

APLICACIÓN DE HIDROSIG PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO EN  
LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA

WILLIAM LEONARDO CELY HERNANDEZ  
MAYRA ALEJANDRA TANGUA SANTAMARIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA

2011

APLICACIÓN DE HIDROSIG PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO EN  
LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA

WILLIAM LEONARDO CELY HERNANDEZ  
MAYRA ALEJANDRA TANGUA SANTAMARIA

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Civil

Director  
LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS  
Ingeniero Civil MSc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA

2011

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	14
1. ASPECTOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	16
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA.....	16
1.2 LOCALIZACIÓN.....	16
1.3 SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS .....	17
1.4 GEOMORFOLOGÍA.....	17
1.5 CLIMA.....	18
2. METODOLOGIA PROPUESTA .....	20
2.2 ANTECEDENTES.....	20
2.3 IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA.....	21
2.3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE TODOS LOS TEMAS DE ESTUDIO.....	22
2.3.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE.....	22
2.3.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS DATOS EN EL FORMATO REQUERIDO POR EL SOFTWARE. ....	23
2.3.4. EVALUACIÓN DE CONDICIONES TOPOGRÁFICAS DE LA ZONA. ....	23
2.3.5. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA ZONA. ....	23
2.3.6 RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE.....	23
3. PROCESAMIENTO DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO.....	24
3.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT).....	24
3.2 APLICACIÓN SOBRE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA.....	25
3.2.1 RECONOCIMIENTO DE MODELO DIGITAL DEL TERRENO.....	26
3.2.2 PROCESAMIENTO DE MODELO DIGITAL. ....	26
3.2.3 DELIMITACIÓN DE LAS CORRIENTES Y ÁREA DE LA CUENCA.....	34
4. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	37
4.1 ESTIMACIÓN DE VARIABLES MACROCLIMÁTICAS .....	37
4.1.1 TEMPERATURA.....	37

4.1.2 PUNTO DE ROCÍO.....	40
4.1.3 HUMEDAD RELATIVA.....	41
4.2 PRECIPITACIÓN.....	43
4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	49
4.3.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN.....	49
4.3.2 RESULTADOS.....	56
5. BALANCE HIDRICO DE LARGO PLAZO.....	57
5.1 CAUDALES MEDIOS ANUALES.....	58
5.2 CAUDALES MINIMOS.....	61
5.2.1 REGIONALIZACIÓN DE CARACTERÍSTICAS MEDIAS.....	62
5.3 CAUDALES MAXIMOS.....	71
5.3.1 REGIONALIZACIÓN DE CARACTERÍSTICAS MEDIAS.....	71
CONCLUSIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	77

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones con registro de Precipitación en la Cuenca Superior del Rio Lebrija .....	44
Tabla 2. Resultados de evapotranspiración .....	56
Tabla 3. Resultados de caudales medios para cada uno de los métodos de estimación de evapotranspiración real.....	60
Tabla 4. Datos característicos de la cuenca a partir de los datos de la estación la Granja Piedecuesta .....	65
Tabla 5. Valores de los parámetros de regionalización para caudales mínimos. ..	69
Tabla 6. Valores de caudales mínimos por Gumbel y LogNormal para diferentes tiempos de retorno. ....	71
Tabla 7. Valores de los parámetros de regionalización para caudales máximos...	72
Tabla 8. Valores de caudales máximos por Gumbel y LogNormal para diferentes tiempos de retorno .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización en Santander de la cuenca superior del río Lebrija.....	19
Figura 3. Cuenca Superior del Rio Lebrija .....	28
Figura 4 Plug-ins <i>Watershed Delineation</i> .....	29
Figura 5. Plug-ins <i>WatershedDelineation</i> .....	29
Figura 6. Procesamiento del modelo digital del terreno a través de MapWidow...30	
Figura 7. Cuadro de dialogo de progreso de la información procesada.....	30
Figura 8. Información entregada mediante el procesamiento de MDT .....	31
Figura 9. Cuadro de convenciones del procesamiento de MDT a través de HidroSIG 4.....	32
Figura 10. Acceso al convertidor de direcciones de drenaje.....	32
Figura 11. Convertidor de Mapa de Direcciones a formato HidroSIG .....	33
Figura 12. Mapa raster de dirección de drenaje de la Cuenca Superior del Rio Lebrija.....	34
Figura 13. Corrientes de la Cuenca Superior del Rio Lebrija.....	35
Figura 14. Delimitación de la cuenca superior del rio Lebrija.....	36
Figura 15. Herramienta operativa HidroSIG 4.....	38
Figura17. Mapa de la Temperatura Punto de Rocío .....	41
Figura 18. Mapa del cálculo de la humedad relativa con la ecuación de ClausiusClapeyron.....	43
Figura 19. Localización de las estacione en la Cuenca Superior del Rio Lebrija...46	
Figura 20. Mapa de Precipitación Total promedio multianual de la Cuenca Superior del Rio Lebrija.....	48
Figura 21. Cálculo de mapa L a través la calculadora de mapas raster de HidroSIG 4.0.....	50
Figura 22. Mapa L calculado con la calculadora de mapas raste de HidroSIG.....	50
Figura 23. Comprobación de relación $(P / L) > 0.316$ . .....	51
Figura 24. Calculo del mapa evapotranspiración a partir de la ecuación de Turc en la calculadora de mapas raster .....	52

Figura 25. Mapa de evapotranspiración estimado a partir de la ecuación de Turc	52
Figura 26. Mapa de evapotranspiración estimado a partir de la ecuación de CENICAFE.....	54
Figura 27. Mapa de evapotranspiración estimado a partir de la ecuación de Coutagne .....	55
Figura 28. Ruta para el acumulador de flujo-cálculo de caudal medio.....	59
Figura 29. Cuadro de dialogo, ingreso de variables para el cálculo del mapa de caudal medio.....	59
Figura 30. Mapa de Caudal Medio a partir de la evapotranspiración estimada .....	60
Figura 31. Distribución Gumbel Tipo I para la Estación La Granja Piedecuesta....	64
Figura 32. Gráfica del Hidrograma Unitario Triangular .....	68
Figura 33. Estimacion de caudales mínimos para cualquier tiempo de retorno. ....	70
Figura 34 Estimación de caudales máximos para cualquier tiempo de retorno .....	73

## RESUMEN

### TÍTULO

APLICACIÓN DE HIDROSIG PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA

### AUTORES

CELY William Hernández Leonardo  
Tanguá Santamaría Mayra Alejandra

### DESCRIPCIÓN

Colombia es un país con gran potencial desde el punto de vista de los recursos hídricos. Sin embargo, ha habido un interés nacional relacionados con la preservación y protección del uso del agua debido a los problemas que están asociados con el cambio climático, como inundaciones y sequías. A esto se agrega la contaminación de los ríos, los mares y los procesos de urbanización está siendo desarrollado por la influencia antropogénica en las ciudades. Esta influencia tiene un efecto negativo sobre la permanencia de los recursos hídricos, al aumentar el uso responsable y no derrochador de la misma, creando problemas ambientales que afectan el ciclo hidrológico. Por esta razón, es necesario elaborar estrategias para la conservación del agua, pero para lograr esto es necesario conocer en detalle la composición geográfica y las diferentes cuencas hidroclimáticas.

Este artículo muestra la propuesta de una metodología que permite estimar el balance hídrico del río superior de Lebrija, de la HidroSIG aplicación 4.0. (UNALM-UPME, 2000)  
HidroSIG 4.0 es un programa desarrollado por el posgrado en el uso de los recursos hídricos de la Escuela de Minas de la Universidad Nacional de Colombia - Seccional Medellín, que permite la visualización interactiva de los componentes hidrológicos y el clima de Colombia, con aplicaciones en el balance hídrico nacional que escala. Este programa fue diseñado con la intención de proporcionar apoyo a la gestión de los recursos hídricos, lo que facilita la propia dirección.

HidroSIG 4.0 es una herramienta útil para las entidades responsables de la gestión de los recursos hídricos a nivel local (empresas departamentales, etc), que permite el almacenamiento y análisis de la información distribuida en la cuenca de interés o estudio.

\* Proyecto de grado

\*\*\* Escuela de física de la Escuela de Ingeniería Civil. director. Luis Fernando Castañeda MSC GALVIS

## ABSTRACT

### TITLE

HidroSIG APPLICATION FOR CALCULATING THE WATER BALANCE IN THE RIVER UPPER BASIN LEBRIJA

### AUTHORS

CELY Hernandez William Leonardo  
TANGUA Santamaria Mayra Alejandra

### DESCRIPTION

Colombia is a country with great potential from the standpoint of water resources. However, there has been a national concern related to the preservation and protection of water use due to problems that are associated with climate change such as floods and droughts. Associated with this is added the pollution of rivers, seas and urbanization processes being developed by anthropogenic influence in the cities. This influence has a negative effect on the permanence of water resources, by increasing the use not responsible and wasteful of it, creating environmental problems that affect the hydrological cycle.

For this reason, it is necessary to elaborate strategies for water conservation, but to accomplish this it's necessary to know in detail the composition and geographical hydroclimatic different basins.

This paper shows the proposal of a methodology that allows us to estimate the water balance of the Upper river of Lebrija, from the application 4.0 HidroSIG. (UNALM-UPME, 2000)

HidroSIG 4.0 is a program developed by the postgraduate in use of water resources of the School of Mines at the National University of Colombia - Sectional Medellín, which allows for interactive display of the Hydrological and climate components of Colombia, with applications in water balance to national scale. This program was designed with the intent to provide support for the management of water resources, facilitating the management itself.

HidroSIG 4.0 is a useful tool for the entities responsible for water resource management at local level (departmental corporations, etc.), allowing storage and analysis of information distributed in the basin of interest or study.

\* Draft grade

\*\*\* School physical-School of civil engineering. director. Luis Fernando Castañeda MSC GALVIS

## INTRODUCCION

Colombia es un país con gran potencial desde el punto de vista de los recursos hídricos. Sin embargo, se ha generado una preocupación nacional relacionada con la preservación y protección del uso del agua debido a los problemas que son asociados al cambio climático, como las inundaciones, sequías. Asociado con lo anterior se suma la contaminación de los ríos, mares y los procesos de urbanización acelerada que se vienen desarrollando por la influencia antropogénica en las ciudades. Esta influencia incide negativamente sobre la permanencia del recurso hídrico, al aumentar el uso no responsable y desmedido del mismo, generando problemáticas ambientales que afectan el ciclo hidrológico.

Debido a lo expuesto anteriormente, se hace necesaria la elaboración inmediata de estrategias de conservación del recurso hídrico, pero para esto se debe conocer con detalle la composición hidroclimática y geográfica de diferentes cuencas.

En el presente documento, se encuentra la propuesta de una metodología que nos permite estimar el balance hídrico sobre la cuenca superior del Río Lebrija, a partir de aplicación de HydroSIG 4.0. (UNALMED-UPME, 2000)

HydroSIG 4.0 es un programa desarrollado por el posgrado en aprovechamiento de los recursos hidráulicos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, el cual permite un despliegue interactivo de los componentes hidrológicos y climáticos de Colombia, con aplicaciones en balances hidrológicos a escala nacional. Este programa fue diseñado con la intención de servir de soporte para el manejo del recurso hídrico, facilitando la gestión del mismo.

HidroSIG 4.0 es una herramienta de gran utilidad para las entidades encargadas de la gestión del recurso hídrico a nivel local (corporaciones departamentales, entre otras), ya que permite el almacenamiento y el análisis de la información distribuida en la cuenca de interés o estudio.

La implementación de Hidrosig 4.0 sobre la cuenca del Río Lebrija permite motivar a las corporaciones encargadas de la gestión del recurso hídrico en darle un manejo al mismo y tener una visión integral de la cuenca.

## **1. ASPECTOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA**

La cuenca superior del río Lebrija es la principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad de Bucaramanga y la zona metropolitana; el área de la cuenca tiene una extensión de 1243.33 km<sup>2</sup> y está comprendida en su totalidad por 12 municipios entre los que cabe destacar la cabecera municipal de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Río Negro y Piedecuesta.

### **1.2 LOCALIZACIÓN**

La cuenca superior del río Lebrija está ubicada en la zona andina, configurada por una topografía montañosa de pendientes acentuadas, que forma parte del macizo de Santander. Dicha región está localizada en la parte norte de la cordillera Oriental, aproximadamente entre los 6°54' y los 7°27' de latitud Norte (1254535.049 y 1315700.024) y los 73°15' y 72°15' de longitud al Oeste del meridiano de Greenwich (1091838.511 y 1202149.020).

La cuenca delimita al Norte con la unión de los ríos Oro y Surata; al Sur aproximadamente a 1600m. De altitud con la mesa de Los Santos por encima de la depresión de Piedecuesta; hacia el Este la mesa de Los Santos entra en contacto con la falla del macizo Ígneo - metamórfico de Santander para culminar en el páramo de Santurban; y hacia el Oeste a unos 1100 m.s.n.m. la mesa de arenisca del llano de Palmas y de Lebrija, que domina al Norte el gran valle del Magdalena y más al sur el cañón del río Suárez.

### 1.3 SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS

Dentro de la cuenca superior del río Lebrija se encuentran cuatro (4) sub - cuencas, relacionadas a continuación, (*ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA, 2000*).

- Subcuenca del río de Oro: Cuya corriente principal está conformada por la unión de los ríos de Oro y del Hato y las poblaciones aledañas a la misma son Piedecuesta, Girón y Bucaramanga.
- Subcuenca del río Frio: Cuya corriente principal está conformada por el río Frio y las poblaciones aledañas a la misma son los municipios de Girón Y Floridablanca.
- Subcuenca del río Tona: Cuya corriente principal está conformada por el río Tona y las poblaciones aledañas a las mismas son los municipios de Tona y Bucaramanga.
- Subcuenca del río Surata: Cuya corriente principal está conformada por la unión de los ríos Surata, Vetas y Charta y las poblaciones aledañas a la misma son los municipios de Surata, Matanza, Charta, y Bucaramanga.

### 1.4 GEOMORFOLOGÍA

Desde el punto de vista fisiográfico, la cuenca superior del río Lebrija cuenta con dos sectores; son a saberse, el sector Oriental, que presenta un relieve montañoso y pronunciado, y el sector Occidental cuyo relieve es un poco más suave y constituido por deformaciones denominadas “mesas”; estos sectores están separados por la falla de Bucaramanga, la cual recorre zonas de los cascos urbanos de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Piedecuesta.

El sistema geológico de la cuenca está caracterizado por la presencia de material de la era precámbrica correspondiente a rocas metamórficas e ígneas del macizo

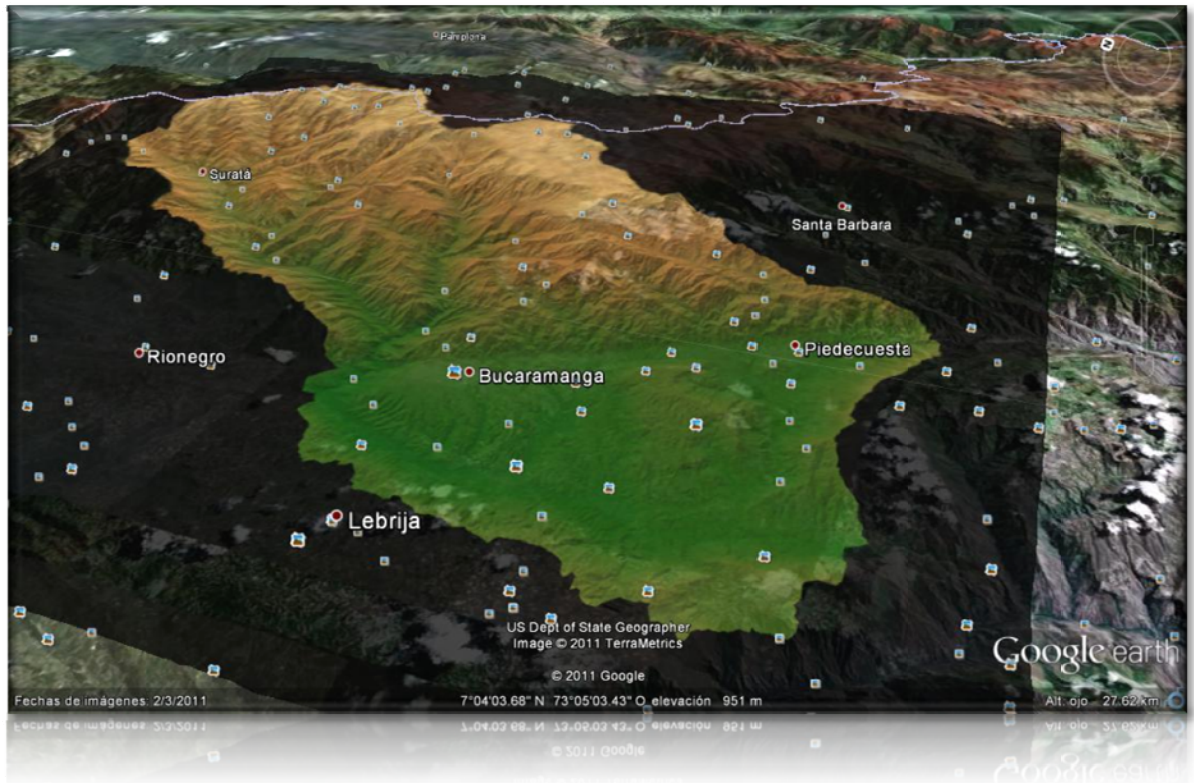
de Santander; además se destacan las rocas mesozoicas y depósitos cuaternarios. Las rocas ígneas y metamórficas del macizo, debido a sus elevadas condiciones de fracturamiento, diaclasamiento y meteorización presentan permeabilidad secundaria; rasgo hidrogeológico determinante dada la capacidad de captación y conducción el agua desde la zona de recarga. (*Hermelin, 1976*)

La principal característica estructural de la cuenca se la da la falla de Bucaramanga, la cual es inversa y de rumbo sinextral y cuya característica geotectónica más destacada es la posición de las rocas del macizo sobre un depósito cuaternario como consecuencia de una corriente sub-paralela y ramificada (*Beltrán R y Rey A. 2002*).

## **1.5 CLIMA**

En el aspecto climático la cuenca superior de Lebrija presenta un ciclo anual de tendencia bimodal, en el que acontecen dos épocas de lluvia; la primera ocurre en los meses de Marzo, Abril y Mayo y la segunda en los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre; la temperatura estimada oscila en un rango comprendió entre 0° C y 35° C; con una humedad relativa media multianual del 81 %. El brillo solar anual oscila entre 1.472 y 1.913 horas/sol. La evaporación media multianual varía entre 700 y 1.500 mm/año.

**Figura 1. Localización en Santander de la cuenca superior del Río Lebrija**



**Google Earth**

## **2. METODOLOGIA PROPUESTA**

### **2.2 ANTECEDENTES**

Colombia es un país rico en el aspecto hídrico; pero a pesar de esto, en la actualidad, se ha generado una preocupación nacional y global relacionada con la preservación, protección y el uso del agua; esta preocupación se ha ido acrecentando debido al inminente cambio climático y a la desmedida contaminación de los ríos y mares; adicionalmente, los procesos de urbanización acelerada que se vienen desarrollando en las grandes ciudades; a pesar de ofrecer enormes oportunidades para el desarrollo socioeconómico, inciden negativamente sobre la permanencia del recurso, al aumentar el uso irresponsable y desmedido del mismo, generando problemáticas ambientales que afectan el ciclo hidrológico, desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo.

Para generar estrategias que nos permitan el buen uso del agua se hace necesario conocer a fondo la disponibilidad de este recurso y las zonas donde se presenta o puede llegar a presentarse un déficit de la oferta hídrica; consideramos entonces, que comprender la composición hidroclimática y geográfica de las diferentes cuencas nos permitiría obtener beneficios y aplicaciones del recurso; así como proponer e implementar estrategias de uso adecuado del mismo.

En la actualidad se han desarrollado sistemas de información geográfica SIG enfocados en el apoyo a la gestión y manejo de los recursos hídricos; entre tantos, el HidroSIG4.0 (UNALMED-UPME, 2000); desarrollado por el posgrado en aprovechamiento de los recursos hidráulicos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; el cual permite un despliegue interactivo de los componentes hidrológicos y climáticos de Colombia; con aplicaciones en balances hidrológicos a escala nacional.

El software HidroSIG 4.0 es un sistema de información geográfica desarrollado con la intención de servir de soporte para el manejo del recurso hídrico, facilitando la gestión del mismo; por esa razón HidroSIG 4.0 se ha posicionado como herramienta de gran utilidad para las entidades encargadas de la gestión del recurso hídrico a nivel local (corporaciones departamentales, entre otras); ya que permite el almacenamiento y el análisis de la información distribuida en la cuenca de interés o estudio.

La implementación de este desarrollo sobre una cuenca específica en Santander podría motivar a las corporaciones encargadas de la gestión del recurso hídrico en esta zona a implementar herramientas como esta para la gestión y aprovechamiento adecuado del recurso; cabe anotar que este sistema es gratuito y de código abierto lo que permitiría adaptaciones a condiciones especiales de estudio; HidroSIG 4.0 puede ser descargado de la página de la Universidad Nacional de Medellín junto con sus tutoriales y ejemplos de manejo.

### **2.3 IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA**

Como se mencionó anteriormente HidroSIG 4.0 es una herramienta específica aplicable a la hidrología que nos permite manejar gran cantidad de información, permitiendo obtener y almacenar resultados rápidos para la toma de decisiones en la implementación de estrategias para el uso del recurso hídrico por parte de los entes encargados.

Para garantizar la calidad del resultado, se debe contar con información geo referenciada, que permita conocer la trayectoria, la cantidad y la calidad del recurso sobre la zona de estudio; por medio de la recopilación de información de las variables que permitan reconocer las diferentes problemáticas que se pueden presentar en la zona de estudio.

Para el desarrollo de este proyecto solo se tendrá en cuenta el recurso de agua superficial; no se tendrá en cuenta entonces, la disponibilidad de aguas subterráneas.

La implementación de la metodología cuenta con la revisión bibliográfica de los temas de estudio, la recopilación de información existente sobre la cuenca superior del río Lebrija (Universidad Industrial De Santander), la implementación de los datos en el formato requerido por el software, y la aplicación del software para la estimación de caudales extremos, así como la determinación de la disponibilidad hídrica en una cuenca hidrológica.

### **2.3.1 Revisión bibliográfica de todos los temas de estudio.**

En esta etapa se busca información de estudios enfocados en los aspectos y características hidrológicas necesarias para la estimación de balances hídricos, ya sea sobre la zona de estudio o sobre Colombia, que nos permita apoyar la información a recopilar y los resultados del presente proyecto.

### **2.3.2 Recopilación de información existente.**

En esta etapa se busca la información puntual o espacial que nos permita estimar el balance hídrico de la zona de estudio con la aplicación del software, esta información, debe permitir conocer las variables hidrológicas características de la cuenca, y debe estar geo-referenciada para validar la calidad de los resultados a la hora de la aplicación.

La información será recopilada de bases de datos existentes y podrá provenir de otros sistemas de medición.

### **2.3.3 Implementación de los datos en el formato requerido por el software.**

En esta etapa se organiza la información recopilada, con el fin de implementar los datos en el formato requerido por el HydroSig 4.0, para construir una base de datos que posibilite el proceso de aplicación para la estimación de caudales extremos y la determinación de la disponibilidad hídrica en una cuenca específica.

### **2.3.4. Evaluación de condiciones topográficas de la zona.**

En esta etapa se describe en primera instancia el modelo digital del terreno (MDT) y sus características y por último se efectúa una aplicación sobre la zona de estudio extrayendo del MDT las características geomorfológicas y la red de drenaje; esta última es de gran utilidad en el desarrollo de este proyecto.

### **2.3.5. Evaluación de las condiciones climáticas de la zona.**

En esta etapa se realiza la estimación de las variables macro-climáticas (Temperatura, punto o niveles de rocío y humedad relativa); seguidamente se explica y se interpreta la información en los aspectos relacionados con la construcción del mapa de precipitación a partir de los datos puntuales de registros de las diferentes estaciones y se estiman los valores de evapotranspiración para la zona de estudio aplicando diferentes metodologías

### **2.3.6 Resultados obtenidos a partir de la aplicación del software.**

En esta etapa se aplica el sistema HydroSig 4.0, sobre la cuenca superior del río Lebrija, usando la información que anteriormente fue organizada en los formatos necesarios, estimando de esta manera los resultados para caudales medios y caudales extremos.

### 3. PROCESAMIENTO DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO

#### 3.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

Aquellos mapas cuya variable raster es la elevación sobre el nivel del mar, reciben el nombre de Modelos Digitales de Terreno (MDT); este nos permite comprender y determinar los atributos topográficos de una zona facilitando su visualización e interpretación.

La topografía de una zona tiene gran influencia en los procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos que se presentan en esta; ya que las topografías planas o llanas permiten o favorecen la acumulación de agua y las escarpadas la infiltración de la misma dependiendo de la cobertura de la escorrentía.

A partir del modelo digital del terreno se puede extraer información de cuencas, redes de drenaje y parámetros geomorfológicos asociados a la zona.

A continuación se nombran algunos de los datos o atributos que se pueden obtener del MDT, que pueden servir de apoyo para los procesos hidrológicos Moore et al. (1991) y en UNAL-UPME (2000). Los mencionados, se relacionan a continuación:

- Latitud: Esta información o atributo tiene gran incidencia en la temperatura, la vegetación y la fauna de un terreno.
- Pendiente: Representa el grado del cambio de elevación del terreno en relación con la distancia, y está asociada a la velocidad de flujo superficial y sub-superficial y al umbral de escorrentía; definiendo el tiempo de concentración de la cuenca.
- Dirección de drenaje: Es el indicador de la dirección del flujo de agua; se considera que la dirección del flujo en una superficie, es para cada celda aquella

en la que se presenta la máxima pendiente descendente en su entorno; dando como resultado un matriz de dirección de flujo.

- Área drenante: Este atributo es el indicador del volumen de escorrentía y del tiempo de concentración en la cuenca.
- Corriente principal: Es la máxima longitud recorrida en la cuenca; la pendiente de esta, define la reacción hidrológica de la cuenca frente a una tormenta; además incide en el tiempo de concentración de la cuenca.
- Longitud aguas arriba: Es la longitud media de la trayectoria de drenajes de la cuenca a un punto de la misma.
- Orden de la cuenca: Una corriente de una sola ramificación es una cuenca de primer orden, dos corrientes de primer orden conforman una corriente de segundo orden, y así para las siguientes ramificaciones, entre mayor sea el grado de bifurcación, mayor será la velocidad de respuesta de la cuenca.
- Magnitud de la cuenca: Se define por el número de nacimientos o canales de primer orden en la cuenca.

### **3.2 APLICACIÓN SOBRE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA**

La información de apoyo para la construcción de un modelo digital de terreno (MDT) incide directamente en la calidad del mismo; no solo en la exactitud vertical, sino también en el posicionamiento horizontal.

La elaboración del MDE para la CSRL está constituido por el producto del procesamiento y la interrelación de información obtenida a partir de imágenes de radar de la SRTM, (Deimer Ariel Pérez Solano, 2010)

Partiendo de esta información se realizan los ajustes de referencia espacial de área y de celdas, sometiéndolos a procesos de georeferenciación, desarrollo de cortes o secciones, espacialización, formateado entre otros pasos de geo-

procesamiento con el fin de obtener un MDE limpio en la resolución deseada y alojado en un formato que permita la integración del modelo a una base de datos SIG, (Deimer Ariel Pérez Solano, 2010)

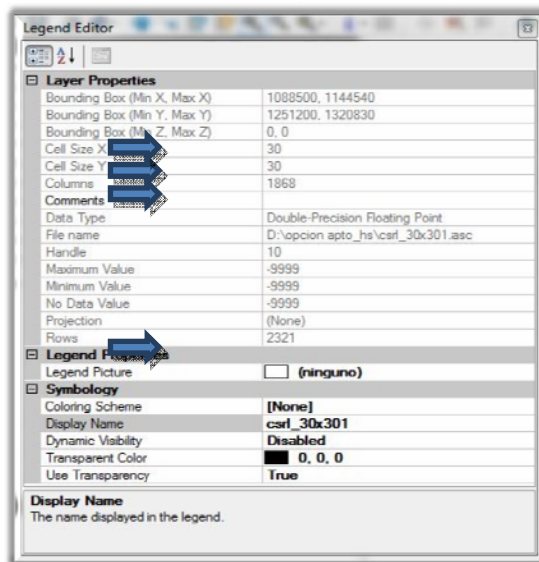
### **3.2.1 Reconocimiento de modelo digital del terreno.**

Una aplicación con la que cuenta HidroSIG 4.0, gracias a su repotenciación de MapWindowes la de discretizar la zonas con pixeles de un tamaño determinado necesarios para obtener datos acertados en la elaboración de mapas de direcciones de drenaje, proveyendo mayor exactitud en la delineación de los cauces.

### **3.2.2 Procesamiento de modelo digital.**

El modelo digital de la cuenca superior del río Lebrija se encuentra en formato ASCII, un archivo que permite la relación con la interfaz de HidroSIG 4.0; tal como se muestra en la figura 2, en la que se ve el número de celdas en la que se encuentra, número de filas y columnas; pues como mencionamos arriba, es de gran importancia comprender cómo está constituido este tipo de archivo para evitar inconvenientes con operaciones a futuro.

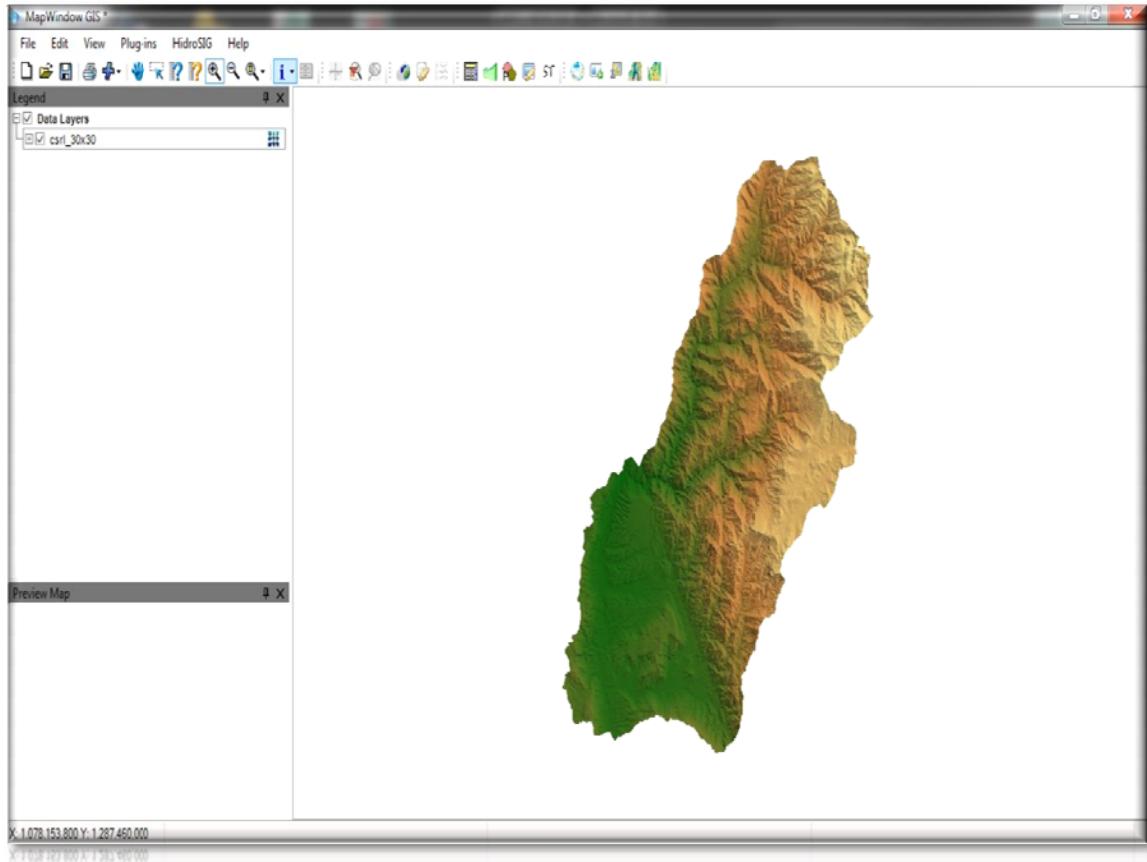
**Figura 2. Propiedades de archivos ASCII desde HidroSIG 4.0**



### **HidroSIG 4.0**

El ingreso del archivo se realiza desde el comando adherir y remover layers, Se da la ubicación del archivo y automáticamente se carga en la plataforma de HidroSIG 4.0. como se muestra en la figura 3 donde se encuentra el raster csr1\_30x30 (cuena superior del rio Lebrija).

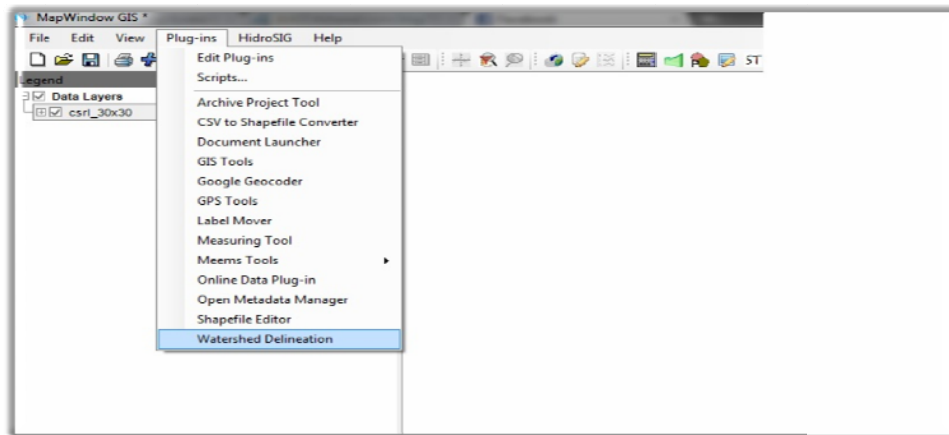
**Figura 3. Cuenca Superior del Rio Lebrija**



### **HidroSIG 4.0**

Con el MDT incluido en la plataforma, se procede a la extracción de información, mediante la activación de Plug-ins *WatershedDelineation*, figura 4 con la que acciona una nueva barra de herramientas para el procesamiento de la información.

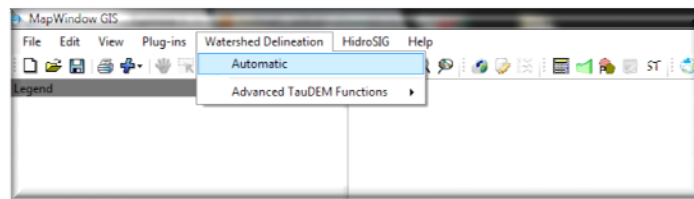
**Figura4 Plug-ins *Watershed Delineation***



**HidroSIG 4.0**

Una vez lista a la aplicación se ingresa el mapa raster en opción *WatershedDelineation–Automatic*

**Figura 5. Plug-ins *WatershedDelineation***

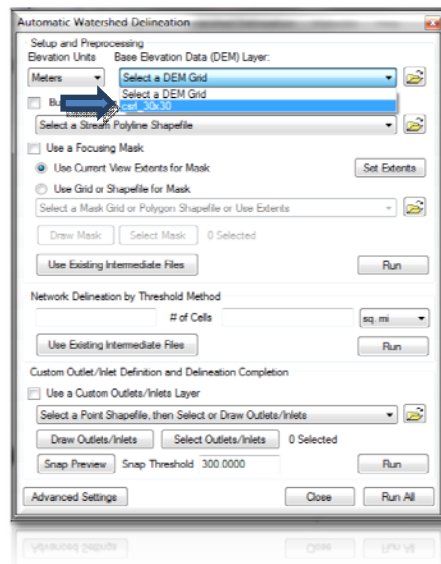


**HidroSIG 4.0**

En general todos los MDT tienen limitaciones con respecto a los análisis hidrológicos y geomorfológicos que se pueden realizar sobre ellos. Estas limitaciones pueden estar atribuidas a varias fuentes, tales como fallas en la toma de datos, cantidad y calidad de la información utilizada, métodos de interpolación, resolución de la celda, y la presencia de fronteras. Una manera de tener en cuenta estos problemas es especificando la ubicación y el tamaño mínimo de las celdas

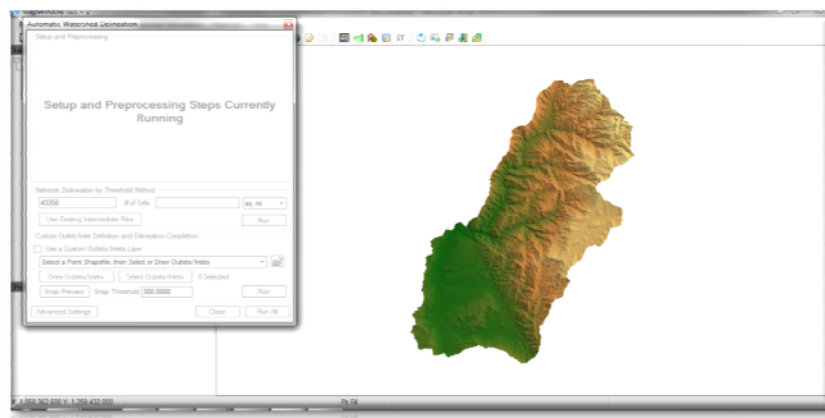
de cada MDT, para las cuales se representa de manera aceptable las características geomorfológicas reales.

**Figura 6. Procesamiento del modelo digital del terreno a través de MapWidow**



**HidroSIG 4.0**

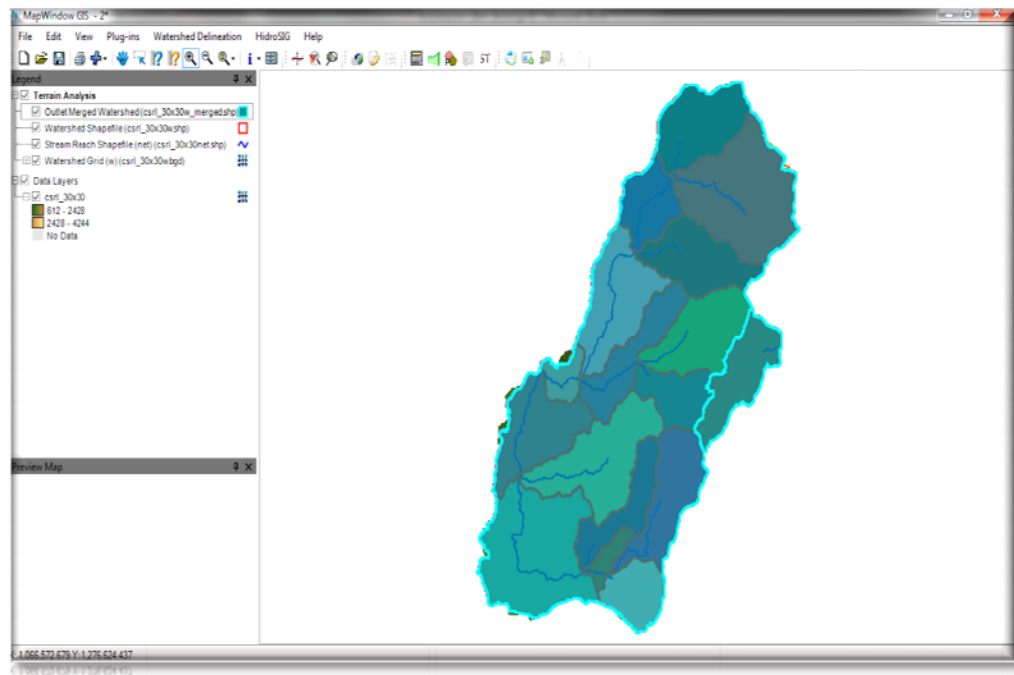
**Figura 7. Cuadro de dialogo de progreso de la información procesada.**



**HidroSIG 4.0**

Una vez finalizado el procesamiento de la información del modelo digital de terreno, aparecerán una serie de nuevas capas como se ve en la figura 8; las cuales no indican los nuevos mapas que se han generado.

**Figura 8. Información entregada mediante el procesamiento de MDT**



**HidroSIG 4.0**

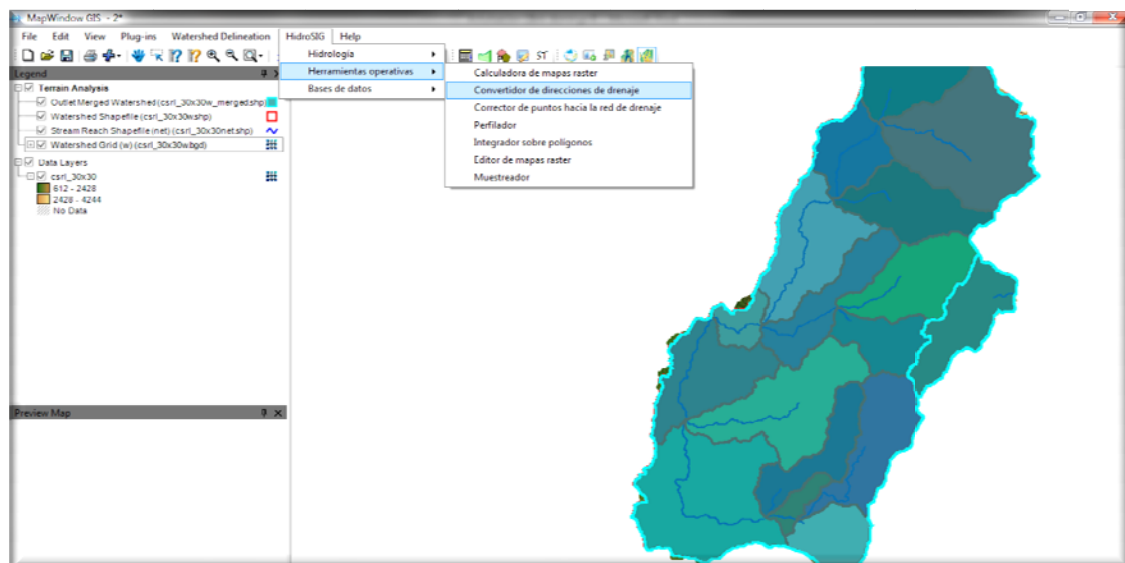
Mediante el mapa de modelo digital y a través de HydroSIG basado en algoritmos incorporados en el módulo de procesamiento de datos se logró importar los siguientes mapas.

**Figura 9. Cuadro de convenciones del procesamiento de MDT a través de HidroSIG**

<i>Mapa resultante</i>	<i>Significado</i>
<i>Csrl_30x30ad8.bgd</i>	<i>Celdas acumuladas</i>
<i>Csrl_30x30fel.bgd</i>	<i>MDE incisado o "corregido"</i>
<i>Csrl_30x30gord.bgd - Csrl_30x30ord.bgd</i>	<i>Órdenes de Horton</i>
<i>Csrl_30x30p.bgd</i>	<i>Direcciones de flujo</i>
<i>Csrl_30x30plen.bgd</i>	<i>Longitud de canal principal</i>
<i>Csrl_30x30sd8.bgd</i>	<i>Pendientes</i>
<i>Csrl_30x30tlen.bgd</i>	<i>Longitud total de canales</i>
<i>Csrl_30x30src.bgd</i>	<i>Red de drenaje formato raster</i>

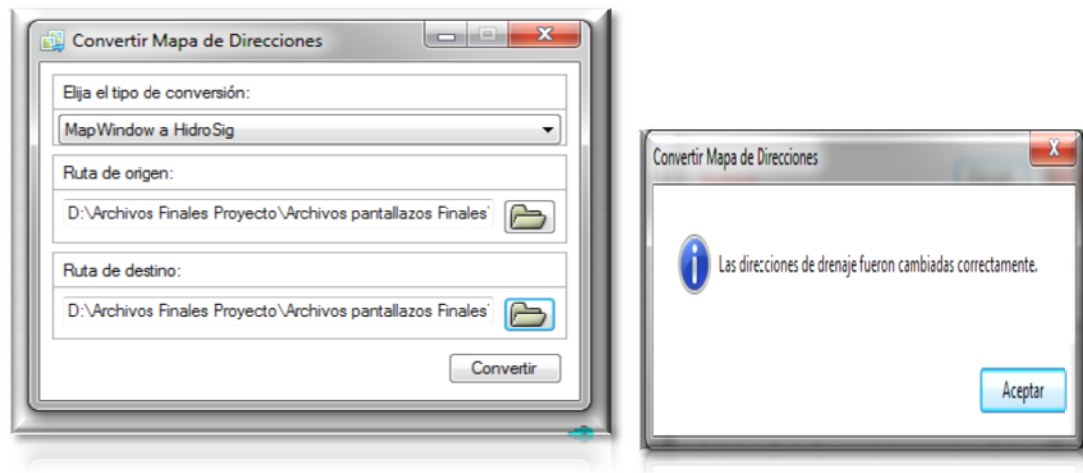
Después de obtener los archivos con MapWindows se procede a convertir el mapa raster de direcciones de drenaje (*Csrl\_30x30p.dbg*), en un archivo de HidroSIG 4.0 accediendo al menú herramientas operativas como se muestra en la figura 10.

**Figura 10. Acceso al convertidor de direcciones de drenaje.**



**HidroSIG 4.0**

**Figura 11. Convertidor de Mapa de Direcciones a formato HidroSIG**

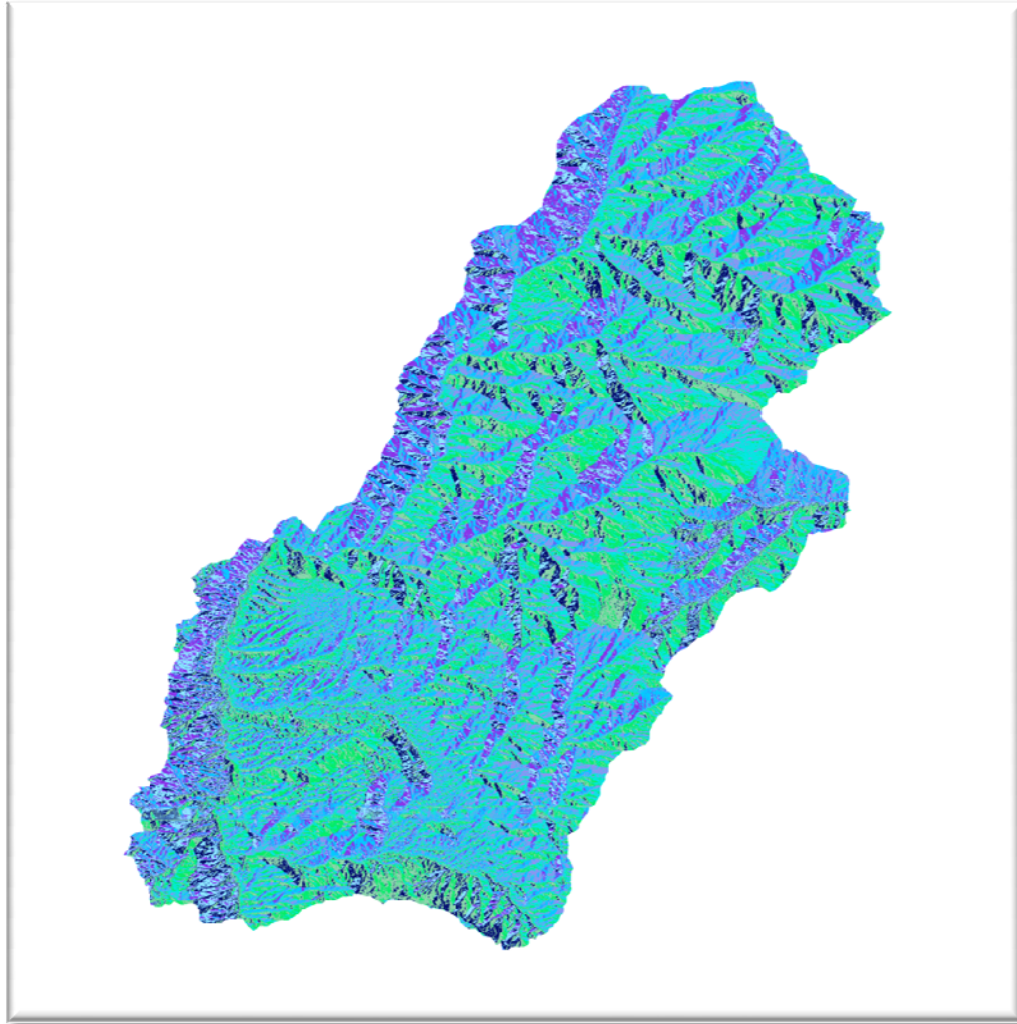


### **HidroSIG 4.0**

- Ruta de origen: Ingreso de archivo con extensión *p.dbg*, cabe aclarar que estos archivos quedaran almacenados en la misma carpeta donde se extrajo el mapa del modelo digital del terreno.
- Ruta de destino: Ubicación de la carpeta donde se va a guardar o a archivar el mapa después de realizada la conversión.

Para la importación del archivo de direcciones de drenaje en el formato de HidroSIG 4.0, se realiza la misma operación, tal y como se explicó en lo referente al mapa del modelo del terreno digital.

**Figura 12. Mapa raster de dirección de drenaje de la Cuenca Superior del Rio Lebrija.**



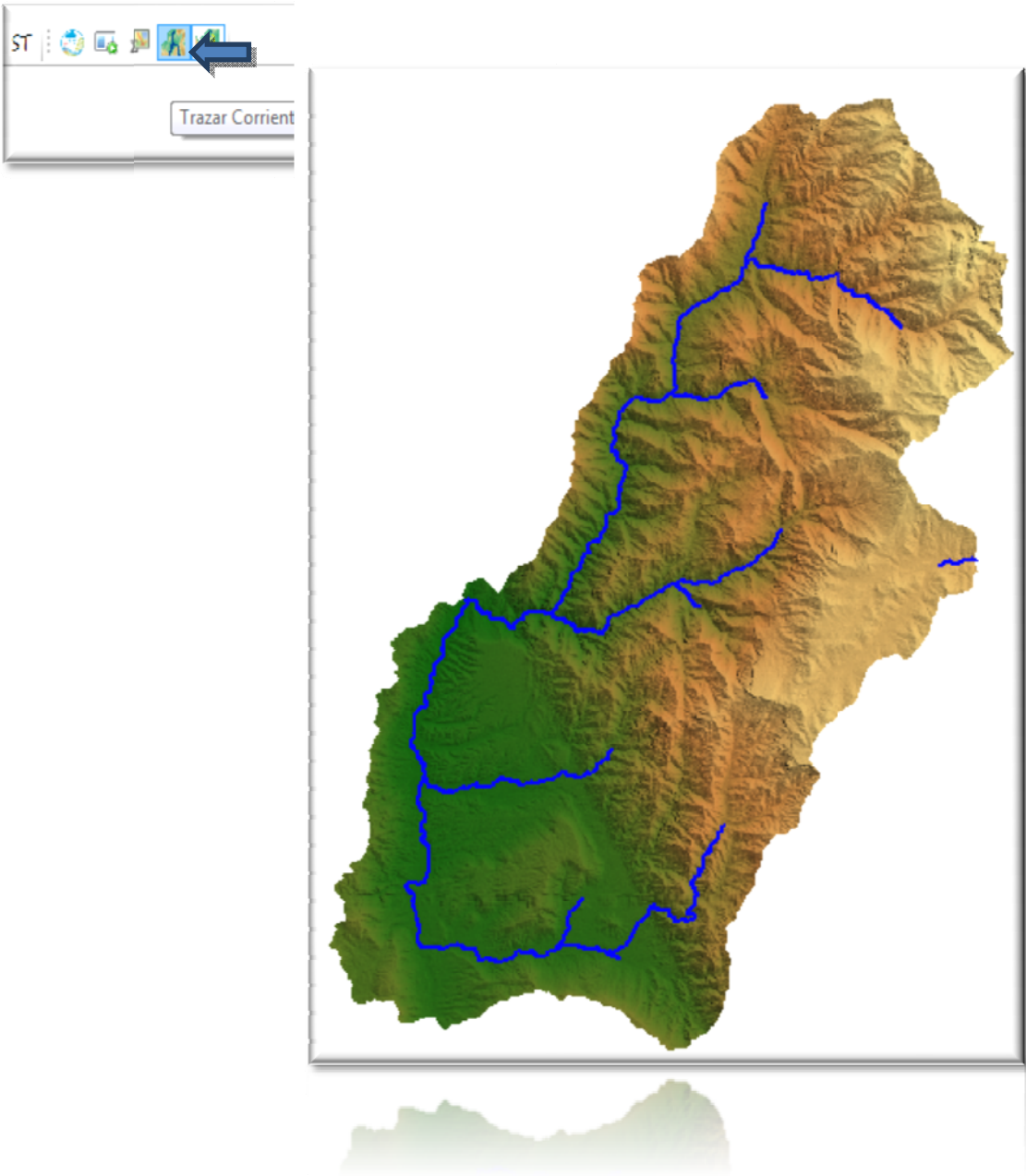
**HidroSIG 4.0**

### **3.2.3 Delimitación de las corrientes y área de la cuenca.**

Después de procesar la información del modelo digital del terreno (MDT); HidroSig 4.0 nos permitira definir corrientes y áreas de la cuenca, esto se logra mediante la

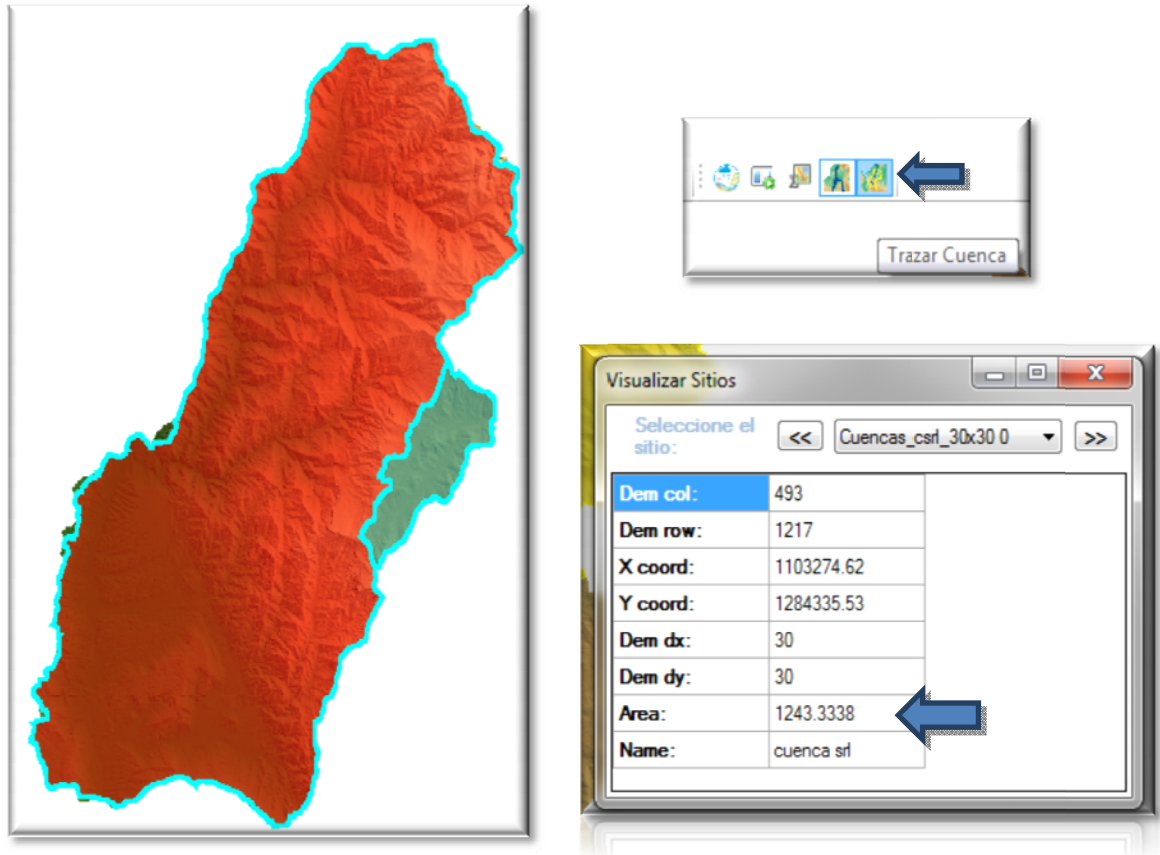
opción que se presenta en las figuras 13 y 14, teniendo en cuenta, que para poder generarlas previamente se debe cargar el mapa de direcciones.

**Figura 13. Corrientes de la Cuenca Superior del Rio Lebrija**



**HidroSIG 4.0**

Figura 14. Delimitación de la cuenca superior del rio Lebrija



HidroSIG 4.0

## **4. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La diversidad del clima en Colombia se encuentra altamente influenciada por fenómenos locales y macroclimáticos en diferentes escalas temporales; aunado a lo anterior, las condiciones orográficas de cada sector inciden en la variabilidad o diferencia del clima en diferentes zonas del país.

A escala global, fenómenos como el chorro del Chocó (chorro superficial del este de Colombia), los complejos convectivos de mesoescala (CCM), las ondas tropicales del Este, la oscilación de Madden – Julian (MJO), la migración meridional de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y el fenómeno ENSO en sus dos fases cálida (El Niño) y fría (La Niña), son a la vez, tanto generadores, como moduladores de algunas de las características particulares de nuestra hidroclimatología. (Poveda, G, La hidroclimatología en Colombia).

El clima de manera local está determinado por la ubicación y la fisiografía del terreno, lo que incluyen la cordilleras y las montañas del sector; además de esto, Colombia recibe la influencia de la circulación atmosférica del océano Pacífico y el océano Atlántico; condición que le aporta niveles elevados de humedad.

### **4.1 ESTIMACIÓN DE VARIABLES MACROCLIMÁTICAS**

#### **4.1.1 Temperatura.**

Colombia es un país que se encuentra ubicado en una zona tropical; donde deberías sucederse altas temperaturas durante todo el año; no obstante, debido a la interacción con factores como las cordilleras y las formaciones montañosas, y de acuerdo con la altura, varían sustancialmente de un punto a otro.

Esta variable es de gran importancia para el análisis meteorológico, ya que a partir de esta, se determinan otros factores como el viento, la altura, la vegetación, y el uso del suelo entre otras; además, la temperatura media se podría decir, es el factor más importante para la determinación de la evapotranspiración.

De acuerdo con esto, el método de regionalización propuesto por CENICAFÉ (Chávez y Jaramillo, 1996), es una manera óptima de estimar la temperatura en cualquier lugar del país; este método, propone la relación lineal entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar.

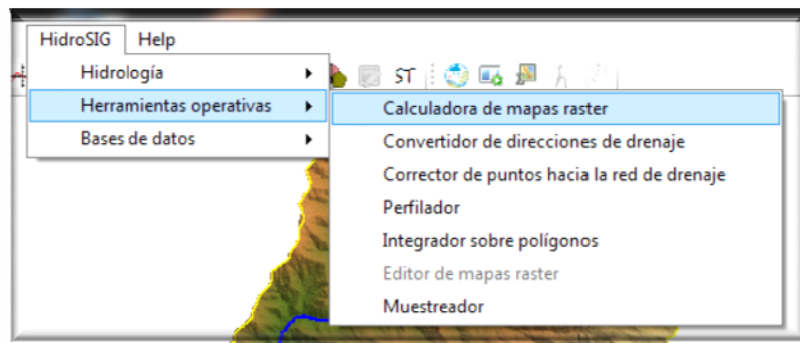
Para la región Andina CENICAFÉ obtuvo la siguiente expresión a partir del registro de 626 estaciones climatológicas (Chavez y Jaramillo, 1998).

(1)

Donde  $T$  es la temperatura media anual [°C] y  $H$  es la altura sobre el nivel del mar [m].

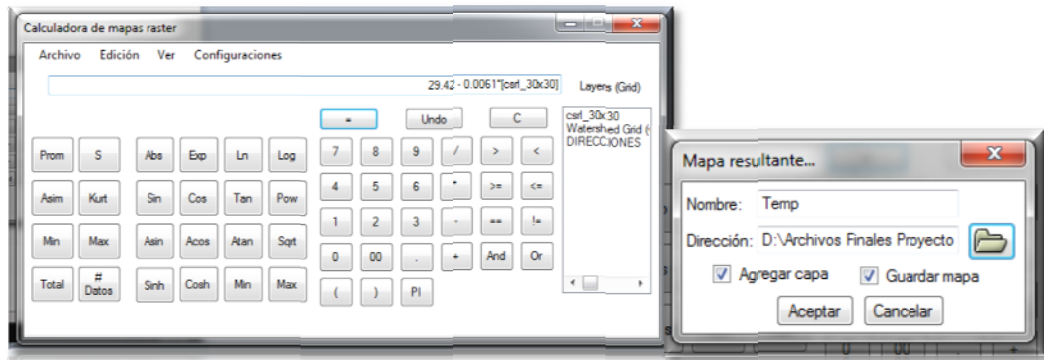
A partir de la expresión propuesta, se utilizan las herramientas del software y se realiza la operación desde la calculadora de mapas raster donde H es el mapa digital del terreno (MDT) de la cuenca superior del río Lebrija.

**Figura 15. Herramienta operativa HidroSIG 4.**



**HidroSIG 4.0**

**Figura 16. Calculadora de mapas Raster**



**HidroSIG 4.0**

**Figura 16. Mapa de la Temperatura Media, aplicando la expresión para la región andina de CENICAFE**



**HidroSIG 4.0**

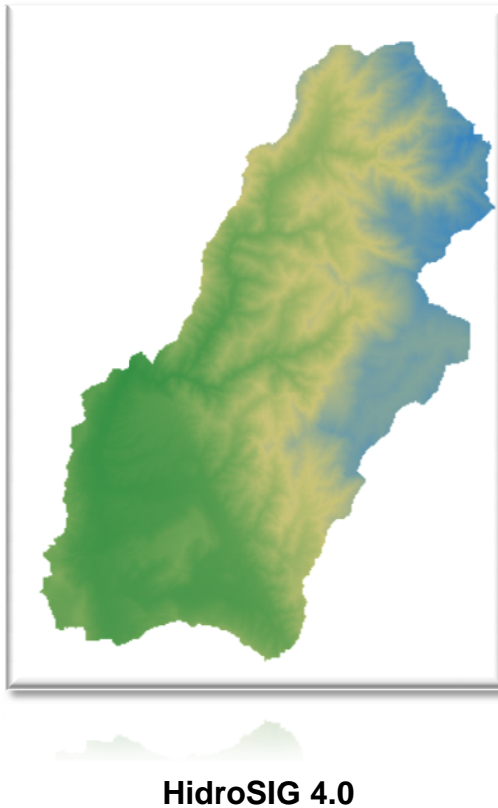
En el mapa de temperatura, se puede observar con claridad la relación que existe entre esta variable y la altura sobre el nivel del mar, generando como resultado la condición de que los valores bajos de temperatura se presentan en la zonas más altas de la cuenca; Además, se estimó una temperatura promedio de la cuenca en un valor de 17, 631 [°C].

#### **4.1.2 Punto de rocío.**

El Punto de rocío es la temperatura a la cual el aire debe ser enfriado para que ocurra la saturación, siempre y cuando se mantenga la cantidad de agua existente; evaluar esta variable de manera espacial no es nada fácil ya que no se cuenta con información exacta o directa de esta; por tal razón, para nuestro caso se procedió por medio de un estimativo a partir de la expresión obtenida por UNAL - Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua (2001, p.2-30) donde se considera una relación lineal entre la temperatura de punto de rocío y la altura sobre el nivel del mar.

$$T_d = 24.2468 - 0.005286Hr^2 = 0.9678 \quad (2)$$

**Figura17. Mapa de la Temperatura Punto de Rocío**



Como se esperaba el mapa de temperatura en el punto de rocío, maneja las mismas características del mapa de temperatura media; así entonces, la temperatura decrece a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, de lo que se obtuvo una temperatura de rocío media anual de 13.10 °C.

#### **4.1.3 Humedad Relativa.**

La humedad relativa es la proporción de vapor de agua real en el aire, comparada con la cantidad de vapor de agua necesaria para la saturación a la temperatura correspondiente; esta variable viene expresada en porcentajes y puede variar del 0 al 100%; donde cero corresponde al aire seco y 100% al aire saturado.

$$H_R = \frac{e}{e_s} \quad (3)$$

Ambas presiones de vapor pueden obtenerse empleando la ecuación de Clausius-Clapeyron, la cual puede aproximarse en el intervalo de nuestras temperaturas mediante las siguientes expresiones:

$$e = 6.11 \exp \frac{12.27T_d}{237.3+T_d} \quad (4)$$

$$e_s = 6.11 \exp \frac{12.27T}{237.3+T} \quad (5)$$

Donde,  $e$  y  $e_s$  están dadas en hPa y  $T$  y  $T_d$  están dadas en °C, (Raudkivi, 1979), debido a que la temperatura de rocío nunca es mayor que la temperatura superficial; el mayor valor que puede obtenerse para la humedad relativa es del 100%; así entonces, para la cuenca superior del río Lebrija, se estimó dicho valor en 75%, obteniéndose como resultado una cuenca húmeda.

**Figura 18. Mapa del cálculo de la humedad relativa con la ecuación de ClausiusClapeyron.**



**HidroSIG 4.0**

## **4.2 PRECIPITACIÓN**

Para calcular los mapas de precipitación se partió de información puntual y datos de 25 estaciones que se encuentran dentro de la cuenca superior del río Lebrija relacionadas a continuación:

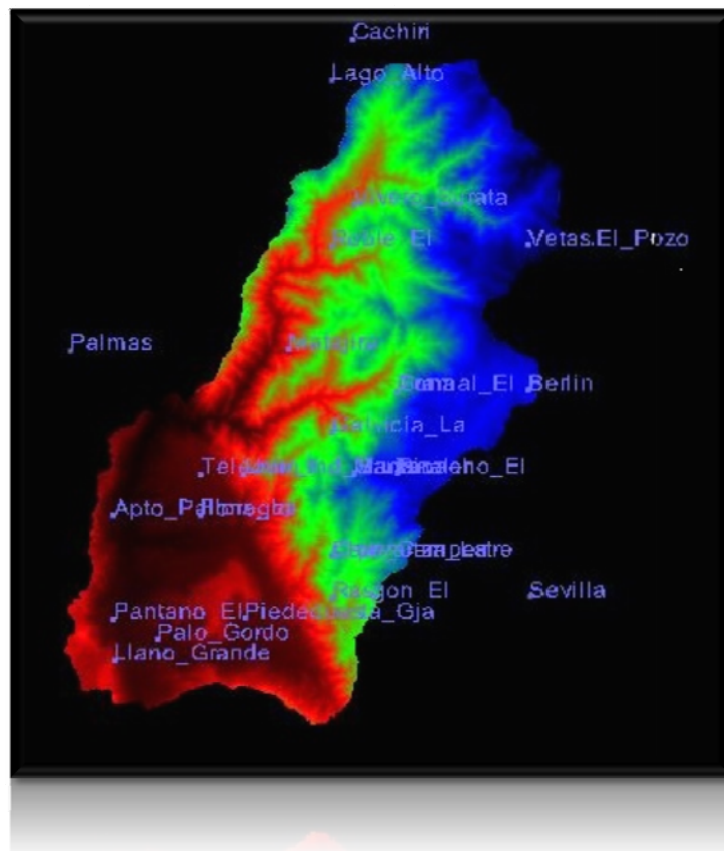
**Tabla 1. Estaciones con registro de Precipitación en la Cuenca Superior del Rio Lebrija**

No.	ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	PRECIPITACION PROMEDIO MULTIANUAL	AÑOS DE REGISTRO
1	UIS	-73,117222	7,134472	1018	109,49	1975-2002
2	PALOGORDO	-73,150000	6,966667	950	81,01	1975-2002
3	APTOPALONEGRO	-73,183453	7,117147	1189	99,79	1975-2002
4	LLANOGRANDE	-73,166722	7,017556	777	80,97	1975-2002
5	GRANJAPIEDECUESTA	-73,066778	6,984333	1000	121,62	1975-2002
6	BERLIN	-72,866861	7,183694	3215	57,28	1972-2003
7	CACHIRI	-72,984111	7,467389	1850	84,49	1972-2002
8	PICACHO	-72,951639	7,101000	3310	139,69	1972-2003
9	LAGALVICIA	-73,050722	7,117444	1779	157,17	1972-2003
10	PALMAS	-73,216789	7,201108	855	123,18	1972-2003
11	VIVEROSURATA	-72,983750	7,351583	1725	89,09	1972-2003
12	MATAJAIRA	-73,051472	7,201333	996	80,93	1972-2003
13	CLUBCAMPESTRE	-73,033333	7,050000	940	96,58	1983-2001
14	ELGRAMAL	-72,966667	7,200000	2350	76,58	1986-2000
15	ELRASGON	-73,016667	7,016667	1950	101,47	1986-2000
16	ELROBLE	-73,016667	7,300000	2200	127,42	1982-1992
17	LAESPERANZA	-73,033333	7,066667	1020	121,31	1979-2001
18	LAFLORA	-73,116667	7,083333	1100	90,87	1972-1990
19	LAGOALTO	-73,016667	7,450000	2700	136,70	1981-1992

<b>20</b>	<b>SEVILLA</b>	-72,883333	7,016667	1900	93,25	1981-1992
<b>21</b>	<b>TELECOM</b>	-73,133333	7,133333	950	83,57	1972-2001
<b>22</b>	<b>ELPANTANO</b>	-73,218028	6,984750	1280	78,49	1967-1991
<b>23</b>	<b>ELPICACHO</b>	-72,951639	7,101000	3310	141,92	1967-1991
<b>24</b>	<b>TONA</b>	-72,967056	7,184611	1910	104,49	1958-2001
<b>25</b>	<b>VETASELPOZ</b>	-72,867833	7,300889	3220	77,24	1971-2001

Debido a las grandes variaciones que presentan los periodos de registro con información de precipitación; para realizar este estudio se seleccionó un periodo de registro homogéneo.

**Figura 19. Localización de las estaciones en la Cuenca Superior del Rio Lebrija.**



**HidroSIG 4.0**

Ahora bien, para realizar el mapa de precipitación, se utilizó la técnica de interpolación IDW, con el software ArcGIS, haciendo uso de la información relacionada anteriormente, debido a que varias de estas estaciones presentan falencias en sus registros se utilizó la información de estaciones de apoyo ubicadas fuera de la zona de estudio.

El método utilizado IDW, consiste en la interpolación mediante la distancia inversa determinando los valores de celdas a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.

El IDW está basado principalmente en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática. Con el parámetro potencia es posible controlar la significancia de puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida. Es un número real positivo y su valor predeterminado es 2.

Al definir un valor de potencia más alto, es posible enfatizar en los puntos más cercanos; por lo cual, los datos cercanos tendrán más influencia y la superficie más detalles (será menos suave). A medida que aumenta la potencia, los valores interpolados comienzan a acercarse al valor del punto de muestra más cercano. Al especificar un valor más bajo de potencia, los puntos circundantes adquirirán más influencia que los que están más lejos, lo que da como resultado una superficie más suave.

Debido a que la fórmula de IDW no está relacionada con ningún proceso físico real, no hay forma de determinar que un valor de potencia en particular es demasiado grande; como guía general, una potencia de 30 se considera extremadamente grande y su uso sería cuestionable. También es necesario considerar que si las distancias o el valor de potencia son grandes, los resultados pueden ser incorrectos.

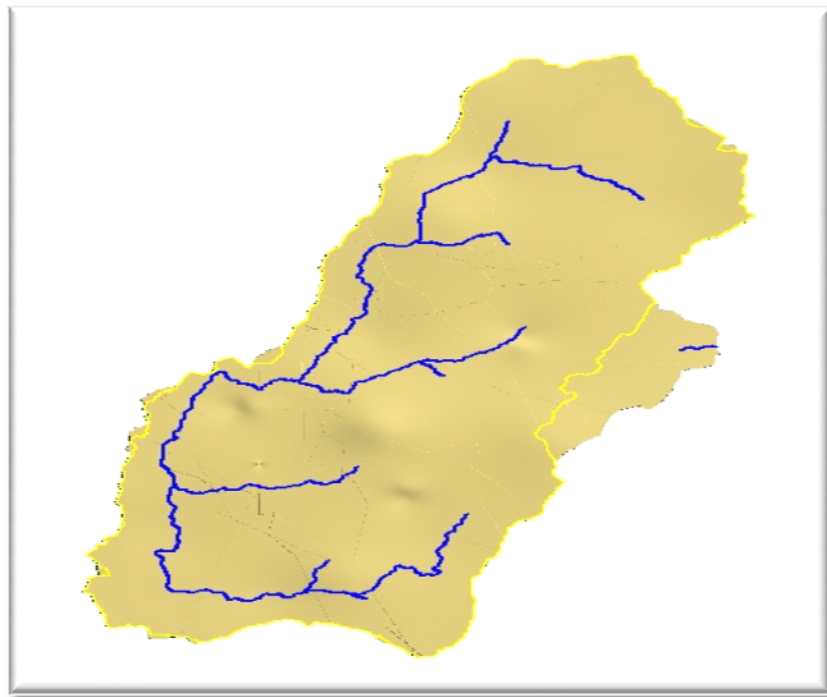
Podría decirse que el valor óptimo para la potencia se puede hallar en el lugar donde el error absoluto medio mínimo se encuentra en su punto más bajo.

**ArcGIS GeostatisticalAnalyst** proporciona una forma de aproximación a este valor óptimo.

Es necesario aclarar, que las estaciones utilizadas no se encuentran ubicadas de manera uniforme en la zona de estudio por lo que los mapas pueden presentar falencias de información en algunos puntos. (ArcGISResourcer Center).

A continuación se muestra el mapa de especialización de la precipitación total promedio multianual.

**Figura 20. Mapa de Precipitación Total promedio multianual de la Cuenca Superior del Rio Lebrija.**



**HidroSIG 4.0**

A partir del mapa raster se estimó un valor promedio para precipitación de 1215.449 mm/año; en el mapa se puede apreciar que hacia la parte Noreste de la

cuenca la precipitación presenta los registros más altos y los registros más bajos se presentan al Suroeste de la cuenca (parte baja de la cuenca).

### 4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es la pérdida de humedad en una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación; esta variable no cuenta con una medición directa, lo cual obliga a utilizar técnicas indirectas que relacionen diferentes variables meteorológicas.

Para la estimación de esta variable existen varios métodos de fácil aplicación que relacionan la física de la variable y requieren el conocimiento de variables con registros disponibles; para la estimación de la evapotranspiración en la cuenca superior del río Lebrija se utilizaron diferentes metodologías.

Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizaron varios métodos ya que no se puede definir a ciencia cierta cuál de ellos es el más acertado.

#### 4.3.1 Métodos de estimación

##### Ecuación de Turc.

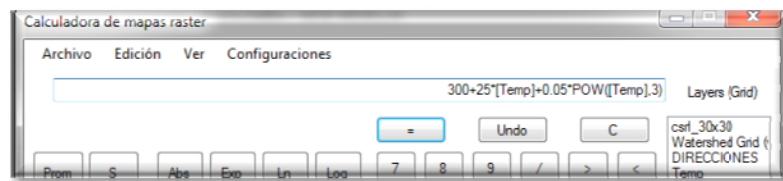
Esta ecuación estima la evapotranspiración real basándose en un balance de masas, en función de elementos meteorológicos simples como la temperatura y la precipitación de la cuenca, aplicadas a medidas de largo plazo. Turc en 1954, adaptó la familia de curvas de la forma  $ETR = f(P, T)$ ; a partir de observaciones hechas en 254 cuencas situadas en todos los climas de la tierra (Remenieras, 1974 y Brutsaert, 1982). Desde lo anterior obtuvo lo siguiente:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ para } \frac{P}{L} > 0.316 \quad (6)$$

$$ETR = P \text{ para } \frac{P}{L} < 0.316 \quad (7)$$

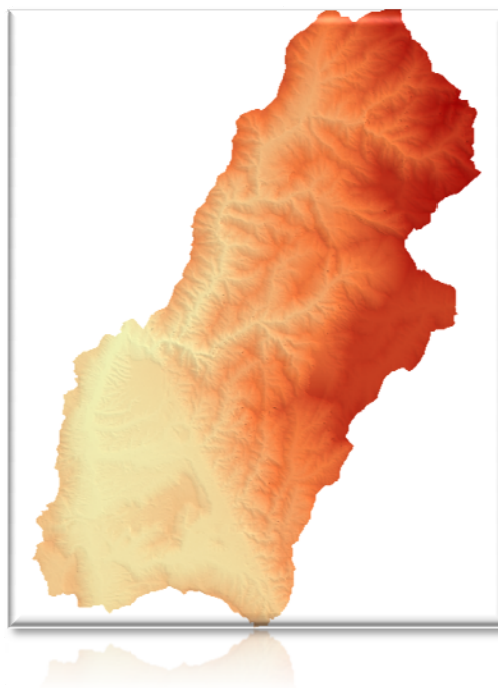
Donde ETR es la evapotranspiración real en mm/año; y P es la precipitación del año considerado en mm; T es la temperatura media anual en °C y  $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$ . Este último parámetro fue obtenido por medio de regresiones hechas en las 254 cuencas y corresponde a la evapotranspiración potencial, en mm/año. Se halla el mapa de L con la expresión descrita anteriormente y se determina la relación de Turc de P/L, tal y como se muestra a continuación,

**Figura 21. Cálculo de mapa L a través la calculadora de mapas raster de HydroSIG 4.0**

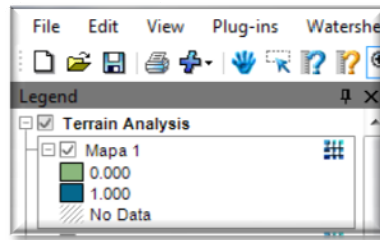


**HydroSIG 4.0**

**Figura 22. Mapa L calculado con la calculadora de mapas raster de HydroSIG 4.0**



**Figura 23. Comprobación de relación  $(P / L) > 0.316$ .**

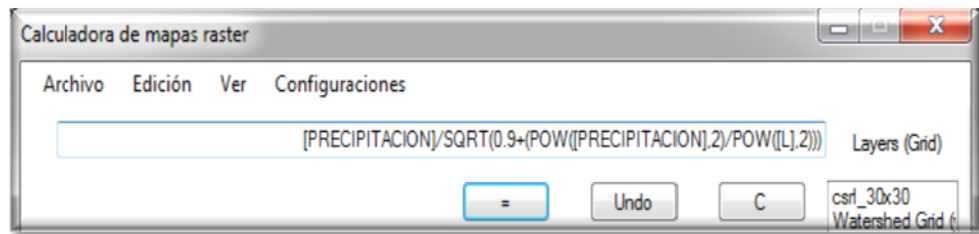


**HidroSIG 4.0**

En nuestro caso la relación es de 1, es mayor de 0,316 por tanto para el cálculo de la evapotranspiración se utiliza la ecuación 6, a partir de esta expresión y con ayuda de las herramientas operativas del HidroSIG 4 se halló el mapa de

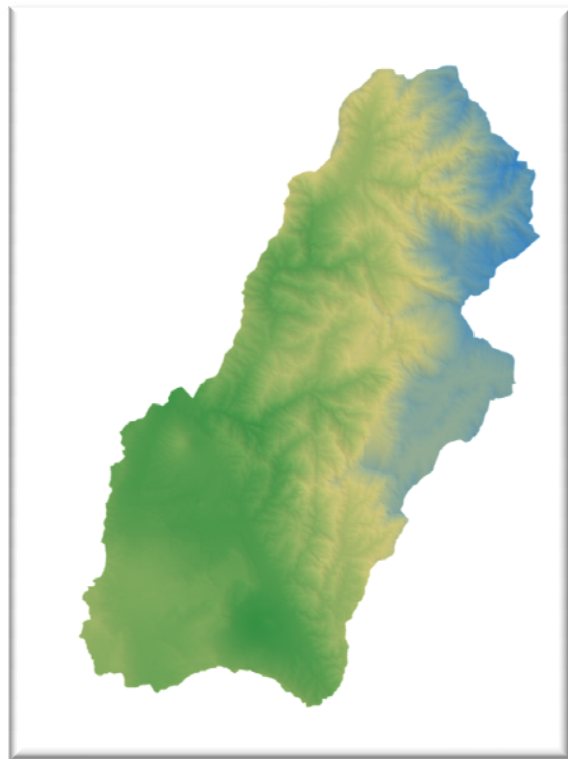
evapotranspiración sobre la zona de estudio, para esto se incluyó el mapa de precipitación y el de temperatura hallados anteriormente.

**Figura 24. Calculo del mapa evapotranspiración a partir de la ecuación de Turc en la calculadora de mapas raster.**



**HidroSIG 4.0**

**Figura 25. Mapa de evapotranspiración estimado a partir de la ecuación de Turc**



### **Ecuación de CENICAFÈ.**

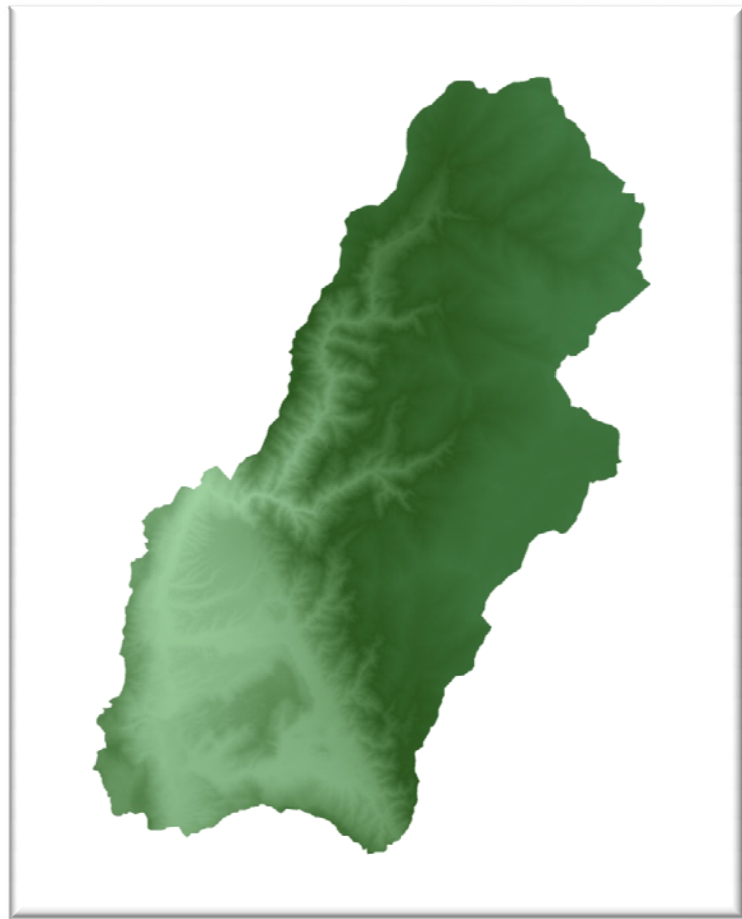
Esta ecuación se definió mediante la regresión de los datos obtenidos a partir de la aplicación del método de Penman en 45 estaciones climáticas en Colombia (Jaramillo, 1989 y 1997 comunicación personal); el cálculo de la evapotranspiración por esta ecuación es muy sencilla, ya que solo depende de la variable de altura sobre el nivel del mar.

A continuación se presenta la expresión para dicho cálculo:

$$ETP = 4.658 \exp(-0.0002h) \quad (8)$$

ETP es la evapotranspiración potencial en mm/día y h es la cota sobre el nivel del mar en [m].

**Figura 26. Mapa de evapotranspiración estimado a partir de la ecuación de CENICAFE**



**HidroSIG 4.0**

**Ecuación de Coutagne.**

La ecuación de Coutagne se basa en las características meteorológicas de la cuenca, da una estimación de evapotranspiración en función de la precipitación y de la Temperatura; a continuación se presenta la expresión,

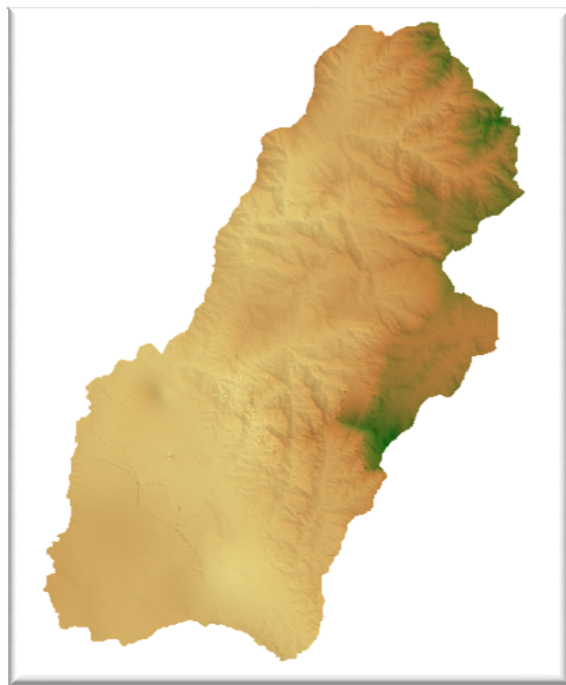
(8)

Donde

————(9)

Donde T es la temperatura media anual en °C. La ecuación (8) sólo es aplicable para P comprendido entre  $(8\lambda)^{-1}$  y  $(2\lambda)^{-1}$ . Si las precipitaciones son inferiores a  $(8\lambda)^{-1}$  entonces  $ETR=P$ . Si  $P > (2\lambda)^{-1}$ , entonces  $ETP = (4\lambda)^{-1} = 0.20 + 0.035T$  (Remenieras, 1974). Para nuestro caso se utilizó la ecuación (8).

**Figura 27. Mapa de evapotranspiración estimado a partir de la ecuación de Coutagne**



**HidroSIG 4.0**

### 4.3.2 Resultados

Las ecuaciones que se utilizaron para la estimación de la evapotranspiración solo tienen en cuenta las condiciones topográficas, ignorando las características bioclimáticas y de vegetación ya que solo dependen de la temperatura media anual y esta a su vez de la altura sobre el nivel del mar.

Los diferentes métodos evaluados para la estimación de la evapotranspiración presentaron en general tendencias similares en cuanto a su distribución espacial en la cuenca; la evapotranspiración real es más alta en las zonas de mayor precipitación, debido a que esta variable está condicionada por la cantidad de agua disponible. La ETP en todas sus espacializaciones denota la topografía; ya que solo depende de la temperatura media anual, la cual está supeditada a la altura sobre el nivel del mar.

El valor más alto de ETR se obtuvo por la ecuación de Coutagne y el valor más alto de ETP se obtuvo por la ecuación de Turc; los datos que se obtuvieron de evapotranspiración se muestran en la tabla.

**Tabla 2. Resultados de evapotranspiración**

Método	ETR (mm)	ETP (mm)
<b>Ecuación de Turc</b>	<i>632.996</i>	<i>741.633</i>
<b>Ecuación de CENICAFE</b>	<i>571.92</i>	<i>630.25</i>
<b>Ecuación de Coutagne.</b>	<i>727.912</i>	-

## 5. BALANCE HIDRICO DE LARGO PLAZO

El balance hídrico nos permite hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre, es un medio para solucionar importantes problemas hidrológicos tanto teóricos como prácticos.

El balance hídrico de lagos, cuencas superficiales y cuencas subterráneas, es fundamental para dar un uso racional en el espacio y en el tiempo así como para mejorar el control y la redistribución de los recursos de agua; El conocimiento del balance hídrico es también muy importante para el estudio hidrológico, con la estructura de este es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema en diferentes periodos de tiempo y establecer el grado de influencia en la variaciones del régimen natural.

El método de balance hídrico de largo plazo se basa en la formulación de las ecuaciones de conservación de masa para volúmenes de control en columnas de suelo, atmosfera y la unión de ambas, donde el borde inferior de la columna de suelos es estrato impermeable y el borde superior de la atmosfera es su tapa. La superficie de la cuenca es el borde superior de la columna de suelo y a su vez, el borde inferior de la columna atmosférica. (Poveda G. Mesa O y Velez J, 2000).

Para la estimación del balance hídrico se deben considerar las ecuaciones de conservación de masa dentro de una columna suelo-atmosfera que bien puede tratarse de una cuenca hidrográfica, una región o un continente.

## 5.1 CAUDALES MEDIOS ANUALES

Para la estimación de caudal medio se utiliza la formulación de balance hídrico a largo plazo, donde los cambios en las variables de almacenamiento en el suelo y en la atmósfera son despreciables en comparación con la magnitud de flujo de la precipitación, evaporación y escorrentía de la cuenca.

Por tanto, la estimación del caudal medio multianual requiere de estimativos de la precipitación y de la evapotranspiración real en la cuenca, con una distribución de la topografía como una función bidimensional del espacio, (Poveda y Mesa, 1995).

$$Q = A \iint [P(X, Y) - E(X, Y)] dx dy$$

Esta ecuación se soluciona de forma discreta en los píxeles al interior de la cuenca, es decir se calcula la producción media de escorrentía que se produce en cada píxel del mapa que representa la región, y luego se suma el resultado según el procedimiento de agregación de variables y se obtiene el mapa de caudales medios.

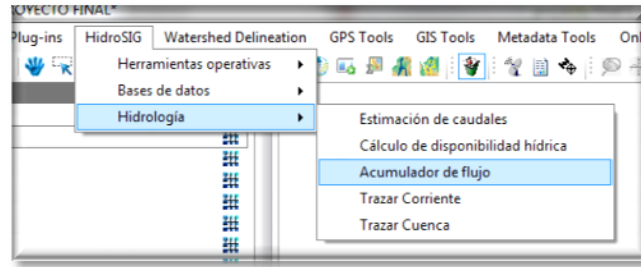
La aplicación de esta ecuación en el HidroSIG 4.0 se hizo para cada uno de las estimaciones de evapotranspiración halladas en el capítulo 4 del presente documento; a continuación se muestran la ruta y un ejemplo de los mapas de caudales medios obtenidos.

Proceso para hallar el Caudal Medio en el HidroSIG 4.0

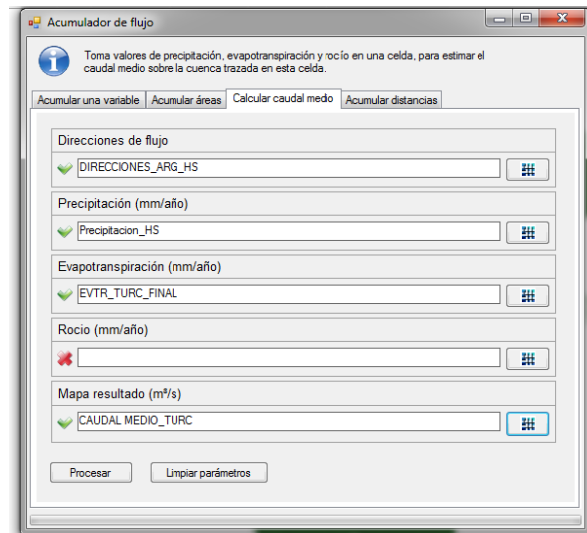
Abrir HidroSIG

- *Hidrología –Acumulador de flujo.*

**Figura 28. Ruta para el acumulador de flujo-cálculo de caudal medio.**



**Figura 29. Cuadro de diálogo, ingreso de variables para el cálculo del mapa de caudal medio.**



**HidroSIG 4.0**

**Figura 30. Mapa de Caudal Medio a partir de la evapotranspiración estimada por Turc.**



A continuación se relacionan los resultados de caudales medios por las diferentes ecuaciones de estimación de evapotranspiración real tabla 3.

**Tabla 3. Resultados de caudales medios para cada uno de los métodos de estimación de evapotranspiración real.**

<b>Método</b>	<b>Q<sub>med</sub>(m<sup>3</sup>/seg)</b>
Ecuación de Turc	22.964
Ecuación de CENICAFE	25.372
Ecuación de Coutagne.	19.22

Los resultados estimados de caudales medio por la herramienta HidroSig 4.0 en comparación de resultados obtenidos en trabajos de investigación anteriores, donde se estima el caudal medio por otra metodología sobre la cuenca superior del Rio Lebrija, son muy similares, lo que nos apoya para afirmar que el HidroSIG 4.0 es un herramienta útil en el cálculo de estos y que su exactitud depende de la calidad de los datos o información base.

En la comparación se utilizaron los resultados de la “Estimación de la Evapotranspiración Real En La Cuenca Superior del Rio Lebrija”, (García F, Otero J, 2005).

## **5.2 CAUDALES MINIMOS**

Los caudales mínimos pueden ser estimados por diferentes metodologías, esto depende esencialmente de la información disponible, (*UNALMED-UPME (2000)*), estos métodos se pueden clasificar en diferentes grupos relacionados a continuación

- Los que apuntan a la estimación de ciertos índices, tales como la media o cuantiles específicos a partir de técnicas de regionalización, involucrando parámetros geomorfológicos (área, pendiente de la cuenca y/o canal, densidad de drenaje, entre otros).
- fisiográficos (porcentaje de lagos y zonas boscosas), climáticos (precipitación y evaporación) e hidrológicos.
- métodos gráficos (construcción de curvas regionales).
- técnicas de interpolación espacial.
- los que permiten estimar ciertas características del caudal mínimo a partir de series sintéticas de caudal. Estos últimos requieren la aplicación de métodos de

simulación que buscan la generación de series continuas de caudal en uno o varios sitios de una cuenca, que eventualmente pueden ser utilizados en métodos que requieran mayor cantidad de información.

### 5.2.1 Regionalización de características medias.

El método más común es el de regionalización de características medias, a partir de parámetros geomorfológicos, fisiográficos, climáticos e hidrológicos, una vez conocidas estas características se pueden estimar valores de caudales mínimos y aplicar distribuciones de probabilidad de valores extremos para estimar caudales mínimos a diferentes tiempos de retorno.

Para la estimación de caudales mínimo se utilizó la metodología de regionalización descrita en *UNALMED-UPME* (2000), donde la media y la desviación estándar para caudales mínimos depende de parámetros geomorfológicos de la cuenca, representados por el área, y parámetros climáticos representados por la precipitación y la evaporación media sobre la misma, por tanto las expresiones para determinan la media ( $\mu_{Qmin}$ ) y la desviación ( $\sigma_{Qmin}$ ) de caudales mínimos está dada por las expresiones,

$$\mu_{Qmin} = C_{\mu} (P-E)^{\beta_1} A^{\theta_1} \quad (11)$$

$$\sigma_{Qmin} = C_{\sigma} (P-E)^{\beta_2} A^{\theta_2} \quad (12)$$

La estimación de los valores  $\theta_i$  y  $\beta_i$  se realizaron a partir de regresiones entre el caudal medio, la precipitación, La evaporación y el área de la cuenca, su estimación se puede ver con mayor detalle en *UNALMED-UPME* (2000).

Los valores de  $C_\mu$  y  $C_\sigma$  son constantes de regionalización que se obtienen a partir de registros de caudales medios y mínimos de la cuenca y se determinan p con las siguientes expresiones,

$$C_\mu = \frac{\mu_{min}}{Q_{med}} \quad (13)$$

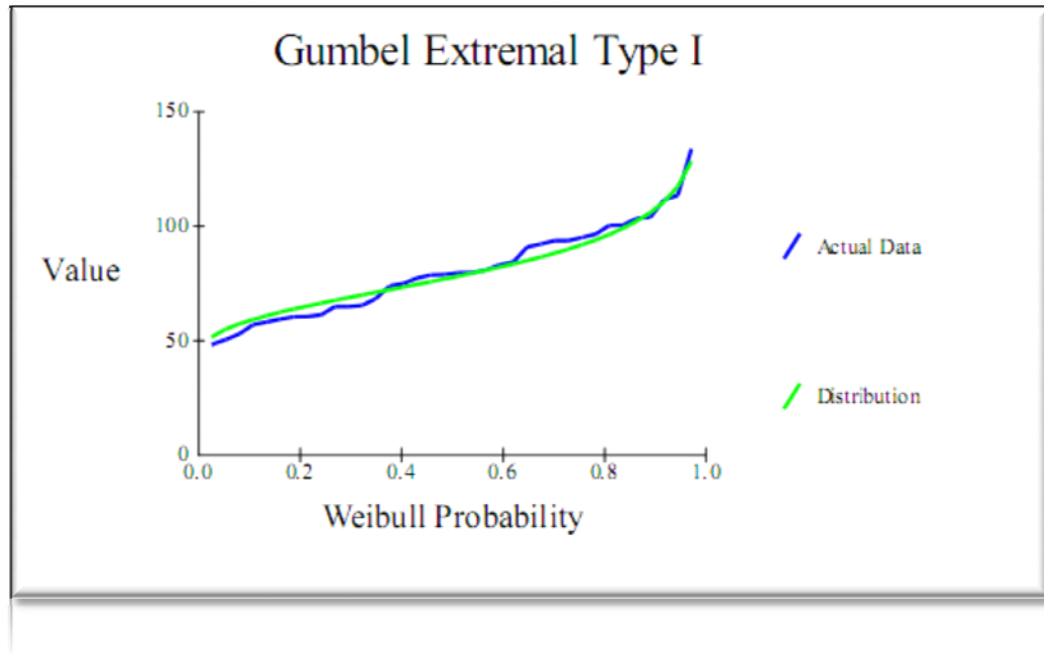
$$C_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{Q_{med}} \quad (14)$$

Para el cálculo de la media ( $\mu_{min}$ ) y la desviación estándar ( $\sigma_{min}$ ) de caudales mínimos se utilizaron los datos de precipitación mínima media anual de la estación La Granja- Piedecuesta, estos datos se ajustaron a una distribución de probabilidad tipo Gumbel, la cual cumplió con las pruebas de ajuste de bondad del estadígrafo  $\chi^2$ ; Lo anterior se realizó para un confiabilidad del 95% .

Para la estimación de los caudales se utilizó la metodología hidrometeorológica de Fórmula Racional, SoilConservationService y un hidrograma unitario triangular.

En la figura 32 se presentan los ajustes de las distribuciones de probabilidad de Gumbel para la estación Hidrometeorológica La Granja Piedecuesta.

**Figura 31. Distribución Gumbel Tipo I para la Estación La Granja Piedecuesta**



**HidroSIG 4.0**

Para estimar los caudales transportados se hace necesario estimar algunas de las características de la cuenca. Las características utilizadas se presentan a continuación:

**Tabla 4. Datos característicos de la cuenca a partir de los datos de la estación la Granja Piedecuesta**

Nombre	Longitud del cauce (L) (m)	Pendiente Promedio (S) (m/m)	Tiempo de cauce (Tc) (h)	Duración de Exceso (de) (h)
Granja-Piedecuesta	20865	0.047927151	2.217234361	2.978076131

Tiempo de Retrasó (tr) (h)	Tiempo Pico (Tp) (h)	Tiempo Base (Tb) (h)	Caudal Pico (qp) (km2)
1.330340617	2.819378682	7.527741082	8.20969533

Para la abstracción de la cantidad de lluvia que se convierte en escorrentía se utilizó el método de la U.S. SoilConservationService, el cual requiere datos de área de drenaje, almacenamiento de la cuenca, y el tiempo de concentración. Además día, las pérdidas iniciales, tener en cuenta la Distribución en el tiempo de la lluvia, por intersección y almacenamiento de agua en depresiones y una tasa de infiltración que decrece con la tormenta.

La relación fundamental del método se basa en:

$$\frac{F}{S} = \frac{P_E}{P_{max}} \quad (15)$$

Donde:

F=infiltración Real

S= Retención potencial Máxima

PE=Precipitación Efectiva

Pmáx=Exceso de Precipitación

Las pérdidas iniciales se denominan abstracciones iniciales, las cuales se calculan con la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0.2 * S \quad (16)$$

Se tiene entonces que:

$$P_E = P - I_a \quad (17)$$

$$P_E = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (18)$$

De manera similar se debe determinar el valor de S (Retención Potencial Máxima), representado en un parámetro denominado (CN) o números de escorrentía.

$$S = z \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (19)$$

*Para S en mm.*

Las pérdidas que se dan por infiltración dependen sobre todo de las características y del uso del suelo (cobertura superficial). El método de la Soil Conservation Service utiliza una combinación de condiciones de suelo y uso del mismo, para asignar factores de escorrentía llamados (CNII). Estos números representan la escorrentía superficial en un área; Cuanto más alto es el valor de CN, más alto es el potencial de escorrentía.

En caso de antecedentes de condiciones de lluvia (CN III), o sequía (CN I) es necesario realizar un ajuste del valor de CN II; por lo anterior es necesario estimar las condiciones de antecedentes de humedad del suelo ( $k_a$ ). Dichas condiciones pueden variar cuando se presentan fuertes lluvias, ya que el suelo varía de seco a un promedio de este y de suelo mojado durante la tormenta.

Posteriormente a la representación práctica de la lluvia efectiva (escorrentía) se utiliza un hidrograma unitario triangular para estimar el Caudal Pico debido al incremento de escorrentía. La fórmula del Hidrograma Unitario se presenta a continuación:

$$Q_P = \frac{2PEA}{T_b} \quad (20)$$

Donde :

Qp=Caudal Pico

PE=Precipitación efectiva calculada con la con la ecuación

A=área de drenaje

Tb=Tiempo base del hidrograma

Donde el  $T_b = 2.67 T_p$ , para el  $T_p$  se utiliza la siguiente Ecuación:

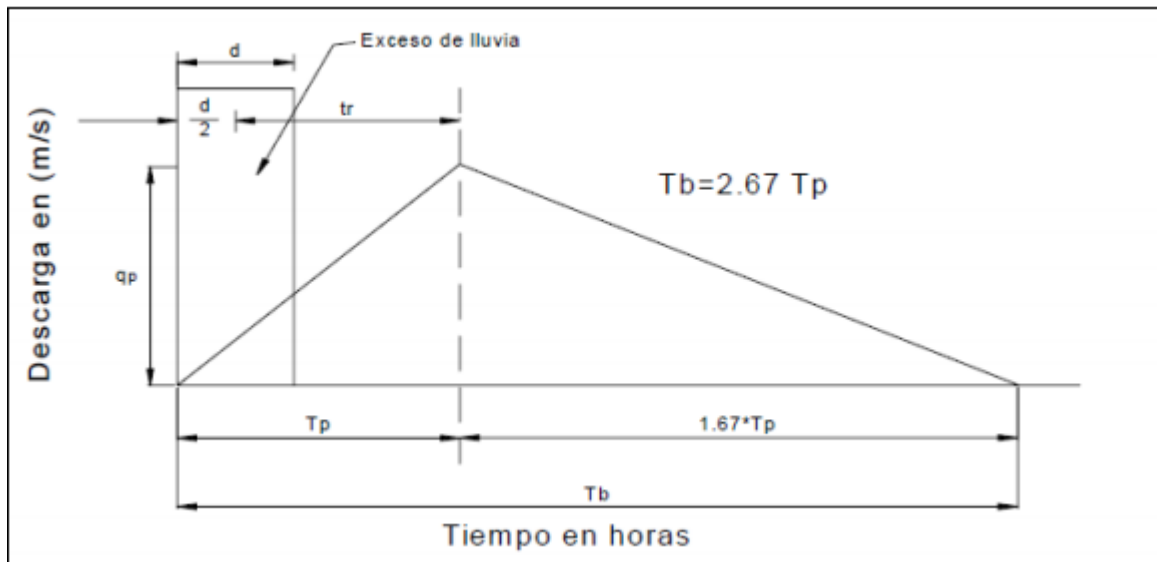
$$T_p = \frac{d}{2} + 0.6T_c \quad (21)$$

Donde:

Tc=Tiempo de concentración

D= Duración de la lluvia efectiva

**Figura 32. Gráfica del Hidrograma Unitario Triangular**



**HidroSIG 4.0**

El valor de precipitación efectiva para la estación La Granja- Piedecuesta es de 11.288 [mm].

De esta manera y con ayuda de las ecuaciones 13 y 14 se determinan los coeficientes de regionalización para la estimación de caudales mínimos, a continuación se muestran los valores que se obtuvieron para la Cuenca Superior del Río Lebrija,

**Tabla 5. Valores de los parámetros de regionalización para caudales mínimos.**

$C_{\mu}$	$\theta_{\mu}$	$\Phi_{\mu}$	$C_{\sigma}$	$\theta_{\sigma}$	$\Phi_{\sigma}$
0.012	0.303	0.325	0.0019	0.389	0.758

Estos parámetros nos permiten conocer los valores estimados para caudales mínimos, en cualquier tiempo de retorno sobre la zona de estudio, a continuación se muestra la ruta para la obtención de resultados a partir del HidroSIG 4.

Para el cálculo de caudales mínimos, al igual que en la estimación de caudales medios se ingresa en la barra de herramientas *HidroSIG >Hidrología >Estimación de Caudales*, y se entra en la pestaña de caudales mínimos.

Ubicados en esta ventana se ingresan los parámetros de regionalización de la cuenca y se determina un tiempo de retorno para el que se desea calcular el caudal mínimo, y se define el tipo de distribución, para nuestro caso se utilizó la distribución de Gumbel.

Figura 33. Estimación de caudales mínimos para cualquier tiempo de retorno.

**Estimación de caudales**

**Seleccione la capa que contiene las cuencas:**

Desde layer     Desde archivo

Cuencas\_Cuenca Superior Del Rio Lebrija

**Seleccione una cuenca**

CSRL

Caudal max. (Regionalización)    Caudal min. (Regionalización)

<b>Media (m³/s)</b>	3.568	Cmedia_Qmin	$C_m$
		Tetamedia_Qmin	$\theta_m$
		Fimedia_Qmini	$\phi_m$

<b>Desviación (m³/s)</b>	0.844	Cdesv_Qmin	$C_d$
		Tetadesv_Qmin	$\theta_d$
		Fidesv_Qmin	$\phi_d$

<b>Caudal mínimo (m³/s)</b>	2.64	<b>Distribución</b>	Gumbel
		<b>Periodo de retorno</b>	10 años

### HidroSIG 4.0

Este procedimiento se realiza para diferentes tiempos de retorno, a continuación se relacionan los valores obtenidos para cada uno de estos.

**Tabla 6. Valores de caudales mínimos por Gumbel y LogNormal para diferentes tiempos de retorno.**

<b>Tr</b>	<b>Q<sub>min</sub> [m<sup>3</sup>/seg] (Gumbel)</b>	<b>Q<sub>min</sub> [m<sup>3</sup>/seg] (LogNormal)</b>
2,33	3.39	3.342
5	2.876	2.854
10	2.64	2.575
25	2.419	2.308
50	2.291	2.151
100	2.184	2.018

Los resultados ofrecidos por los dos tipos de distribución son muy similares, el caudal disminuye a una misma proporción a medida que aumenta el tiempo de retorno, aunque la distribución de LogNormal presenta condiciones más extremas de disponibilidad de agua, ya que los caudales son siempre menores que los obtenidos a partir de la distribución de Gumbel.

Los caudales mínimos se pueden estimar interactivamente en HidroSIG 4.0, escogiendo el punto de salida de la cuenca, los mapas de precipitación, evaporación y las constantes de regionalización, porque el software tiene incorporado un módulo de caudales mínimos que emplea para la estimación la ecuación de regionalización propuesta en UNALMED-UPME (2000).

### **5.3 CAUDALES MAXIMOS**

#### **5.3.1 Regionalización de características medias**

Para estimación de caudales máximos se siguió la metodología propuesta por UNAL-UPME, 2000. Donde al igual que los caudales mínimos propone que la

desviación estándar y la media para caudales máximos dependen de parámetros geomorfológicos de la cuenca, representadas por el área, y parámetros climáticos representados por la precipitación y la evaporación media sobre la misma.

$$\mu_{Qmin} = K_{\mu}(P-E)^{\theta_{\mu}} A^{\Phi_{\mu}} \quad (22)$$

$$\sigma_{Qmin} = K_{\sigma}(P-E)^{\theta_{\sigma}} A^{\Phi_{\sigma}} \quad (23)$$

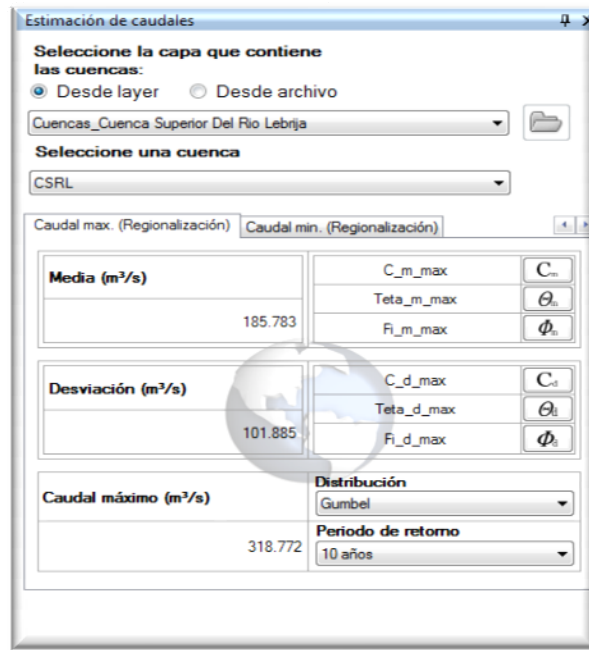
Los valores par  $\Theta_{\mu}\Phi_{\mu}$  y  $\Theta_{\sigma}\Phi_{\sigma}$  se determinan por subregiones a partir de regresiones múltiples, donde se seleccionan las variables geomorfológicas y climáticas que mayor influencia tengan sobre la variable dependiente, (UNAL-UPME, 2000), a continuación se presentan los parámetros aproximados, ajustado para La Cuenca Superior de Rio Lebrija.

**Tabla 7. Valores de los parámetros de regionalización para caudales máximos.**

Subregión	$K_{\mu}$	$\theta_{\mu}$	$\Phi_{\mu}$	$R$	$K_{\sigma}$	$\theta_{\sigma}$	$\Phi_{\sigma}$	$R$
Colombia	0.0039	0.755	0.837	0.95	0.123	0.498	0.767	0.85

Estos parámetros nos permiten conocer los valores estimados para caudales máximos, en cualquier tiempo de retorno sobre la zona de estudio, para su estimación se repite el proceso que se utilizó para en la estimación de caudales mínimos, pero en la ventana que nos permite estimar estos, como se muestra en la figura 35

**Figura 34 Estimación de caudales máximos para cualquier tiempo de retorno**



**HidroSIG 4.0**

**Tabla 8. Valores de caudales máximos por Gumbel y LogNormal para diferentes tiempos de retorno.**

<b>Tr</b>	<b>Q<sub>max</sub> [m<sup>3</sup>/seg] (Gumbel)</b>	<b>Q<sub>max</sub> [m<sup>3</sup>/seg] (LogNormal)</b>
2,33	184,531	177,176
5	259,136	250,784
10	318,772	314,301
25	394,123	399,824
50	450,023	467,058
100	505,51	537,127

Los resultados ofrecidos por los dos tipos de distribución presentan grandes diferencias entre ellos, se habla hasta de  $30\text{m}^3$ , se puede denotar que resultados obtenidos por LogNormal presenta un acenso rápido de los caudales máximos a medida que aumenta el tiempo de retorno mientras que los resultados obtenidos a partir de Gumbel, presenta un aumento de caudales un poco más moderado para el aumento en los tiempos de retorno.

Los caudales máximos al igual que en los mínimos se pueden estimar interactivamente en HidroSIG 4.0, escogiendo el punto de salida de la cuenca, los mapas de precipitación, evaporación y las constantes de regionalización, porque el software tiene incorporado un módulo de caudales mínimos que emplea para la estimación la ecuación de regionalización propuesta en UNALMED-UPME (2000).

## CONCLUSIONES

- El objetivo del manejo de un Sistema de Información Geográfica, es demostrar que se trata de un instrumento de gran utilidad para desarrollar una gestión eficaz, un SIG estudiar los datos disponibles, mejorando considerablemente la visualización e interpretación del mismo así como la presentación de resultados. HidroSIG es una herramienta muy útil para estudios de balance hídrico. Teniendo en cuenta sus características y sus múltiples aplicaciones; sin embargo se debe tener en cuenta que HidroSIG es una paquete computacional que se encuentra en desarrollo y está en constante cambio.
- La recopilación de información de mapas en formato raster son de gran importancia, como a su vez conocer claramente las propiedades de estos, ya que en plataformas SIG y para nuestro caso HidroSIG, son muy sensibles a las variaciones tanto de tamaños, numero de celdas, columnas y filas; estas son algunas de las consideraciones que se deben tener antes de que se desee estimar un cálculo, usando las herramientas operativas de HidroSIG, esto se recomienda si se quiere lograr un máximo desempeño y explotar el potencial del software.
- La ausencia de mediciones de variables hidrológicas en la cuenca superior de rio Lebrija impiden que los métodos utilizados para la estimación de dichas variables sean validados o calibrados adecuadamente. Se recomienda para posibles estudios a futuro, adquirir un registro actualizado de datos puesto que existen variaciones importantes que no fueron tenidas en cuenta, ya que el balance hídrico fue tomado como una prueba piloto y se alimentó bajo información tomada por 25 estaciones hasta el año 2002.

- La temperatura se estimó mediante la técnica de regionalización Cenicafé, la cual considera la variación de la temperatura y la altura sobre el nivel del mar. Los resultados obtenidos presentan Coherencia física. Cabe aclarar que en Colombia la temperatura superficial del aire está fuertemente condicionada todo el año por la altura sobre el nivel del mar.

## BIBLIOGRAFÍA

APARICIO, Francisco J (1.993) Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa Noriega. México, D. F.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA. CDMB. (2002) Estudio Plan de Ordenamiento Ambiental dela mi ero-cuenca del río Charla área de jurisdicción de la C.D.M.6. Bucaramanga.

CHOW. V. T, D.R. Maidment y L.W. Mays. *Hidrología Aplicada*. Me Graw Hill. 1994.

CUEVAS., V. T. *Sistema de información Integrado para la Gestión de los Recursos Hidráulicos*, VI Jomadas del CONAPHI-CHILE, 2000.

POVEDA.G *Cuantificación del efecto de El Niño y La Niña sobre los caudales en Colombia*. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago De Chile, Vol. 4, 107,117, 1994.

RODRÍGUEZ.G., E., *Procesos Geomórficosy Cambio Ambiental*, Trabajo Dirigido de Grado, Posgrado en Gestión Ambiental, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1999.

VELEZ, Jaime I, POVEDA, Germán, MESA,Oscar J. (2000. 150p.) *Balances Hidrológicos de Colombia*. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hídricos Universidad Nacional de Medellín- Primera edición Medellín.

RIVERA. J. H., *Susceptibilidad y Predicción de la Erosión en Suelos de Ladera de la Zona Cafetera Central Colombiana*, Trabajo de Tesis Doctoral, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 503 . Medellín, 1999.

García S, Otero J, Estimación de la evapotranspiración real en la cuenca superior del Río Lebrija, Trabajo de tesis pregrado. Facultad de ingenierías físico Mecánicas, Universidad Industrial de Santander (2005)

Pérez, O, Elaboración de un modelo digital de elevaciones y generación del mapa de clasificación vegetal para la cuenca superior del Rio Lebrija, Trabajo de tesis pregrado, Facultad de ingenierías físico- Mecánicas, Universidad Industrial de Santander (2010)