

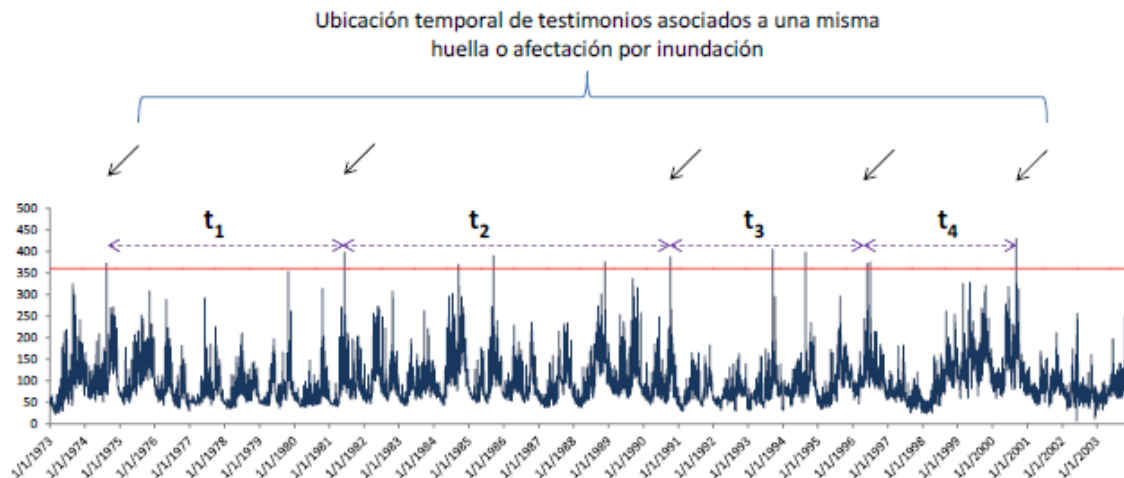


Fuente: (INVIAS, 2009)

4.3. ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE INTERES

Para correlacionar la información sistemática y no sistemática en el análisis de inundaciones, se deben integrar los registros históricos provenientes de estaciones meteorológicas con los testimonios y conocimientos locales de la comunidad afectada. Los datos sistemáticos, como precipitaciones, caudales y eventos registrados oficialmente, ofrecen una base científica, mientras que los testimonios comunitarios aportan detalles sobre fechas, magnitudes y afectaciones específicas no siempre reflejadas en los registros oficiales. La correlación consiste en cruzar ambos tipos de información, identificando coincidencias temporales y espaciales, y evaluando la coherencia de los datos. Este enfoque permite construir una línea de tiempo y un análisis más completo de los eventos, considerando patrones de inundación registrados y aspectos contextuales reportados por los habitantes. La información integrada se utiliza luego para delimitar y gestionar de manera más precisa las áreas inundables, logrando un enfoque integral que combina el rigor científico con el conocimiento empírico local.

Figura 7. Cruce de información hidrológica y testimonios de la comunidad asentada en el corredor vial



Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

4.4.CÁLCULO DE CAUDALES

Para el cálculo de caudales, se debe seguir la metodología descrita en la "Guía metodológica para el cálculo de caudales de diseño de hoyas hidrográficas", elaborada por la practicante Shary Zadith Vargas Velasco. Esta guía ofrece una explicación detallada y estructurada del procedimiento necesario para determinar los caudales de diseño, utilizando dos enfoques fundamentales en hidrología: el método racional y el método del hidrograma de escorrentía superficial.

El método racional permite estimar el caudal máximo para cuencas con áreas menores o iguales a 2.5 km^2 , generadas por un evento de lluvia, considerando parámetros clave como la intensidad de la precipitación, el área de la cuenca y el coeficiente de escorrentía, mientras que el método del hidrograma de escorrentía superficial se usa para cuencas con áreas mayores a 2.5 km^2 , que se basa en la respuesta hidrológica temporal de la cuenca, permitiendo obtener una representación más completa del flujo generado durante un evento de lluvia. La guía detalla cada uno de estos procedimientos, proporcionando las fórmulas, supuestos y pasos a seguir, así como las recomendaciones prácticas para su correcta aplicación. Este documento es una herramienta esencial para garantizar que los cálculos de caudales sean precisos, consistentes y adecuados para las características particulares de cada hoya hidrográfica.

4.5. MODELACIÓN HIDRAULICA

La modelación hidráulica se realiza con la ayuda del software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), que implica la simulación del flujo de agua en ríos, quebradas, tuberías, embalses, canales y redes de drenaje, permitiendo analizar diversas condiciones de flujo, como inundaciones, distribución de presiones y flujos normales. Este software es fundamental para evaluar la extensión y profundidad de inundaciones, lo que ayuda en la planificación y gestión de riesgos. Además, se utiliza en el diseño de infraestructuras hidráulicas, garantizando su seguridad y eficacia.

HEC-RAS también facilita la gestión de recursos hídricos y permite realizar análisis de impacto ambiental, evaluando la influencia de los proyectos de infraestructura sobre el flujo y la calidad del agua de la fuente hídrica.

4.5.1. MÓDULOS DE ANÁLISIS FLUVIAL

Este software ofrece una variedad de módulos que facilitan un análisis hidrológico completo. Entre sus características más destacadas se encuentran el módulo hidráulico unidimensional, que simula flujos permanentes y transitorios en ríos y canales, y el módulo bidimensional, que permite el análisis de flujos en áreas complejas, proporcionando una comprensión detallada de la propagación de inundaciones.

Para los perfiles de superficie de agua con flujo constante, el sistema maneja una red completa de canales, un sistema dendrítico o un solo tramo de río. El componente de flujo constante es capaz de modelar perfiles de superficie de agua de régimen de flujo subcrítico, supercrítico y mixto. El procedimiento computacional básico se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía se evalúan por fricción (ecuación de Manning) y contracción/expansión (coeficiente multiplicado por el cambio en la carga de velocidad). La ecuación de momento se utiliza en situaciones en las que el perfil de la superficie del agua varía rápidamente. Estas situaciones incluyen cálculos de régimen de flujo mixto (es decir, saltos hidráulicos), hidráulica de puentes y evaluación de perfiles en confluencias de ríos (uniones de arroyos).

En cuanto a la simulación de flujo inestable, HEC-RAS es capaz de simular flujo inestable unidimensional, bidimensional y unidimensional/bidimensional combinado a través de una red completa de canales abiertos, llanuras de inundación y abanicos aluviales. El componente de flujo inestable se puede utilizar para realizar cálculos de régimen de flujo subcrítico, supercrítico y mixto (subcrítico, supercrítico, saltos hidráulicos y descensos) en el módulo de cálculos de flujo inestable. Las características especiales del componente de flujo inestable incluyen: amplias capacidades de estructura hidráulica Análisis de rotura de presas; ruptura y desbordamiento de diques; Estaciones de bombeo; operaciones de presas de navegación;

sistemas de tuberías presurizadas; funciones de calibración automatizadas; Reglas definidas por el usuario; y modelado combinado de flujo inestable unidimensional y bidimensional.

El módulo de sedimentos evalúa el transporte de sedimentos y su impacto en la erosión y sedimentación. El cálculo de transporte de sedimentos se calcula por fracción de tamaño de grano, lo que permite la simulación de la clasificación y el blindaje hidráulico. Las características principales incluyen la capacidad de modelar una red completa de arroyos, dragado de canales, varias alternativas de diques e intrusiones, y el uso de varias ecuaciones diferentes para el cálculo del transporte de sedimentos.

HEC-RAS también cuenta con herramientas para el análisis de inundaciones, generando mapas que ilustran la magnitud y extensión de estos eventos conocido como HEC-RAS Mapper. Los módulos de calibración y validación aseguran que los modelos sean precisos, mientras que el análisis de escenarios permite simular diferentes condiciones, como cambios en el uso del suelo y el clima. Por último, la capacidad de exportar datos y su integración con sistemas de información geográfica (GIS) hacen de HEC-RAS una herramienta versátil y poderosa para la gestión de recursos hídricos.

Por último, se tiene el análisis de la calidad del agua, el cual tiene como objetivo permitir al usuario realizar análisis de la calidad del agua fluvial. La versión actual de HEC-RAS puede realizar análisis detallados de temperatura y transporte de un número limitado de componentes de la calidad del agua (algas, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno carbonáceo, ortofosfato disuelto, fósforo orgánico disuelto, nitrato de amonio disuelto, nitrógeno nítrico disuelto, nitrógeno orgánico disuelto).

4.5.2. CONCEPTOS HIDRÁULICOS APLICADOS

4.5.2.1. TIPOS DE FLUJO

Los flujos en canales abiertos se clasifican principalmente según el número de Froude, en subcríticos, supercríticos y críticos, dependiendo de la velocidad del agua en relación con las ondas de gravedad. Sin embargo, existen otras clasificaciones según la estabilidad, turbulencia, profundidad y variabilidad en el tiempo.

1. SEGÚN EL NÚMERO DE FROUDE

- Flujo subcrítico ($Fr < 1$)

Es caracterizado por un flujo tranquilo y estable, donde la energía potencial es mayor a la energía cinética. Se puede adaptar fácilmente a los cambios de pendiente o sección del canal.

- Flujo crítico ($Fr = 1$)

Hace referencia al estado de transición, donde la energía cinética y potencial es equivalente y el flujo es más eficiente en términos de energía. Se ve como un punto de control, donde puede cambiar de subcrítico a supercrítico.

- Flujo supercrítico ($Fr > 1$)

Es un flujo rápido y turbulento, donde se tiene una profundidad baja y un flujo con alta energía. Este tipo de flujo responde rápidamente a cambios en el canal. Y cualquier perturbación puede causar cambios drásticos.

2. SEGÚN LA ESTABILIDAD

- Flujo uniforme

Las propiedades del flujo como lo son su profundidad y velocidad se mantienen constantes a lo largo de toda la longitud del canal. Se establece un equilibrio entre la gravedad y la resistencia al flujo, lo cual permite un comportamiento predecible convirtiéndolo en un flujo ideal para cálculos y predicciones.

- Flujo no uniforme

Este flujo se presenta cuando se tienen variaciones en la pendiente, la rugosidad o la geometría del canal provocando cambios en la profundidad y velocidad del agua a lo largo del canal, lo que puede resultar en fenómenos como oleajes o corrientes.

3. SEGÚN LA TURBULENCIA

El flujo está gobernado por los efectos de viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo. El flujo puede ser laminar, turbulento y entre estos dos estados, se encuentra un estado mixto o transicional según el efecto de la viscosidad en relación con la inercia.

El efecto de la viscosidad en relación con la inercia puede representarse mediante el número de Reynolds (Re) el cual es una magnitud adimensional y está dada por la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

Donde:

- ρ = densidad del fluido.
- V = velocidad del flujo.
- D = diámetro hidráulico del conducto.
- μ = viscosidad dinámica del fluido.

Si $Re < 2000 \rightarrow$ flujo laminar.

Si $2000 < Re < 4000 \rightarrow$ flujo mixto o de transición.

Si $Re > 4000 \rightarrow$ flujo turbulento.

- Flujo laminar

Ocurre cuando un fluido se mueve en capas paralelas, sin mezcla entre ellas. En este tipo de flujo, las partículas de fluido se desplazan en líneas suaves y ordenadas, lo que resulta en un flujo estable y predecible. Suele observarse a bajas velocidades y en fluidos de alta viscosidad, en los que la resistencia es baja y la transferencia de energía es eficiente.

- Flujo turbulento

Suele aparecer a altas velocidades y en condiciones de viscosidad baja, donde el movimiento es caótico y desordenado que presenta mezclas intensas entre las capas de fluido. Este tipo de flujo es más complejo de analizar, ya que las partículas del fluido siguen trayectorias irregulares y aleatorias.

4. SEGÚN LA PROFUNDIDAD

- Flujo superficial

Se refiere al flujo en la parte superior del agua que está expuesta al aire. Este flujo es lo que se observa a simple vista y puede verse afectado por factores externos como el viento, lo que provoca variaciones en la velocidad y dirección del flujo, así como la formación de olas y ondulaciones.

- Flujo Profundo

Este flujo hace referencia al agua en la sección más baja del canal, donde las condiciones tienden a ser más estables y uniformes. En este tipo de flujo, la velocidad es generalmente más alta y menos susceptible a perturbaciones superficiales.

5. SEGÚN VARIABILIDAD DE TIEMPO

- Flujo permanente

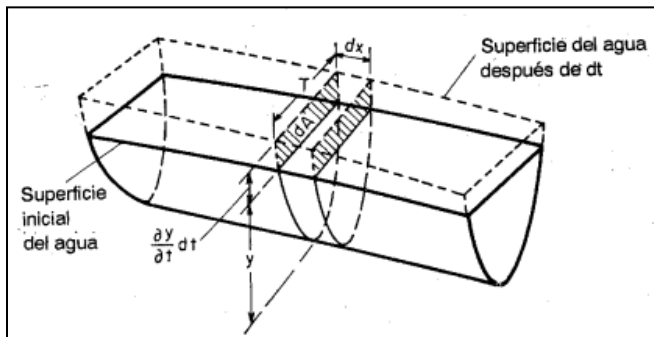
Se caracteriza por condiciones constantes, como velocidad, profundidad y caudal, que no cambian con el tiempo en un punto específico del canal, lo que permite un análisis predecible y estable. En la mayor parte de los problemas de flujo permanente, el caudal es constante a través del tramo de canal en consideración, es decir el flujo es continuo y se expresa con la siguiente ecuación de continuidad.

$$Q = V_1 * A_1 = V_2 * A_2$$

- Flujo no permanente

Este flujo presenta variaciones en sus condiciones, con cambios en profundidad y velocidad que responden a factores externos, como lluvias intensas o ajustes en compuertas. Esta naturaleza dinámica hace que el análisis de flujos no permanentes sea más complejo, y su comprensión es crucial para el diseño y gestión de sistemas hidráulicos eficientes. La ley de continuidad para flujo no permanente requiere la consideración del tiempo como una de sus variables.

Figura 8. Continuidad de flujo no permanente



Fuente: (Chow, Hidráulica de canales abiertos, 1994)

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} + T \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

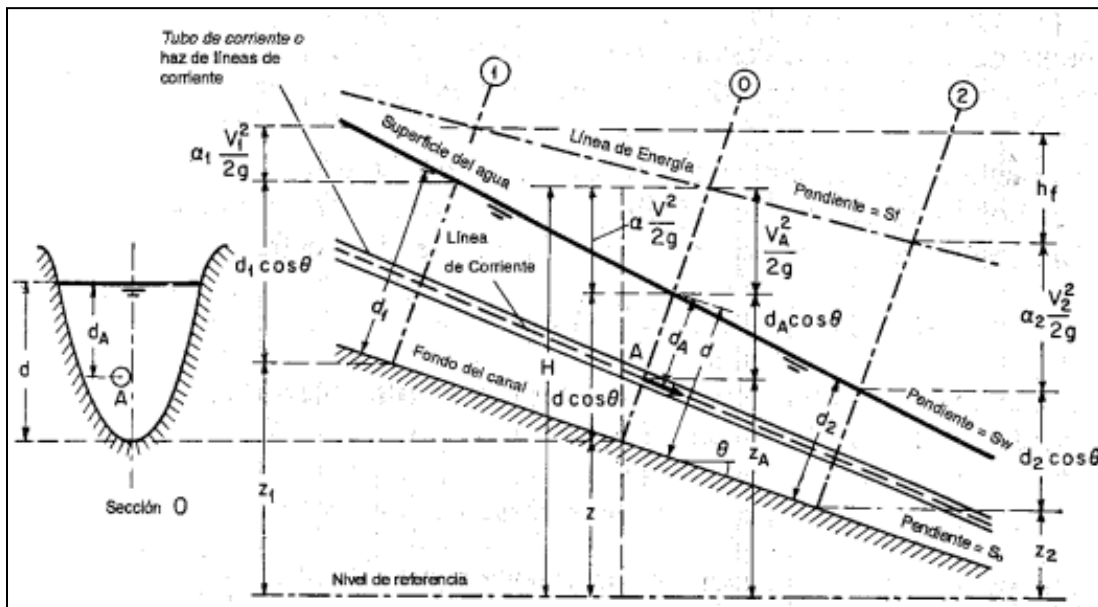
4.5.3. ENERGÍA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS

La energía del flujo en canales abiertos se refiere a la energía disponible en el agua en movimiento y es fundamental para entender el comportamiento hidráulico del sistema. Esta energía se descompone en tres componentes, la energía potencial que depende de la altura del agua respecto al nivel de referencia, la energía cinética que se asocia al movimiento del agua, dependiendo de la velocidad de flujo y la energía de presión, la cual es mínima al tener un flujo libre.

Su estudio es esencial en el diseño de infraestructuras hidráulicas, ya que permite asegurar que cualquier estructura hidráulica pueda manejar adecuadamente el flujo y evitar cualquier daño. Además, conocer la energía del flujo ayuda a evaluar y gestionar la erosión de bancos y lechos de ríos, controlar inundaciones mediante el diseño de desagües o áreas de protección y estimar caudales para la gestión de recursos hídricos.

La energía del flujo esta expresada como la altura total del agua que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad, como se muestra en la siguiente ecuación. Cabe resaltar que cada línea de corriente que pasa a través de una sección de canal tendrá una altura de velocidad diferente, debido a la distribución no uniforme de velocidades en flujos reales.

Figura 9. Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos



Fuente: (Chow, Hidráulica de canales abiertos, 1994)

$$H = z_A + d_A * \cos \varnothing + \frac{V_A^2}{2g}$$

Donde:

- Z_A = elevación del punto A por encima del plano de referencia.
- d_A = profundidad del punto A por debajo de la superficie del agua medida a lo largo de la sección del canal.
- Θ = ángulo de la pendiente del fondo del canal
- $V_A^2/2g$ = altura de la velocidad del flujo en la línea de corriente que pasa a través de A.

4.5.4. ECUACIÓN DE MANNING

La ecuación de Manning es una fórmula empírica utilizada en hidráulica que permite calcular la velocidad del flujo de agua en canales abiertos o tuberías parcialmente llenas, tomando en cuenta la pendiente del canal y las características de la superficie del lecho.

$$v = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde:

- V = velocidad del flujo.
- n = coeficiente de rugosidad de Manning, depende de las características del canal.
- R = radio hidráulico, relación entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado.
- S = pendiente del canal.

4.5.5. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD

El coeficiente de rugosidad de Manning, denotado como “n”, es un parámetro que representa la resistencia al flujo en un canal debido a la superficie del material que lo recubre. Este coeficiente varía según el tipo de material y las condiciones del canal.

De acuerdo a los criterios técnicos expuestos por Ven Te Chow, la selección adecuada de un “n” significa hacer una buena selección de resistencia al escurrimiento. En general, las condiciones que inducen turbulencia y retardo aumentan n, mientras que las que lo reducen, disminuyen n. Por otro lado, Cowan desarrolló un procedimiento para estimar el valor n, que se calcula de la siguiente forma.

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

Tabla 2. Valores para n de Manning

Condiciones del Canal			Valores
Material	Tierra	n0	0.020
	Roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
	Arenoso		0.023
Grado de Irregularidad	Ligero	n1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones en la sección transversal del canal	Gradual	n2	0.000
	Ocasional		0.005
	Frecuente		0.010
	Muy Frecuente		0.015
Efecto relativo de obstáculos	Despreciable	n3	0.000
	Menor		0.012
	Apreciable		0.025
	Severo		0.055
Vegetación	Nula	n4	0.000
	Baja		0.007
	Media		0.017
	Alta		0.037
	Muy Alta		0.075
Grado de sinuosidad	Menor	m5	1,000
	Apreciable		1,150
	Severo		1,300

Fuente: (Chow, Hidráulica de canales abiertos, 1994)

5. PROCEDIMIENTO GENERAL

5.1.DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

5.1.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para calcular las características del terreno es fundamental contar con la cartografía adecuada. En Colombia, esta información es proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la entidad responsable de producir el mapa oficial y la cartografía básica del país. Para acceder a estos datos, se debe ingresar al sitio web oficial del IGAC, específicamente a la sección de "Cartografía y Geografía", como se muestra en la Figura 10 .

Figura 10. Geoportal del IGAC



Fuente: Propia

Dentro de esta sección, es posible descargar la información cartográfica en dos formatos: de manera integrada o por planchas. La información integrada cubre toda el área de interés en un único archivo, lo cual es útil para una visión general, pero menos detallada, generalmente está disponible en escalas pequeñas como 1:500,000 o 1:100,000. Por otro lado, la información por planchas ofrece datos más específicos, divididos en hojas cartográficas individuales, lo que permite un análisis más preciso con escalas mayores como 1:25,000 o 1:10,000. Para obtener los datos, se selecciona la escala adecuada y el sector correspondiente en la entidad territorial. Luego, se accede a las bases de datos vectoriales por hojas cartográficas, donde se descargan los archivos con extensión *.gdb* de los sectores necesarios.

Es crucial mantener una organización adecuada al trabajar con esta información en el computador. Se recomienda crear una carpeta principal denominada "ArcGIS", dentro de la cual se deben almacenar subcarpetas organizadas para guardar los archivos con extensiones como *.sph* y *.gdb*. Esta estructura permitirá conectar fácilmente la información al programa ArcGIS y asegurará una gestión eficiente de los datos, facilitando el flujo de trabajo durante el análisis.

5.1.2. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA EN ARCGIS

Con la información descargada, el siguiente paso es configurarla en ArcGIS y establecer el sistema de coordenadas que se utilizará. En Colombia, se emplean principalmente dos sistemas de coordenadas:

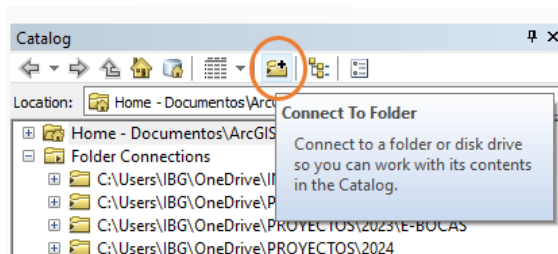
- **MAGNA Colombia Bogotá**, que puede seleccionarse directamente en ArcGIS accediendo a la ruta: Projected Coordinate Systems → National Grids → South America → Colombia → MAGNA Colombia Bogota.
- **CTM12**, adoptado según las resoluciones 471 y 529 de 2020. Este sistema no está predefinido en ArcGIS, por lo que debe configurarse manualmente. Existen guías prácticas, como el tutorial disponible en el siguiente enlace <https://www.youtube.com/watch?v=r8G6MKmZMuU>, que explican cómo crear un sistema de coordenadas personalizado.

Una vez seleccionado o creado el sistema de coordenadas, se conecta la carpeta que contiene los datos al proyecto en ArcGIS. Para mantener un flujo de trabajo organizado, se recomienda crear una carpeta principal para el mapa de ArcGIS y, dentro de ella, subcarpetas específicas para almacenar archivos en formatos como *.sph* y *.gdb*.

Para conectar carpetas en ArcGIS, se siguen estos pasos:

1. En la ventana Catálogo o Panel de Catálogo (ubicada generalmente en el lado derecho de la interfaz), busca la sección Carpetas o Conexiones de carpetas.
2. Haz clic derecho sobre Carpetas o Conexiones de carpetas y selecciona Agregar conexión de carpeta.
3. Navega hasta la ubicación de la carpeta en tu sistema de archivos o copia la ruta completa de tu archivo, selecciónalo y haz clic en Aceptar.
4. La carpeta se agregará a la lista de conexiones, permitiendo acceder fácilmente a los datos desde ArcGIS.

Figura 11. Conectar carpetas en ArcGIS

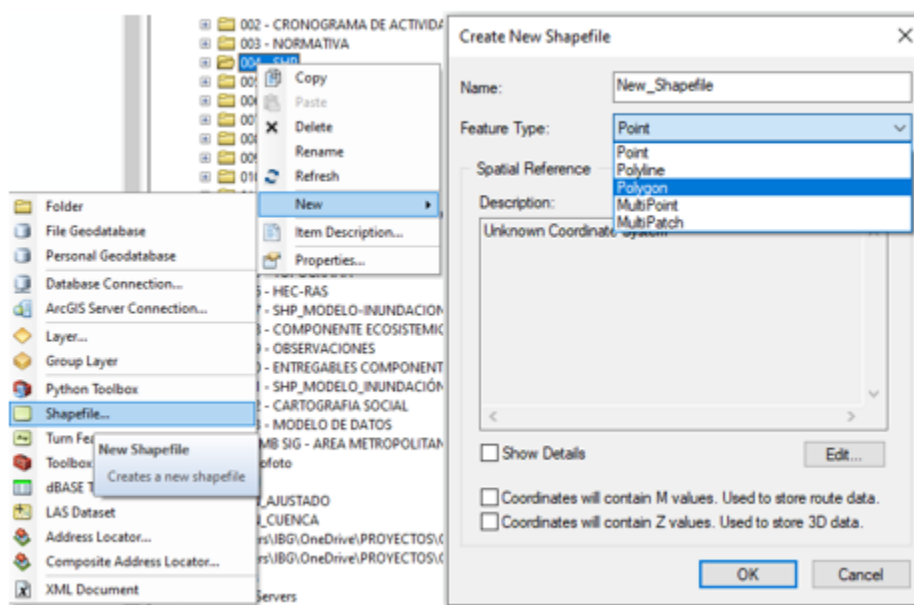


Fuente: Propia

Con la carpeta conectada, puedes arrastrar y cargar los elementos necesarios, como drenajes simples (arroyos y afluentes), drenajes dobles (ríos principales), curvas de nivel, estaciones hidrometeorológicas y puntos de interés. Este procedimiento asegura que toda la información geográfica relevante esté correctamente organizada y disponible para la correcta delimitación de la cuenca.

Para delimitar la cuenca, primero se crea un nuevo shapefile. Haga clic derecho en la carpeta donde desea guardar el archivo, seleccione Nuevo y luego Shapefile. Aparecerá una ventana en la que deberá elegir Polygon en el tipo de entidad (Feature Type).

Figura 12. Crear un nuevo Shapefile



Fuente: Propia

Una vez creado el shapefile, aparecerá esta ventana de edición la parte superior. En el caso que no aparezca, debe darle clic derecho sobre la capa recién creada y seleccione Edit Features → Start Editing → Create Features. En la parte derecha del programa, aparecerá una ventana de Create Features, donde deberá seleccionar la capa que desea editar y finalmente al teminar la edición, seleccione Edit Features → Stop Editing → Save Editing.

Figura 13. Create Features



Fuente: Propia

A continuación, podrá comenzar a crear el polígono que delimitará la cuenca, guiándose por las curvas de nivel y los drenajes disponibles. Inicie el polígono en el cruce del afluente y el punto de interés, utilizando los cursos de agua y drenajes existentes para definir los límites de la cuenca. La cuenca hidrográfica estará delimitada por los cursos de agua que convergen hacia el punto de salida, asegurando así una delimitación precisa del área de estudio.

5.1.3. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

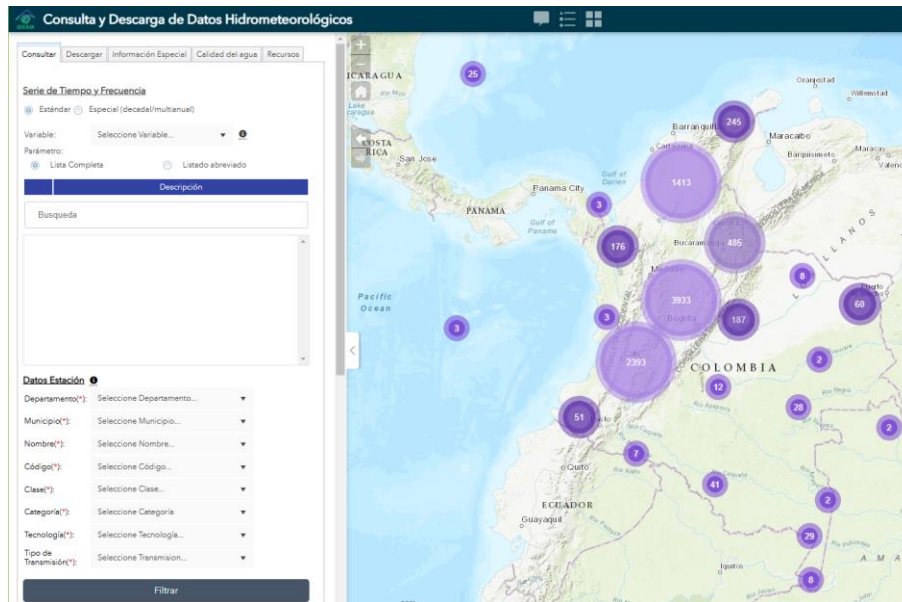
Para determinar las características morfométricas de la cuenca de estudio, como su área, la longitud total del curso hídrico y la pendiente, se recomienda consultar la "Guía metodológica para el cálculo de caudales de diseño de hoyas hidrográficas", específicamente el ítem 2.1.1.4, donde se detalla paso a paso el procedimiento para calcular estos parámetros.

5.2. ANÁLISIS HIDROCIMATOLÓGICO

5.2.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para obtener los datos pluviométricos necesarios, se debe recurrir a la información proporcionada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), que gestiona una extensa red de estaciones hidrometeorológicas en todo el país. Los datos de estas estaciones pueden encontrarse en línea, siguiendo la ruta IDEAM → Datos Hidro-meteorológicos, donde se filtran por los datos de estación requeridos y se descargan.

Figura 14. Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos



Fuente: Propia

El primer paso consiste en seleccionar las estaciones relevantes, para lo cual se deben considerar varios factores. Un criterio clave es la proximidad de la estación a la cuenca de estudio. La estación debe estar activa, pero si no es así, se pueden utilizar estaciones inactivas o en mantenimiento, siempre y cuando tengan una serie de datos de al menos 15 años con menos del 10% de datos faltantes. Para acceder a estos datos, existen dos métodos:

- **Página web del IDEAM:** Se accede a la sección de consulta y descarga de datos hidrometeorológicos del IDEAM. Allí, se completan los campos requeridos, incluyendo el período, la serie temporal y la frecuencia deseada (se selecciona "estándar"), además del parámetro de precipitación y el tipo de día pluviométrico. Después, se ingresan los datos de ubicación de la estación y se selecciona la estación deseada para descargar la información.
- **Información Base IBG en ArcGIS:** Si la página del IDEAM no está disponible, puede utilizar ArcGIS. Busque el icono de "Identificar" en la parte superior de la ventana. Al hacer clic en las estaciones de interés, se abrirá una ventana en el lado derecho con los detalles de la estación. Usando el código numérico de la estación, acceda a los datos de precipitación desde la base de datos de la empresa, y descargue el archivo de precipitaciones desde la ruta: INFORMACION BASE IBG → PT_Nacional en OneDrive.

Una vez descargados los datos, abra el archivo en Excel y seleccione la columna correspondiente. Luego, use la opción "Texto en columnas" en la sección de datos para organizar la información, eligiendo "Delimitados" y marcando el separador correspondiente. Después de este proceso, los datos estarán organizados en columnas, y podrá crear dos nuevas columnas para separar el mes y el año con las fórmulas +MES y +AÑO.

A continuación, cree una tabla dinámica seleccionando las columnas de mes, año y los valores de precipitación. Diríjase a Insertar y luego a Tabla dinámica, colocando el año en las columnas, el mes en las filas y la suma de los valores de precipitación en los valores. Si los últimos 15 años de datos no son continuos, la estación no es útil.

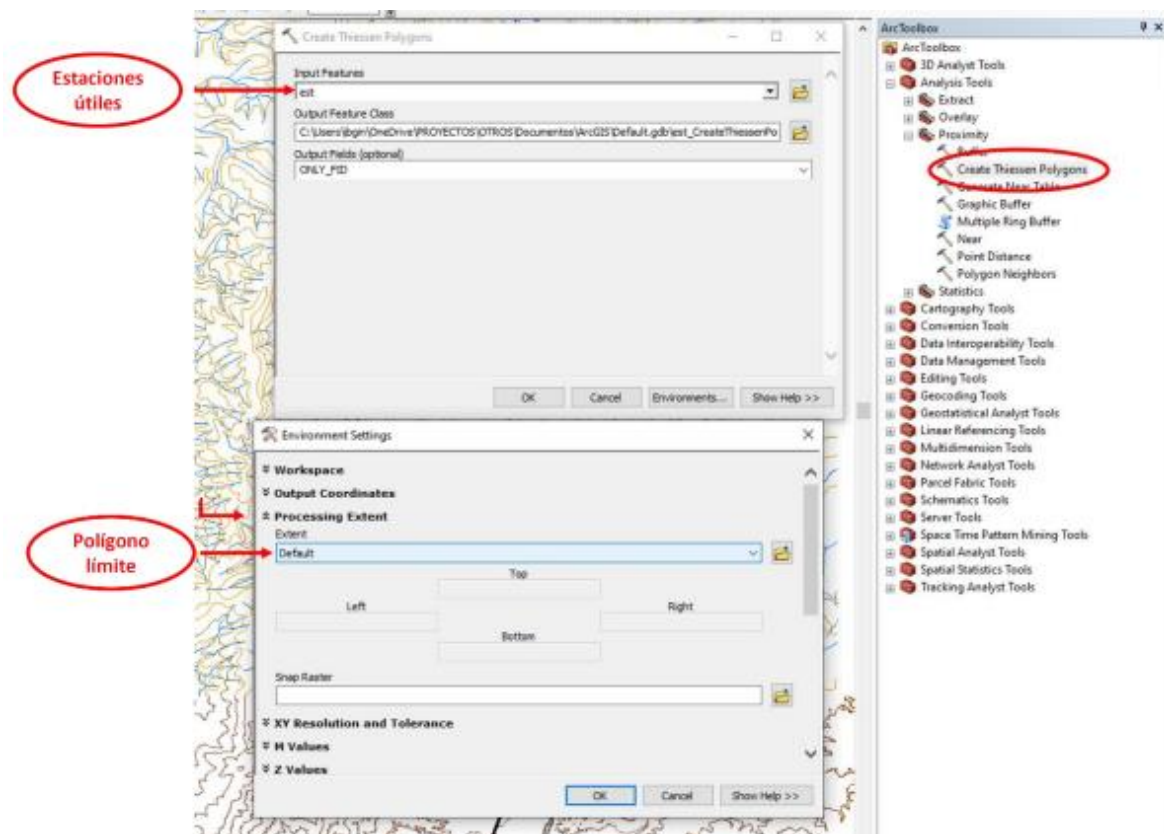
5.2.2. POLÍGONOS DE THIESSEN

El polígono de Thiessen es una técnica hidrológica utilizada para dividir un área en regiones que dependen de la proximidad a las estaciones hidrometeorológicas. Cada estación se asocia con una zona en la que es la más cercana y, por lo tanto, tiene mayor influencia sobre las condiciones locales. ArcGIS dispone de una herramienta para generar estos polígonos.

Una vez que haya determinado las estaciones válidas, debe crear un nuevo shapefile, como se explicó previamente, pero esta vez seleccionando point como tipo de entidad (Feature Type) y marcando las estaciones de interés mientras se encuentra en el modo de edición. Para facilitar el trabajo con los polígonos de Thiessen, puede desactivar la capa de todas las estaciones hidrometeorológicas. También es necesario crear un polígono delimitante que abarque todas las cuencas y las estaciones válidas.

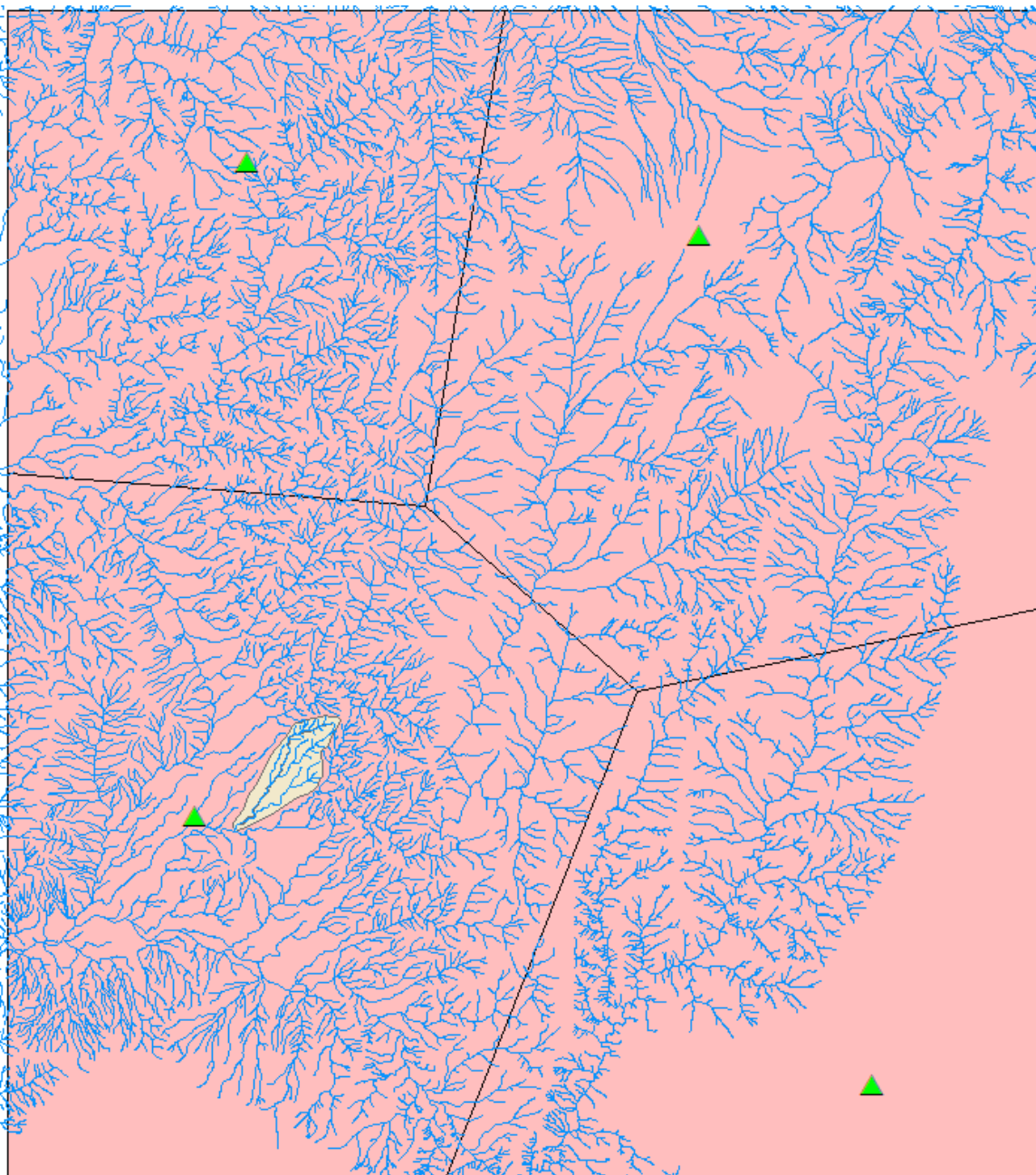
Para generar el polígono de Thiessen, siga la siguiente ruta en ArcGIS: ArcToolbox → Analysis tools → Proximity → Create Thiessen Polygons. En la ventana que aparece, seleccione las estaciones hidrometeorológicas en Input Features y, en Output Fields (opcional), elija All. En la parte inferior, en Environments → Processing Extent, seleccione el polígono delimitante previamente creado. La Figura 15 muestra la ruta para la ruta para crearlo y la Figura 16 un ejemplo de cómo se ve el polígono de Thiessen creado y cómo cada estación afecta a las cuencas correspondientes

Figura 15. Creación de polígonos de Thiessen



Fuente: (Velasco, 2024)

Figura 16. Polígono de Thiessen

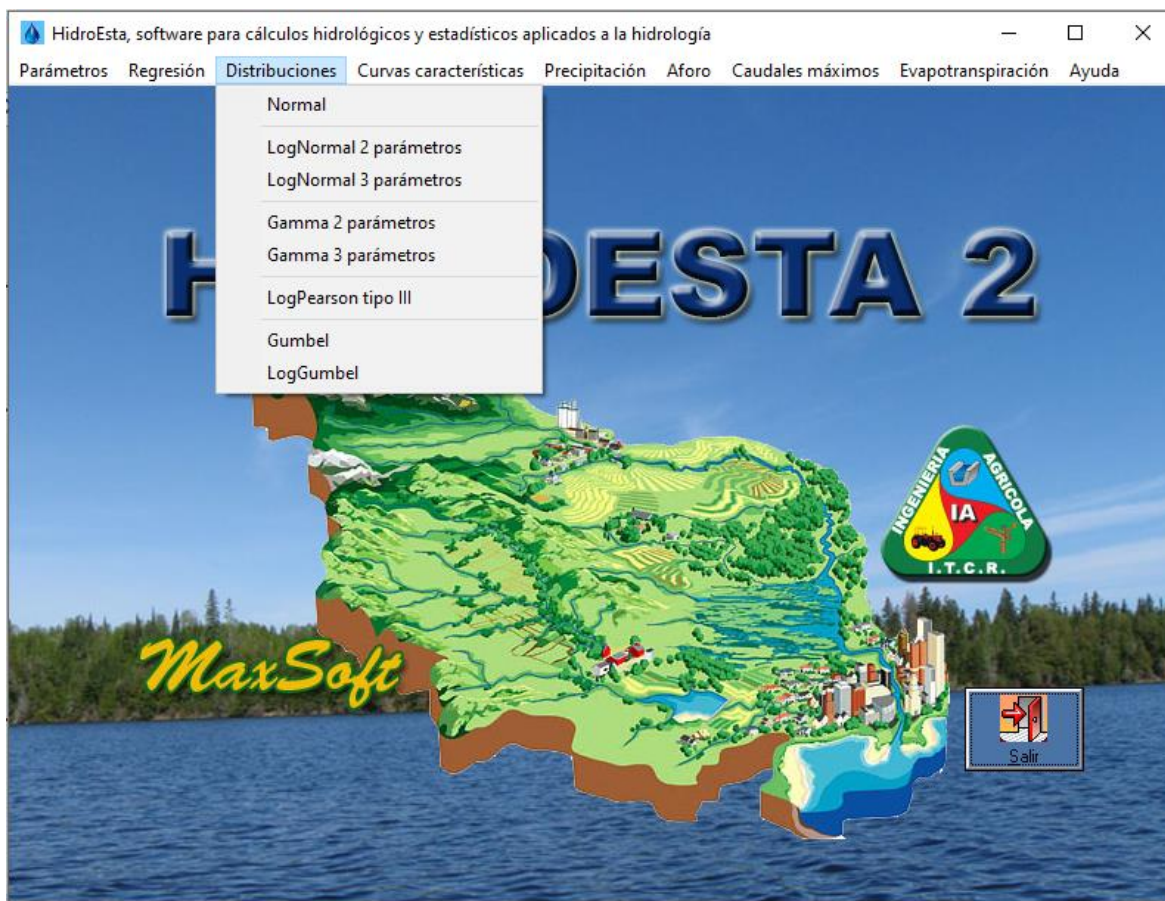


Fuente: Propia

5.2.3. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

El análisis probabilístico se realizará a partir de los datos de precipitación máxima en 24 horas, empleando tres tipos de distribuciones: Normal, Log-Normal y Log-Gumbel. Al abrir el software, se selecciona la opción Distribuciones y se elige la distribución con la que se desea trabajar.

Figura 17. Distribuciones disponibles en HidroEsta



Fuente: Propia

Para cada una de las distribuciones el procedimiento de ingreso de datos es el mismo. Primero se debe preparar un archivo de Excel que contenga exclusivamente los datos de precipitación máxima de 24 horas. Este archivo se carga al software haciendo clic en la opción Excel como se observa en la Figura 18.

Figura 18. Datos de ingreso en HidroEsta

Ajuste de una serie de datos a la distribución Normal

Ingreso de datos:
Nota: Una vez que digite el dato, presionar ENTER

N°	X
1	65.0
2	90.6
3	47.9
4	93.3
5	60.9
6	93.3
7	66.8
8	122.3
9	88.2
10	72.8
11	95.0
12	98.7
13	127.3
14	128.5

← DATOS DE PRECIPITACIÓN INSERTADOS

m	X	P(X)	F(Z) Ordinario	F(Z) Mom Lineal	Delta

Caudal de diseño:
Caudal (Q): m³/s
Período de retorno (T): años
Probabilidad (P): %
Q=f(T) T=f(Q) P(Q<q) P(Q>q)

Parámetros distribución normal:
Con momentos ordinarios:
De localización (x_m):
De escala (S):
Con momentos lineales:
Media lineal (x_l):
Des. Estandar (S_l):

Tipo de ajuste:
☒ Parámetros ordinarios
☐ Momentos lineales

Nivel significación:
☐ 0.20
☐ 0.10
☒ 0.05
☐ 0.01

Ajuste:

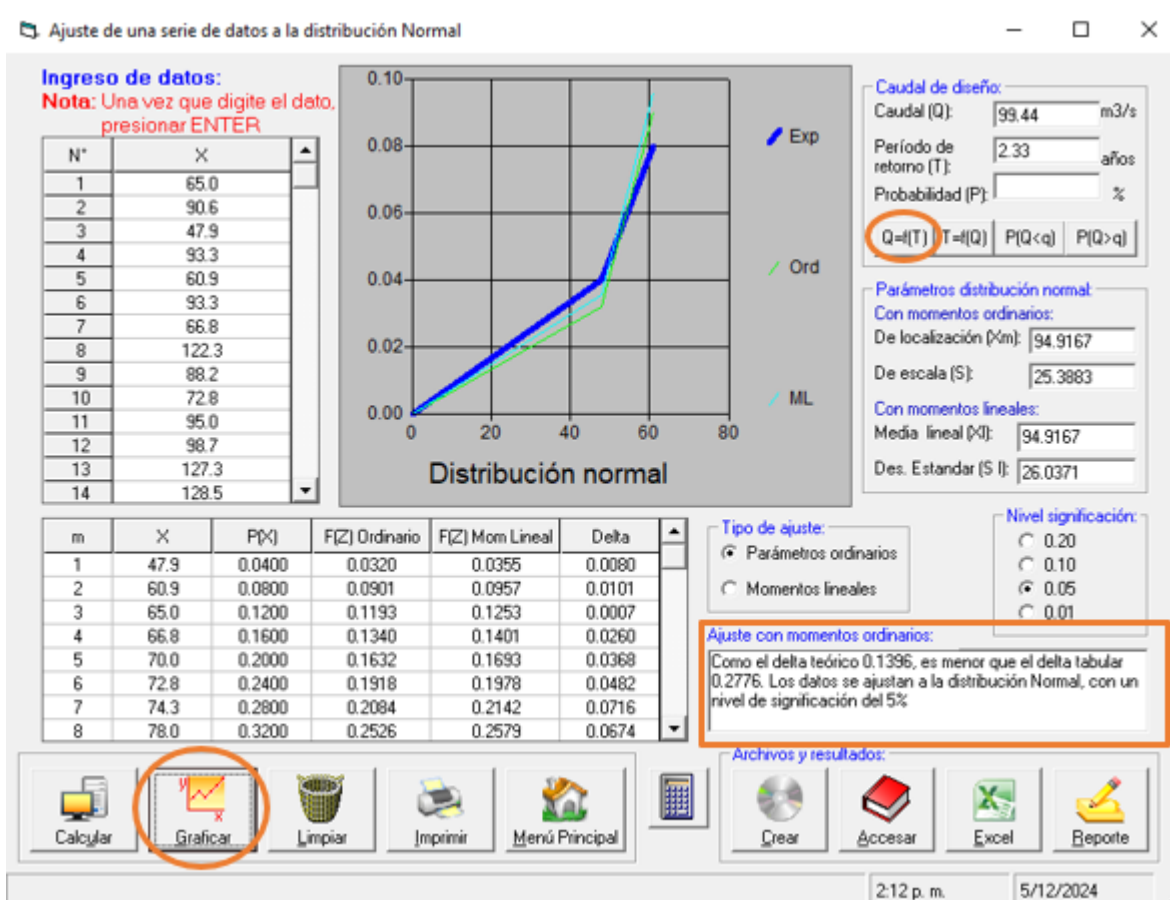
Archivos y resultados:
Calcular Graficar Limpiar Imprimir Menú Principal
Clear Accesar **Excel** Reporte

2:03 p. m. 5/12/2024

Fuente: Propia

Una vez cargados los datos, se selecciona el botón Calcular, y adicionalmente se ingresa el periodo de retorno de interés (T_r). Al seleccionar la opción $Q=f(T)$, el software genera el caudal correspondiente al periodo de retorno especificado. Posteriormente, al hacer clic en Graficar, se muestra la gráfica de la distribución seleccionada, y en la parte inferior derecha se visualiza el ajuste de momentos ordinarios del análisis de precipitación, como se observa en Figura 19.

Figura 19. Distribución Normal



Fuente: Propia

Este análisis estadístico es fundamental para identificar patrones y tendencias en los datos, proporcionando una base sólida para entender cómo pueden comportarse las variables hidrológicas en el futuro. A partir de esta información, es posible determinar las probabilidades teóricas de eventos hidrológicos extremos, como inundaciones o sequías.

Estas evaluaciones son clave para la gestión de riesgos y el diseño de estrategias de mitigación. Con un entendimiento claro de la magnitud y frecuencia de los eventos hidrológicos, se pueden desarrollar modelos predictivos que respalden decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos y en la protección de comunidades vulnerables.

5.2.4. CRUVAS IDF Y TORMENTA DE DISEÑO

Para la elaboración de cada una de estas ya se explicaron previamente las diferentes metodologías que existen y cuales se tuvieron en cuenta, sin embargo, para un procedimiento más específico y detallado se recomienda dirigirse a la "Guía metodológica para el cálculo de caudales de diseño de hoyas hidrográficas", específicamente el ítem 2.1.2, donde se detalla paso a paso el procedimiento para calcular estos componentes.

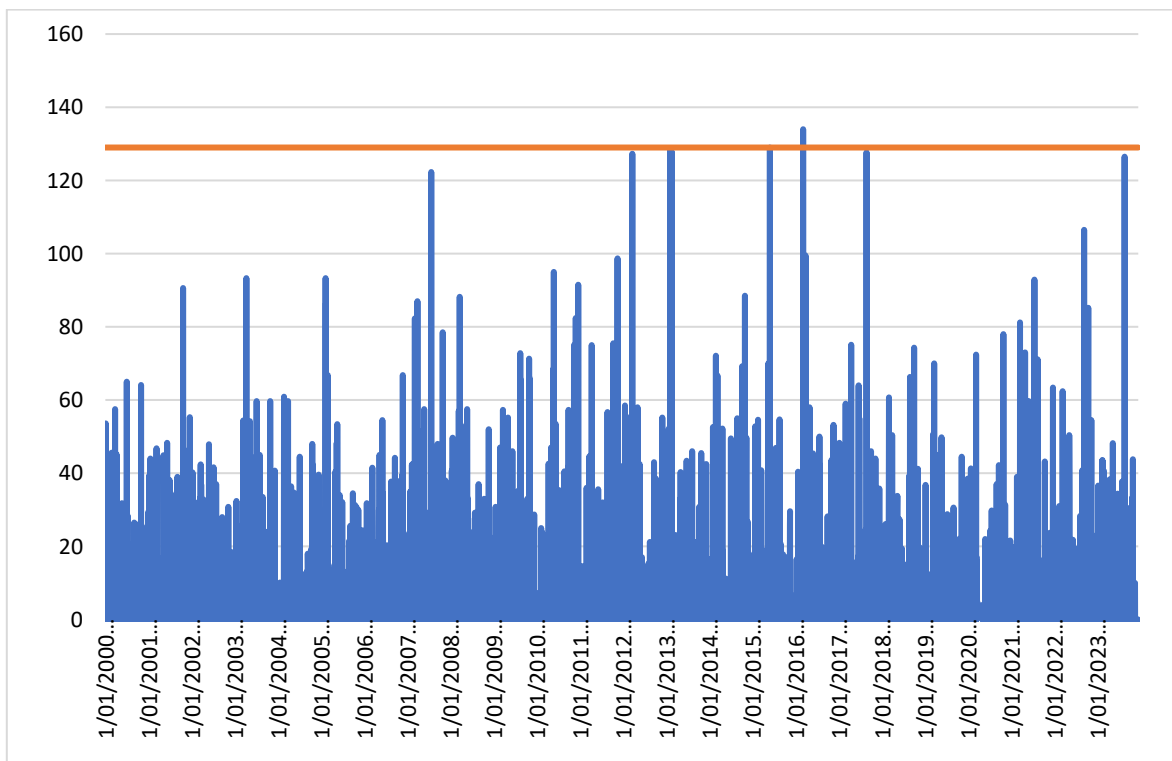
5.3. ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE INTESRES

Para elaborar la gráfica de frecuencia de máximos, es indispensable incorporar información no sistemática obtenida a través de cartografía social y trabajo de campo. Estos datos se integran en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para complementar la delimitación del componente hidrológico. En este proceso, se registran eventos históricos de cambios ambientales basados en los testimonios de la comunidad, construyendo una línea de tiempo que identifica eventos históricos puntuales junto con su respectiva descripción.

Una vez se dispone de un shapefile que contiene los eventos georreferenciados y sus atributos, se procede a generar una gráfica de precipitación frente a tiempo. En esta gráfica se identifica cuándo ocurrieron los eventos registrados por los testimonios de la comunidad y se selecciona la precipitación máxima o ponderada asociada a dichos eventos. Esta precipitación será la línea límite de precipitación que se observa de color naranja en la Figura 20, a partir de la cual, si un valor de precipitación graficado la supera, indica que efectivamente para esa fecha exacta ocurrió un evento de inundación como lo dijo el testimonio de la comunidad.

Esta correlación entre la información hidrológica y los testimonios comunitarios es clave para obtener una visión más precisa de los eventos de inundación en el área de estudio, especialmente en el corredor aluvial. Este cruce de información permitirá una mejor comprensión de los patrones de inundación, contribuyendo a la delimitación y gestión adecuada de la ronda hídrica, con un enfoque más integral que considere tanto los datos científicos como el conocimiento local.

Figura 20. Análisis de Frecuencia máxima



Fuente: Propia

5.4.CALCULO DE CAUDALES

El procedimiento detallado para el cálculo de caudales por el método racional y el método del hidrograma unitario se encuentran detallados en la "Guía metodológica para el cálculo de caudales de diseño de hoyas hidrográficas", elaborada por la practicante Shary Zadith Vargas Velasco. Se recomienda dirigirse allí para continuar con el proceso.

5.5. MODELACIÓN HIDRÁULICA

El procedimiento detallado para la modelación hidráulica se encuentra detallada en la " Guía metodológica para realizar un modelo de inundación", elaborada por la practicante Shary Zadith Vargas Velasco. Se recomienda seguir los pasos descritos allí para poder tener como resultado las manchas de inundación correspondientes a los periodos de interés.

6. PRODUCTOS ESPERADOS

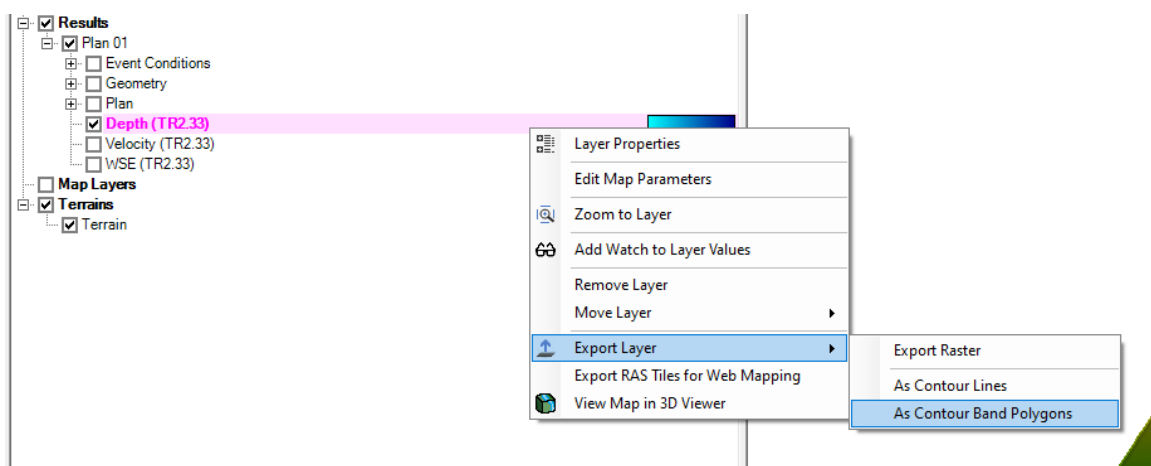
6.1. DELIMITACIÓN DEL CAUCE PERMANENTE

La delimitación del cauce permanente se basa en la extensión máxima de la mancha de inundación, obtenida mediante un modelo hidráulico que considera períodos de retorno de 2.33 años en zonas rurales y de 15 años en áreas urbanas. Esta mancha de inundación proporciona una representación precisa de la lámina de agua que cubre el terreno durante eventos de desbordamiento de la fuente hídrica, permitiendo evaluar con exactitud los riesgos de inundación en el área de estudio. Este enfoque constituye una base fundamental para la planificación territorial y la gestión de riesgos en regiones vulnerables a este tipo de eventos.

El resultado final incluye la delimitación de la mancha de inundación asociada a los períodos de retorno mencionados. Se recomienda complementar este análisis con la elaboración de un mapa detallado que integre la ubicación de la cuenca, el cauce delimitado y otros elementos relevantes. Este mapa sirve como una herramienta visual útil para la toma de decisiones en la gestión territorial, como se muestra en la Figura 22.

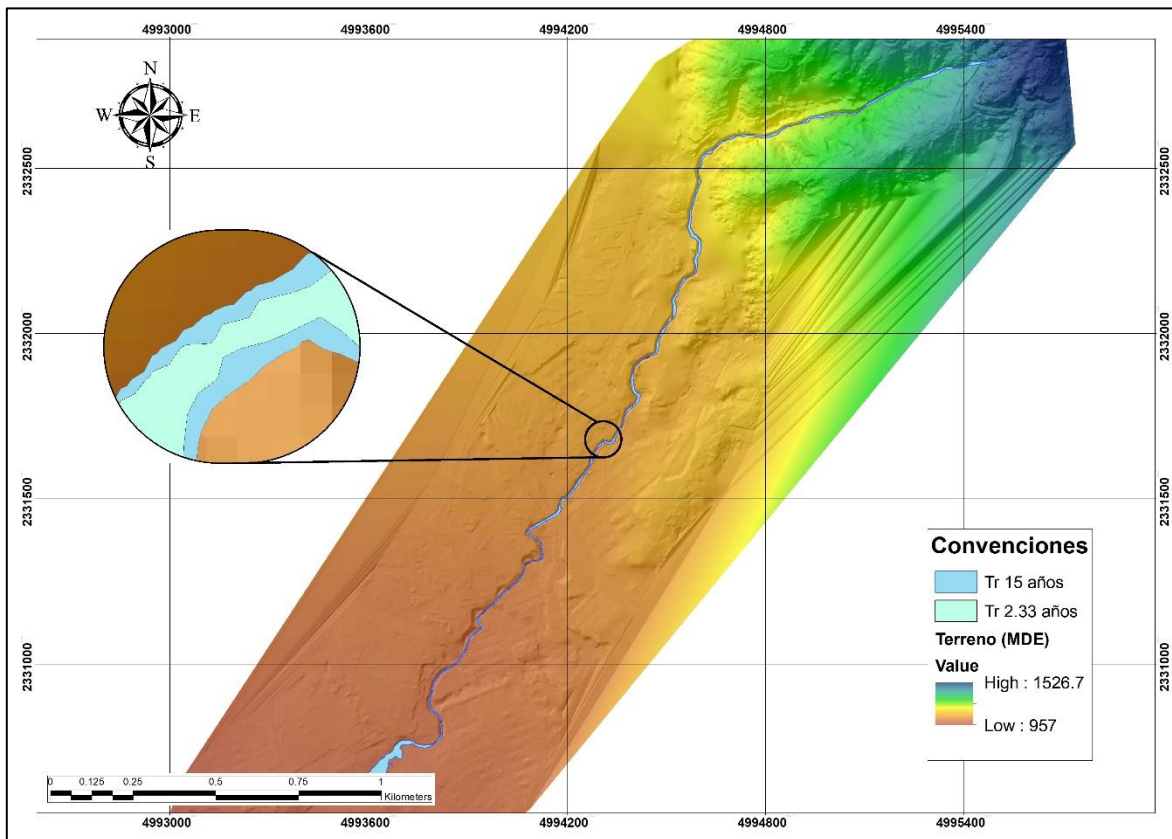
Adicionalmente, la mancha de inundación generada en el software HEC-RAS puede exportarse en formato ShapeFile para su posterior análisis. Este archivo se remite al equipo de ingeniería geomorfológica y al ingeniero de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para que trabajen en los componentes asociados. Para exportar la mancha en formato ShapeFile, se debe hacer clic derecho sobre la capa deseada y seguir los pasos: *Export Layer* → *As Contour Band Polygons*. Este procedimiento garantiza que los datos estén listos para su uso en herramientas SIG y para integrarse en estudios complementarios.

Figura 21. Descarga de resultados de módulo hidráulico en ShapeFile



Fuente: Propia

Figura 22. Delimitación del cauce permanente



Fuente: Propia

6.2.DEFINICION DEL LÍMITE FISICO

Como resultado de la delimitación del componente hidrológico del límite físico, basada en la Guía de Acotamiento de Rondas Hídricas del Ministerio de Ambiente, se obtienen productos esenciales que contribuyen a la planificación territorial y la gestión integral de riesgos. Entre estos productos se incluye la delimitación precisa del cauce permanente, como se describió anteriormente, así como la identificación y demarcación de los sistemas de drenaje asociados, fundamentales para analizar la dinámica hídrica de la cuenca.

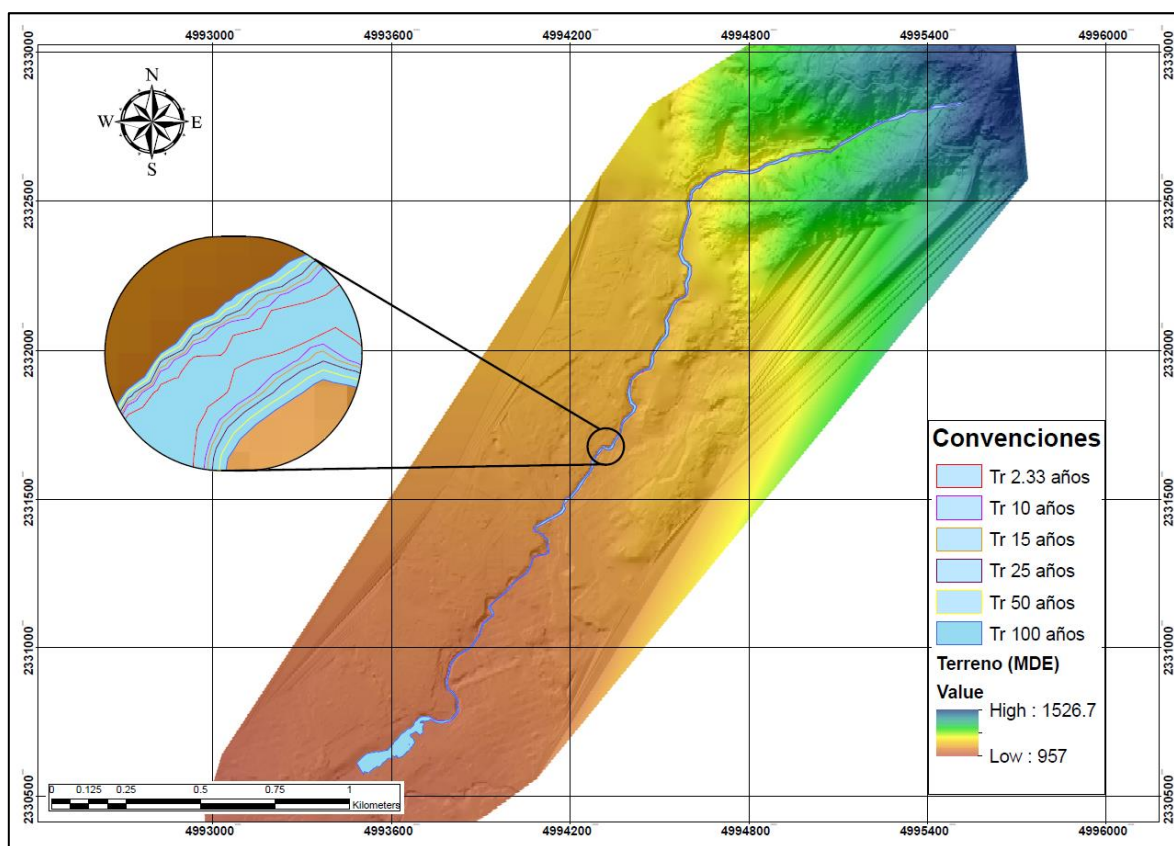
Estos resultados se presentan en mapas cartográficos detallados que integran elementos clave, como la red de drenajes, el cauce principal y las áreas de influencia de inundación.

Además, se genera una base de datos georreferenciada con toda la información espacial y alfanumérica necesaria, optimizada para su uso en herramientas de sistemas de información geográfica (SIG).

Como parte del análisis hidrológico, se entrega la mancha de inundación correspondiente a un período de retorno de 100 años, la cual se utiliza para verificar que el cauce permanente (definido por las manchas de inundación para períodos de retorno de 2.33 o 15 años, según la zona) se encuentra dentro de los límites establecidos para la mancha de 100 años. Esta información se integra con los otros dos componentes, geomorfológico y ecosistémico, para definir el límite físico de la ronda hídrica y diseñar estrategias de manejo ambiental.

Finalmente, se recomienda elaborar un mapa que visualice los diferentes *shapefiles* correspondientes a cada período de retorno, proporcionando una herramienta clara y precisa para la gestión del territorio, como se observa en la Figura 23.

Figura 23. Definición del límite físico



Fuente: Propia

7. REFERENCIAS

- CDMB. (2015). POMCA Alto Lebrija. *Plan de ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Alto Lebrija*. Colombia: MinAmbiente, Fondo Adaptación. <https://www.cdm.gov.co/cdm/tematicas/pomcas>.
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana, https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_AB_IERTOS.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1949). *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia: <https://es.scribd.com/document/447733434/Hidrologia-Aplicada-Ven-Te-Chow-pdf>.
- Díaz-Granados, O., & Vargas M., R. (1997). Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. *Revista de Ingeniería Unianandes*, 1-13.
- IDEAM. (2019). *GUÍA METODOLÓGICA DE LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA VARIABLES METEOROLÓGICAS*. <https://www.superfinanciera.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=1041279>.
- IDEAM. (2023). *Hoja metodológica del Índice de Aridez (versión 1,3)*. Bogotá D.C., Colombia: https://bart.ideam.gov.co/indicadores/ind/agua/hm/HM_IA.pdf.
- INVIAS. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>.
- MAVDT. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Colombia: República de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *GUÍA TÉCNICA DE CRITERIOS PARA EL ACOTAMIENTO DE LAS RONDAS HÍDRICAS EN COLOMBIA*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/18.-Anexo-18-Guia-Criterios-para-el-acotamiento-de-las-Rondas-Hidricas-1.pdf>.
- Montaner Salas, M. E., & Sánchez-Almhalla Serrano, E. (1988). *APROXIMACION, POR EL METODO DE THORNTHWAITE, AL CALCULO DE INFILTRACION DE LLUVIA UTIL*. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42801>.
- Velasco, S. Z. (2024). *Guía metodológica para el cálculo de caudales de diseño de hoyas hidrográficas*.