

**SEPARACIÓN DE FLUJO BASE EN LA ESTACIÓN
CAFÉ MADRID (C.S.R.L.)**

**Adriana Marcela Serrano Santiago
Giovanni Balaguera Padilla**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2006**

**SEPARACIÓN DE FLUJO BASE EN LA ESTACIÓN
CAFÉ MADRID (C.S.R.L.)**

**Adriana Marcela Serrano Santiago
Giovanni Balaguera Padilla**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director:
Jorge Alberto Guzmán Jaimes
Ingeniero Civil M.Sc**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2006**

*A Dios, por todo lo que soy,
A mis padres, por su amor incondicional,
A mis hermanos, por su apoyo
Y a mis siete angelitos.*

Camauto.

ADRISS

A DIOS por regalarme una segunda oportunidad
A mis padres por todo su esfuerzo y dedicación
A Johana por brindarme su confianza y apoyo.

بيو افيافر ابرپ

Giovanni

Agradecimientos

Especialmente a nuestro director de proyecto, el I.C Msc Jorge Alberto Guzmán, por todo su apoyo, confianza, dedicación, aportes y empeño invaluable para la culminación exitosa de nuestro proyecto.

A la I.C. PhD Sully Gómez Isidro, por su colaboración oportuna.

Al Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH), por su apoyo técnico.

Agradecimientos

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por facilitar la información de datos Hidrológicos de precipitación diaria de las estaciones dentro y en las cercanías de la Cuenca Superior del Río Lebrija, y por los registros de caudales de la estación Limnigráfica Café Madrid en el periodo de 1970 a 2000.

A la Corporación Regional de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) por los datos suministrados de precipitación de sus estaciones hidroclimáticas.

Al Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) por la información Hidrogeológica de la región.

CONTENIDO

<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>MARCO HIDROLÓGICO GENERAL DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA (CSRL).....</u>	4
1.1 LOCALIZACIÓN.....	4
1.2 PARÁMETROS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS	7
1.3 HIDROGEOLOGÍA DE LA CSRL.....	8
1.4 INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA	12
1.4.1 RED PLUVIOMÉTRICA.....	12
1.4.2 MEDICIÓN DE CAUDAL.....	14
<u>PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN</u>	15
2.1 DESARROLLO DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES – DEM	15
2.2 ESPACIALIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	20
2.3 CONSISTENCIA Y HOMOGENEIDAD DE DATOS DE CAUDALES	22
<u>SEPARACIÓN DE FLUJO BASE.....</u>	25
3.1 CURVA MAESTRA DE RECESIÓN.....	26
3.2 MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE FLUJO BASE	28
3.2.1 MÉTODOS DE ALGORITMOS.....	29
3.2.2 MÉTODO ISOTÓPICO.....	32
3.3 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ALGORITMOS DE SEPARACIÓN	34
3.3.1 ALGORITMO DE UN PARÁMETRO.....	34
3.3.2 ALGORITMO DE DOS PARÁMETROS.....	35
3.3.3 ALGORITMO DE TRES PARÁMETROS	36

3.3.4 ALGORITMO DE SMAKHTIN	37
3.4 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SEPARACIÓN	39
<u>CONCLUSIONES</u>	<u>46</u>
<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>48</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>49</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>51</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización de la Cuenca Superior del Río Lebrija	4
Figura 1.2 Subcuencas hidrográficas de la CSRL,.....	6
Figura 1.3 Mapa Hidrogeológico de la CSRL	11
Figura 1.4 Estaciones Seleccionadas	13
Figura 1.5 Estación Café Madrid	14
Figura 2.1 Esquema de la cartografía	17
Figura 2.2 Modelo Digital de Elevación de la CSRL con GRID de 50 x 50 m	19
Figura 2.3 Matriz de espacialización de precipitación. SDM	20
Figura 2.4 Espacialización de la precipitación Media Anual año 1970	22
Figura 2.5 Serie de tiempo con problemas de vaciado	24
Figura 3.1 Componentes del Hidrograma	26
Figura 3.2 Curva maestra de recesión	27
Figura 3.3 Separación del hidrograma por algoritmo de Un parámetro.....	35
Figura 3.4 Separación del hidrograma por algoritmo de Dos parámetros	36
Figura 3.5 Separación del hidrograma por algoritmo de Tres parámetros	37
Figura 3.6 Separación del hidrograma por algoritmo de Smakhtin.....	38
Figura 3.7 Separación de flujo base aplicando BFS (Guzmán, 2006).....	43
Figura 3.8 Comparación de los algoritmos de separación en la estación Café Madrid	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Subcuencas hidrográficas de la CSRL	5
Tabla 2.1 Coordenadas Cartografía INAC	16
Tabla 2.2 Interpolador de la precipitación media anual del año 1970	21
Tabla 3.1 Separación del evento por algoritmo de Un parámetro.	35
Tabla 3.2 Separación del evento por algoritmo de Dos parámetros.....	36
Tabla 3.3 Separación del hidrograma por algoritmo de Tres parámetros	37
Tabla 3.4 Separación del hidrograma por algoritmo de Smakhtin.....	38
Tabla 3.5 Resultados de Flujo Base para la serie histórica de caudales periodo 1970 a 2000.	43

RESUMEN

TITULO:

SEPARACIÓN DE FLUJO BASE EN LA ESTACIÓN CAFÉ MADRID (C.S.R.L.)*

AUTORES:

Adriana Marcela Serrano Santiago
Giovanni Balaguera Padilla**

PALABRAS CLAVES:

Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.); Separación de Flujo Base; Algoritmos; Recesión; Modelo Digital de Elevaciones (DEM); Escorrentía

DESCRIPCIÓN:

La presente investigación muestra la aplicación de modelos de separación de flujo base en la estación Café Madrid, punto de cierre de la Cuenca Superior del Río Lebrija, ubicada al nor oriente del departamento de Santander con un área aproximada de 1281 km². La separación de flujo base se llevo a cabo utilizando series históricas de caudales y de precipitación desde 1970 hasta 2000. Se utilizaron los algoritmos de separación de flujo planteados por Chapman (1999) y Smakhtin (2001), en donde se estimo la componente de flujo base entre un 50 y 72 % de la escorrentía total; para poder visualizar y determinar fácilmente las constantes de los algoritmos, se desarrollo un programa computacional.

El informe presenta el marco hidrológico general la CSRL, como su localización, parámetros morfológicos y geomorfológicos, hidrogeología, red pluviométrica; se indica el procesamiento y análisis de la información, como la obtención del Modelo Digital de Elevación, la espacialización de la precipitación diaria y por ultimo muestra la aplicación y resultados de los algoritmos de separación de flujo.

Se evaluaron 4 modelos de separación de flujo base, encontrándose que el que mejor representa las condiciones de la CSRL es el modelo de tres parámetros (IHACRES, 1993). Para este modelo se estimo el flujo base como el 71% de la Escorrentía medida en la estación de Café Madrid. Los modelos de un parámetro, Boughton y Smakhtin estimaron el flujo base en 50, 69 y 72 % respectivamente. El algoritmo de Smakhtin parece no representar adecuadamente el flujo base en series de tiempo largas en la CSRL.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de ingeniería Civil, Director:
GUZMAN JAIMES, Jorge Alberto

ABSTRACT

TITLE:

BASEFLOW SEPARATION IN CAFÉ MADRID STATION (C.S.R.L.)*

AUTHORS:

Adriana Marcela Serrano Santiago
Giovanni Balaguera Padilla**

KEY WORDS:

River Lebrija Superior Catchments (C.S.R.L.); Baseflow Separation; Algorithms; Recession; Digital Elevation Model (DEM); Runoff

DESCRIPTION:

The present research show the application of base flow separation models in the Cafe Madrid station, at the out let of the River Lebrija Superior Catchments, located on the northwest in the department de Santander with an approximated area of 1281 km². The base flow separation was carried out using record runoff time series and precipitation from 1970 until 2000. This study used algorithms of flow separation shown by Chapman (1999) y Smakhtin (2001), where the components in baseflow were estimated between 50 y 72 % of the total runoff. A computational program was developed to visualize and determine easily the algorithms constants to obtain the baseflow components.

The report presents displays general the hydrology frame the CSRL, like its location, morphologic and geomorphologic parameters, hydrogeology, rain gauge network; the processing is indicated and analysis of the information, like the obtaining of the Digital Elevation Model, the espacialización of the daily precipitation and finally shows to the application and results of the algorithms of separation of flow.

Were evaluated 4 models of base flow separation, finding that which best represents the CSRL conditions is the three parameter model (IHACRES, 1993). For this model it was estimated the base flow as the 71% of the runoff measured in the Café Madrid station. The models of one parameter, Boughton y Smakhtin estimated the base flow in 50, 69 y 72% respectively. The Smakhtin algorithm seems to not represent adequately the base flow in long time series in the CSRL.

* Project de grade

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director:
GUZMÁN JAIMES, Jorge Alberto

Introducción

El agua subterránea es contemplada como fuente alternativa de abastecimiento, las condiciones actuales de la creciente demanda del recurso hídrico, la disminución y deterioro por contaminación de las fuentes hídricas superficiales han creado un conflicto en el suministro de agua potable, este problema se puede reducir en dos componentes importantes: uso eficiente y conservación del recurso hídrico, lo que genera la necesidad de conocimientos con relación a la viabilidad y sostenibilidad de los acuíferos, regulando los parámetros que se requieren para obtener una explotación sostenible del recurso hídrico subterráneo, por lo cual es indispensable la identificación de zonas de recarga para su protección, tiempos de residencia, trayectorias del flujo y el concepto de la edad del agua superficial y subterránea.

Nuestro medio no es indiferente a tal efecto, por esto el marco hidrológico de la región la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL, Santander Colombia) ha sido objeto de diferentes estudios sobre identificación y disponibilidad de fuentes de aguas subterráneas, lo que ha implicado el estudio de diversas variables siendo una de esta la interacción entre las corrientes superficiales y las aguas subterráneas por lo cual el presente trabajo se concentra en hallar tal relación mediante la separación del flujo base en la estación hidrológica Café Madrid (punto de cierre de la CSRL) aplicando los algoritmos de separación de flujo descritos por Tom Chapman (1999) y Smakhtin (2001) utilizando la serie histórica de caudales (1970-2000).

El propósito de la separación del flujo base es el de conocer el comportamiento, de alguna manera, de las corrientes de agua, el vínculo entre el flujo base y la respuesta de los acuíferos, determinar los efectos de modelación hidrológica (ingeniería hidrológica) o para entender los procesos hidrológicos asociados a la

respuesta de escorrentía que se dan en la cuenca (ciencias hidrológicas), debido a esto se hace indispensable la determinación del flujo base con técnicas precisas y eficaces que permitan posteriormente la planificación del recurso hídrico regional.

Normalmente se ha entendido en la ingeniería hidrológica que el flujo base corresponde al caudal proveniente de la “respuesta lenta” de los acuíferos, sin embargo la incorporación de “flujo rápido” proveniente, probablemente de acuíferos libres poco profundos, es importante y significativo desde el punto de vista de caudal aportado. La identificación y separación del flujo base es incierta ya que depende de la compleja interacción de cuenca que genera la respuesta subsuperficial (rápida y lenta) y de superficie. (Guzmán, 2006)

La estimación de la relación entre el flujo base de la corriente principal de la CSRL y la respuesta de los acuíferos existentes en la zona que posiblemente contribuyen al caudal de la corriente, requirió de las siguientes actividades:

- Desarrollar el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de la superficie de la CSRL.
- Verificar la ubicación y estado de las estaciones pluviométricas de las que se posee información ubicadas en la CSRL y en cercanías a ella.
- Generar la serie de tiempo de precipitación media de la CSRL.
- Analizar la homogeneidad y consistencia de la serie de tiempo de caudal de la estación Café Madrid basados en la serie de tiempo de precipitación media generada.
- Llevar a cabo la estimación de la curva maestra de recesión.
- Hacer la separación del flujo base por las metodologías de LYNE Y HOLLICK, BOUGHTON, IHACRES y SMAKHTIN.

Para un mejor entendimiento de la presente tesis a continuación se describe su distribución y las ideas fundamentales que la componen.

En el primer capítulo se presenta el marco hidrológico general la CSRL, como su localización, parámetros morfológicos y geomorfológicos, hidrogeología, red pluviométrica. El segundo capítulo describe el procesamiento y análisis de la información necesaria para llevar a cabo el desarrollo de la investigación como la obtención del Modelo Digital de Elevación, la espacialización de la precipitación. El tercer capítulo muestra la aplicación de los algoritmos de separación de flujo, resultados de separación isotópica y comparación de los métodos de algoritmo. Las conclusiones se presentan al final del documento.

Capítulo 1

Marco Hidrológico General de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL)

En el presente capítulo se expondrá con brevedad las generalidades de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), ya que la estación en estudio corresponde al punto de salida de dicha cuenca la cual define el marco hidrológico regional.

1.1 Localización

La CSRL con un área aproximada de 1281 km² constituye la más grande fuente abastecedora de agua de Bucaramanga y su área metropolitana. Se localiza en el nororiente del departamento de Santander, Provincia de Soto con coordenadas geográficas entre los 6 54' y 7 27' de Latitud Norte y los 73 15' y 72 15' de Longitud al Oeste del meridiano Greenwich y coordenadas Gausianas (1254535 y 1315700) Norte y (1091838 y 1202149) Este, con origen en la ciudad de Bogotá. En la Figura 1.1 se muestra la localización nacional y regional de la CSRL.



Figura 1.1 Localización de la Cuenca Superior del Río Lebrija

Esta delimitada aguas abajo por la unión de los ríos De Oro y Surata (Estación Café Madrid); al Sur, a unos 1600 m.s.n.m. con la Mesa de los Santos por encima de la depresión de Piedecuesta; hacia el Oeste, a unos 1100 m.s.n.m. las mesas de Llano de Palmas y de Lebrija, que dominan al norte al gran valle del Magdalena; al sur-oeste, el cañón del río Suárez; y hacia el Este, la mesa de los Santos entra en contacto con la falla del macizo ígneo-metamórfico de Santander que culmina en el páramo de Santurbán a poco mas de 4000 m.s.n.m. (Guzmán, et al 2003).

Abarca alrededor de 10 municipios del departamento de Santander (Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Surata, Tona, California, Vetas, Matanza, Charta).

La CSRL esta conformada por cuatro subcuencas, que son Río de Oro (conformada por la unión de los ríos de Oro y Hato o Lato), Río Frío, Río Tona y Río Surata (conformada por la unión de los ríos Charta, Surata y Vetas). En la Figura 1.2 y Tabla 1.1 se presenta una relación de las subcuencas hidrográficas en las que se divide la CSRL

Tabla 1.1 Subcuencas hidrográficas de la CSRL

SUBCUENCA	CORRIENTE PPAL	MUNICIPIOS QUE CONTIENE	ÁREA Km²
Río Surata	Unión de los ríos Surata, Vetas y Charta	Surata, Matanza, Charta y Vetas	473
Río Tona	Río Tona	Tona y Bucaramanga	208
Río de Oro	Unión de los ríos de Oro y Lato	Piedecuesta y Floridablanca	468
Río Frío	Río Frío	Girón y Floridablanca	132

Fuente: Los Autores

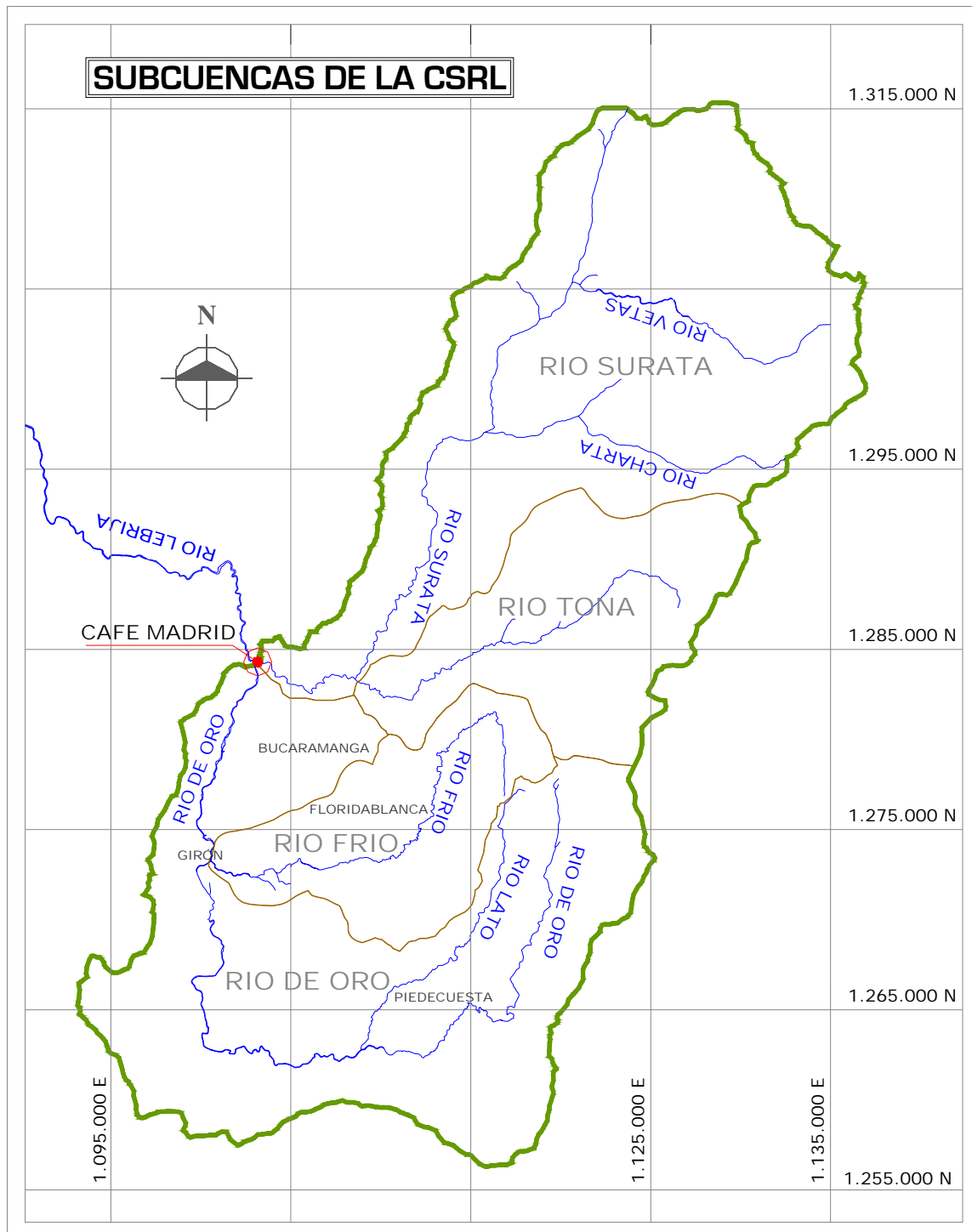


Figura 1.2 Subcuencas hidrográficas de la CSRL,

Fuente: CERS (Guzmán et al, 2003) y modificado por los Autores (2006)

1.2 Parámetros Geológicos y Geomorfológicos

Estas características se tuvieron en cuenta en el estudio debido a que condicionan parámetros como el almacenamiento, conductividades hidráulicas y movimientos superficial y subsuperficial del recurso hídrico en la cuenca. Los parámetros siguientes fueron obtenidos del estudio de la Cuenca Experimental de Río Sucio CERS, (Guzmán et al, 2005).

◆ Geología

La CSRL se caracteriza por la presencia de materiales de edad precámbrica correspondiente a las rocas metamórficas neis de Bucaramanga e ígneas de Macizo de Santander.

Las rocas metamórficas se exponen en la parte oriental de la cuenca, lugares donde se encuentran las pendientes más altas con elevaciones entre los 1000 y 4200 m.s.n.m. (Surata, Tona); en la parte occidental del macizo las masas ígneas son muy compactas pero con alto grado de facturación y diaclasamiento presentando permeabilidad secundaria.

Al occidente de la falla esta conformada por material aluvial provenientes de los ríos y quebradas que se originaron en el Macizo de Santander, presentando pendientes bajas y elevaciones entre los 600 y 1000 m.s.n.m; en esta zona se distinguen tres subzonas: Terraza de Bucaramanga (norte de la falla), Valle del Río de Oro (occidente de la falla), y la Mesa de Ruitoque (sur de la falla).

◆ Tectónica

La CSRL esta marcada por acción tectónica, en donde los dos accidentes mayores que se presentan en la cuenca son: La gran falla Bucaramanga-Santa Marta orientada SE-NW que separa al macizo de Santander de las mesetas secundarias y de la zona de acumulación cuaternaria; la falla Suárez- Río de Oro

con orientación N-S que encierra el triangulo de la zona hundida de Bucaramanga. Este último accidente termina por fusionarse al norte de Bucaramanga con la gran falla precedente para constituir un solo valle de falla. Estas líneas de fallas se pueden apreciar claramente en la Figura 2.2 correspondiente al DEM de la CSRL.

1.3 Hidrogeología de la CSRL

Como se hizo referencia en el numeral 1.2 la zona del macizo (la parte oriental de la CSRL) presenta rocas ígneas y metamórficas con permeabilidad secundaria rasgo hidrogeológico importante dado a su capacidad de captar y conducir el agua desde la zona montañosa hacia las formaciones aluviales. Debido el sistema de fracturamiento y fallas que presenta la zona se cuenta con diversas unidades hidrogeológicas que contienen sistemas de acuíferos confinados y libres los cuales regulan el comportamiento del flujo base de sus corrientes.

Las principales unidades hidrogeológicas que se encuentran en la CSRL son representadas en la Figura 1.3 y sus principales características se citan a continuación dependiendo del medio que atraviesa el flujo, INGEOMINAS, 2005

A. Sedimentos con Flujo Esencialmente Ítergranular

Formación Bucaramanga

Se caracteriza por contener acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; con sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente coluvial y fluvial generalmente de tipo libre y semiconfinados, y por rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente continental con acuíferos de tipo confinado. Almacenan aguas recomendables para cualquier uso; se representa en la Figura 1.3 con el número 2.

B. Rocas con Flujo Esencialmente a través de Fracturas (Rocas Fracturadas y/o Carstificadas)

Formación Tablazo y Rosablanca

Se representa en la Figura 1.3 con el numero 4, contienen acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 1.0 y 2.0 l/s/m; sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional, conformados por rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas de edad cretácica depositadas en ambiente marino. Acuíferos confinados con aguas recomendables para cualquier uso.

Formación Tambor, Diamante, Girón, Neis de Bucaramanga, Ortoneis de Berlín, Cuarzomonzonita de la Corcova y Granito

En estas formaciones hay presencia de acuíferos de baja productividad, capacidad específica que oscila entre los 0.05 y 1.0 l/s/m; presentan sistemas de acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por rocas sedimentarias, terciarias a cretácicas, consolidadas de ambiente continental y marino. En el Macizo de Santander existe un complejo de rocas ígneo metamórficas, de edad jurásica a precámbrica, con numerosos manantiales por fracturas. Acuíferos de tipo confinado y libre con aguas recomendables para cualquier uso, en la Figura 1.3 se identifica con el número 5.

C. Sedimentos y Rocas con limitados recursos de Aguas Subterráneas

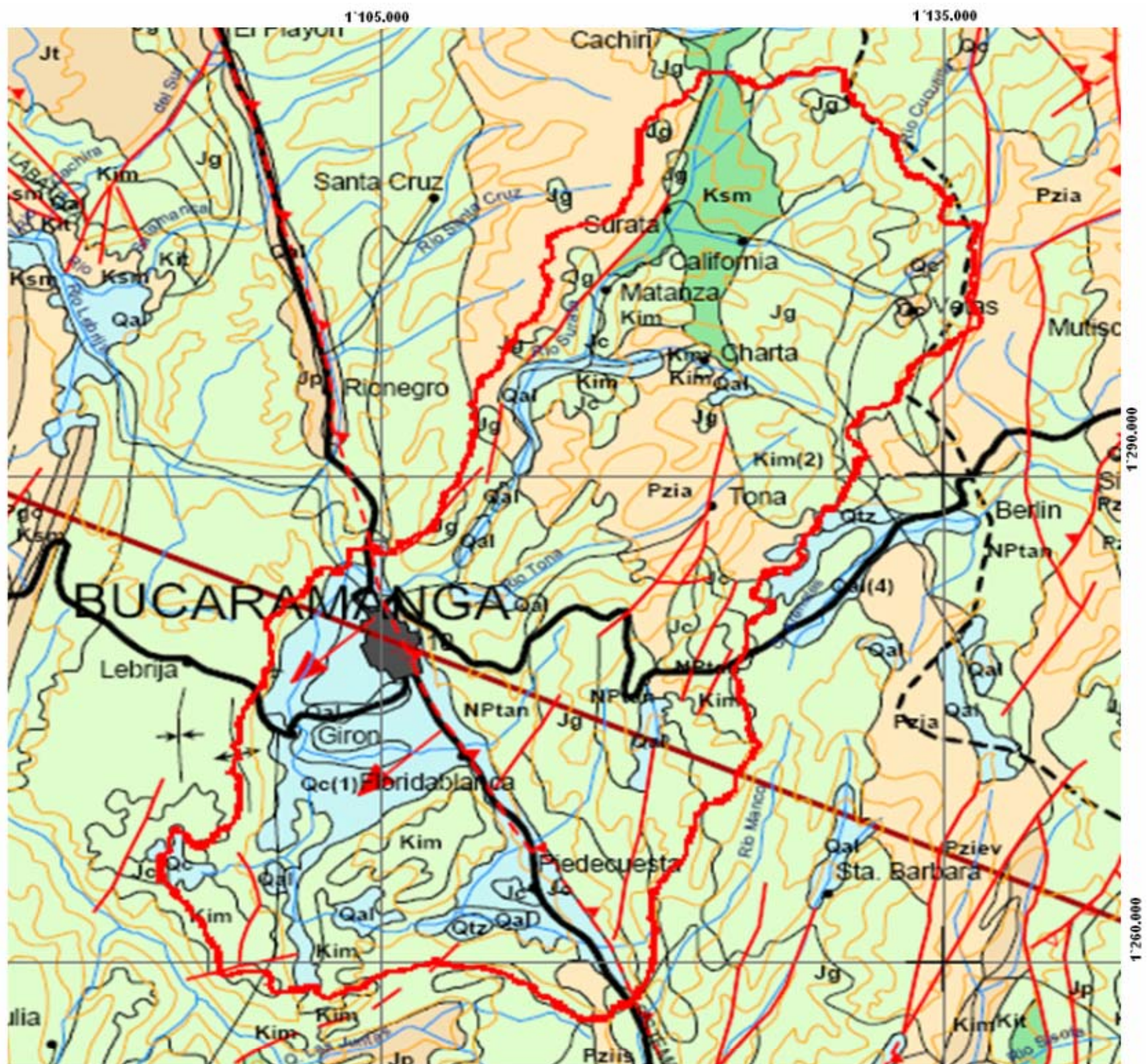
Formación Bocas, Jordán, Tiburón y Depósitos Aluviales de la Cordillera Oriental

Estas unidades hidrogeológicas se identifican en la Figura 1.3 con el número 6, cuentan con acuíferos de muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m; complejo de sedimentos constituidos por depósitos cuaternarios no consolidados de ambiente glacial y por rocas sedimentarias

terciarias a paleozoicas poco consolidadas a muy consolidadas, de origen marino y continental.

Cuarzomonzonita de la Corcova y Granito, Neis de Bucaramanga, Diorita y Tonalita del Río Suratá

Se aprecian acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m; complejo de rocas ígneo-metamórficas y volcánicas, muy compactas y en ocasiones fracturadas, de edades cretácica a precámbrica. Se simbolizan en la Figura 1.3 bajo el número 7.



UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	
Sistema Acuífero	
A.	
1	Acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 1.0 y 2.0 l/s/m
2	Acuíferos de baja productividad, capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m
B.	
3	Acuíferos de muy alta productividad, capacidad específica promedio mayor de 5.0 l/s/m
4	Acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 1.0 y 2.0 l/s/m
5	Acuíferos de baja productividad, capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m
C.	
6	Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m condiciones que pueden ser variables en las regiones costeras.
7	Acuíferos con muy baja productividad específica promedio menor de 0.05 l/s/m

Simbolos Hidrogeológicos

A. Pozos Representativos

Pozos

ID: Identificación
ID (AC) P | NE AC: Acuífero Captado

Q | s P: Profundidad (m)
NE: Nivel Estático (m)
Q: Caudal en (l/s)
s: Abatimiento (m)
t°: Temperatura (°C)
"+": Sugerencia Natural

Pozo con Flujo Artesiano

ID (AC) P | NE
Q | s

B. Manantiales Representativos

ID (AC) Q | CE ID: Identificación

t° | SDT Q: Caudal en (l/s)
t°: Temperatura (°C)
CE: Conductividad Eléctrica (Mmhos/cm)
SDT: Sólidos disueltos totales (mg/l)

C. Recursos y Reservas (a nivel pronóstico)

Nombre del Acuífero
Q: Recursos (m ³ /s)
R: Reservas (Mm ³)
E: Explotación (m ³ /s)

CONVENCIONES

	Curvas de nivel		Puerto marítimo
	Ríos		Puerto fluvial
	Vías primer orden		Aeropuerto
	Vías segundo orden		Nevado
	Vías ferreas		Volcán
	Limite departamental		Pueblo o ciudad intermedia
	Limite internacional		Capital de departamento

Figura 1.3 Mapa Hidrogeológico de la CSRL

Fuente: INGEOMINAS, (2005) y modificado por los autores (2006)

1.4 Información Hidroclimática

1.4.1 Red Pluviométrica

La cantidad, frecuencia y distribución espacial y temporal de las precipitaciones es muy variable, razón por la cual sus mediciones son parte fundamental como punto de partida de las investigaciones referentes en la determinación de los climas y el aprovechamiento de los recursos hídricos que ofrece la naturaleza.

La red pluviométrica de la CSRL esta compuesta por una serie de estaciones que registran diferentes fenómenos atmosféricos, como información de precipitación mediante el uso de instrumentos en su mayoría analógicos con resoluciones temporales de 10 minutos en los pluviógrafos y diaria en los pluviómetros. La red de medición de la precipitación esta basada fundamentalmente en registros pluviométricos operados manualmente.

Se tomo como base la información de precipitación diaria de 50 estaciones distribuidas en la cuenca y en cercanía a ella, información suministrada por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), por la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) y la Constructora URBANAS.

La información de la red Hidroclimática utilizada para el estudio se presenta en el Anexo 1 y en la Figura 1.4 se presenta la distribución de las 50 estaciones, estaciones que cumplen con características de resolución temporal y periodo de registro, para ser analizadas y procesadas de acuerdo a los procedimientos estipulados en el capítulo 2.

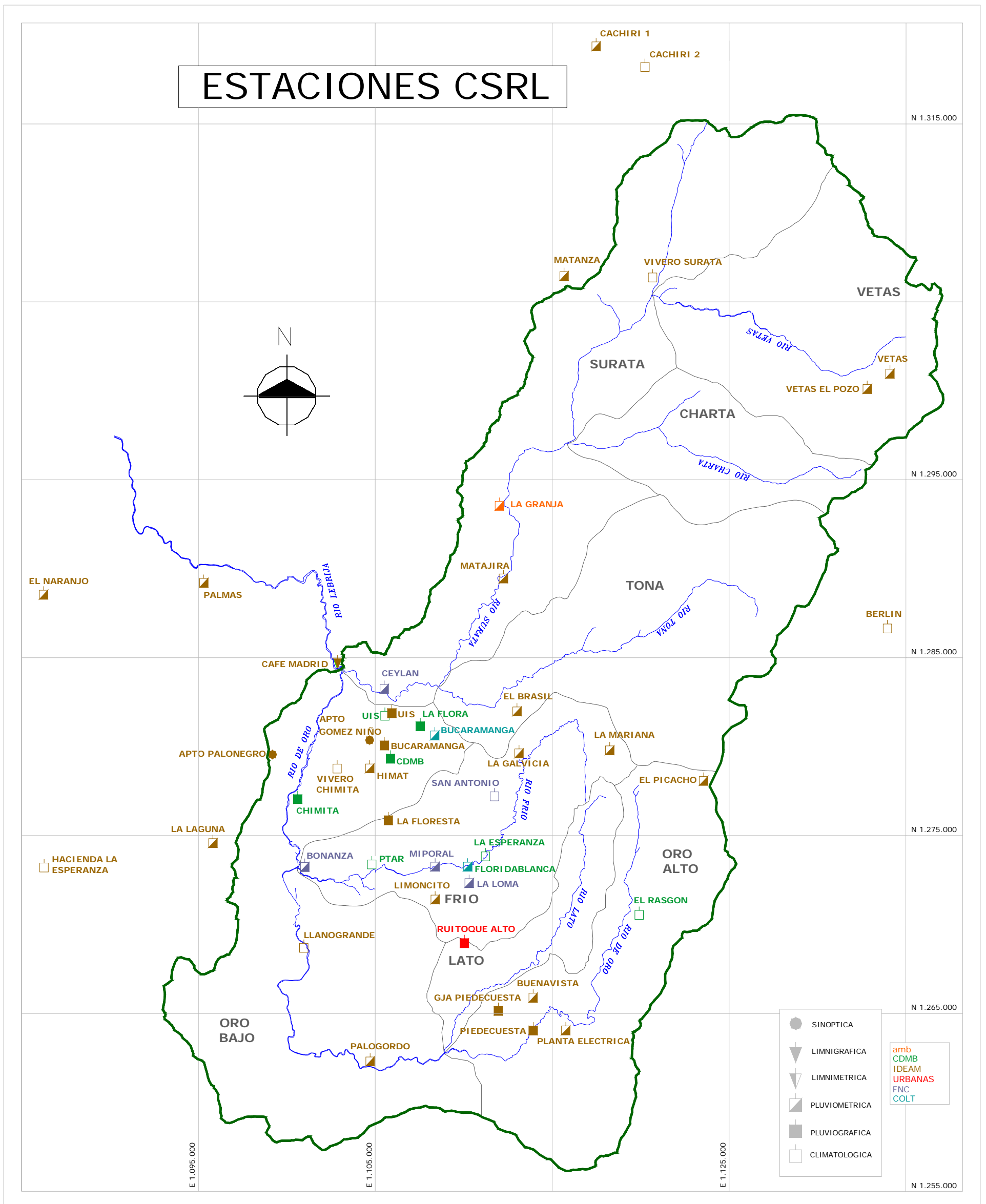


Figura 1.4 Estaciones Seleccionadas

Fuente: CERS (Guzmán et al, 2003) y modificado por los autores (2006)

1.4.2 Medición De Caudal

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1999).

Para llevar a cabo la investigación se utilizó la información de caudales medios diarios en la CSRL en su punto de cierre (estación Café Madrid) en el periodo 1970-2000.

La estación Café Madrid es una estación limnigráfica instalada y operada por el IDEAM desde diciembre de 1968, con localización geográfica $07^{\circ} 10'$ de Latitud Norte y $73^{\circ} 09'$ de Longitud Oeste, en el municipio de Girón situada en el barrio El Túnel, perteneciente a la zona de Café Madrid al norte de la ciudad de Bucaramanga, esta ubicada sobre el Río Lebrija a pocos metros aguas abajo de la unión de los cauces de los ríos de Oro y Surata, con una altura de 600 m.s.n.m.



Figura 1.5 Estación Café Madrid

Fuente: Los Autores (2006)

Capítulo 2

Procesamiento y Análisis de la Información

A efecto de determinar los periodos secos en la cuenca, se determino la precipitación media de la cuenca a nivel diario, utilizando algoritmos de espacialización (distancia inversa al cuadrado), tomando como base la información de precipitación total diaria en 50 estaciones distribuidas en la cuenca o en cercanía de ella. La espacialización de la precipitación fue evaluada en un GRID de 50x50 metros, desarrollado a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM).

2.1 Desarrollo del Modelo Digital de Elevaciones – DEM

Para la creación del modelo digital de elevación de la CSRL que se muestra en la Figura 2.2, se hizo necesario llevar a cabo una secuencia de tareas que permitiera una representación aproximada de la topografía de la cuenca y sus alrededores.

Los pasos para el desarrollo del DEM de la CSRL pueden abreviarse en:

- Obtención de archivos digitales
- Revisión y ajuste de la información cartográfica
- Selección del método de interpolación
- Implementación del modelo digital de elevación

Para la construcción del DEM se utilizaron planchas cartográficas en formato .dwg (ACAD, Autodesk®) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:25000 suministradas por el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) UIS y descritas en la Tabla 2.1 y se esquematizan en la Figura 2.1.

Tabla 2.1 Coordenadas Cartografía INAC

Plancha IGAC	Coordenadas			
	Este		Norte	
	Mínimo	Máximo	Minino	Máximo
109-II-A	1090000	1105000	1310000	1320000
109-II-B	1105000	1120000	1310000	1320000
109-II-C	1090000	1105000	1300000	1310000
109-II-D	1105000	1120000	1300000	1310000
109-IV-A	1090000	1105000	1290000	1300000
109-IV-B	1105000	1120000	1290000	1300000
109-IV-C	1090000	1105000	1280000	1290000
109-IV-D	1105000	1120000	1280000	1290000
110-I-A	1120000	1135000	1310000	1320000
110-I-C	1120000	1135000	1300000	1310000
110-I-D	1135000	1150000	1300000	1310000
110-III-A	1120000	1135000	1290000	1300000
110-III-B	1135000	1150000	1290000	1300000
110-III-C	1120000	1135000	1280000	1290000
110-III-D	1135000	1150000	1280000	1290000
120-II-A	1090000	1105000	1270000	1280000
120-II-B	1105000	1120000	1270000	1280000
120-II-C	1090000	1105000	1260000	1270000
120-II-D	1105000	1120000	1260000	1270000
120-IV-A	1090000	1105000	1250000	1260000
120-IV-B	1105000	1120000	1250000	1260000
121-I-A	1120000	1135000	1270000	1280000
121-I-B	1135000	1150000	1270000	1280000
121-I-C	1120000	1135000	1260000	1270000
121-I-D	1135000	1150000	1260000	1270000
121-III-A	1120000	1135000	1250000	1260000

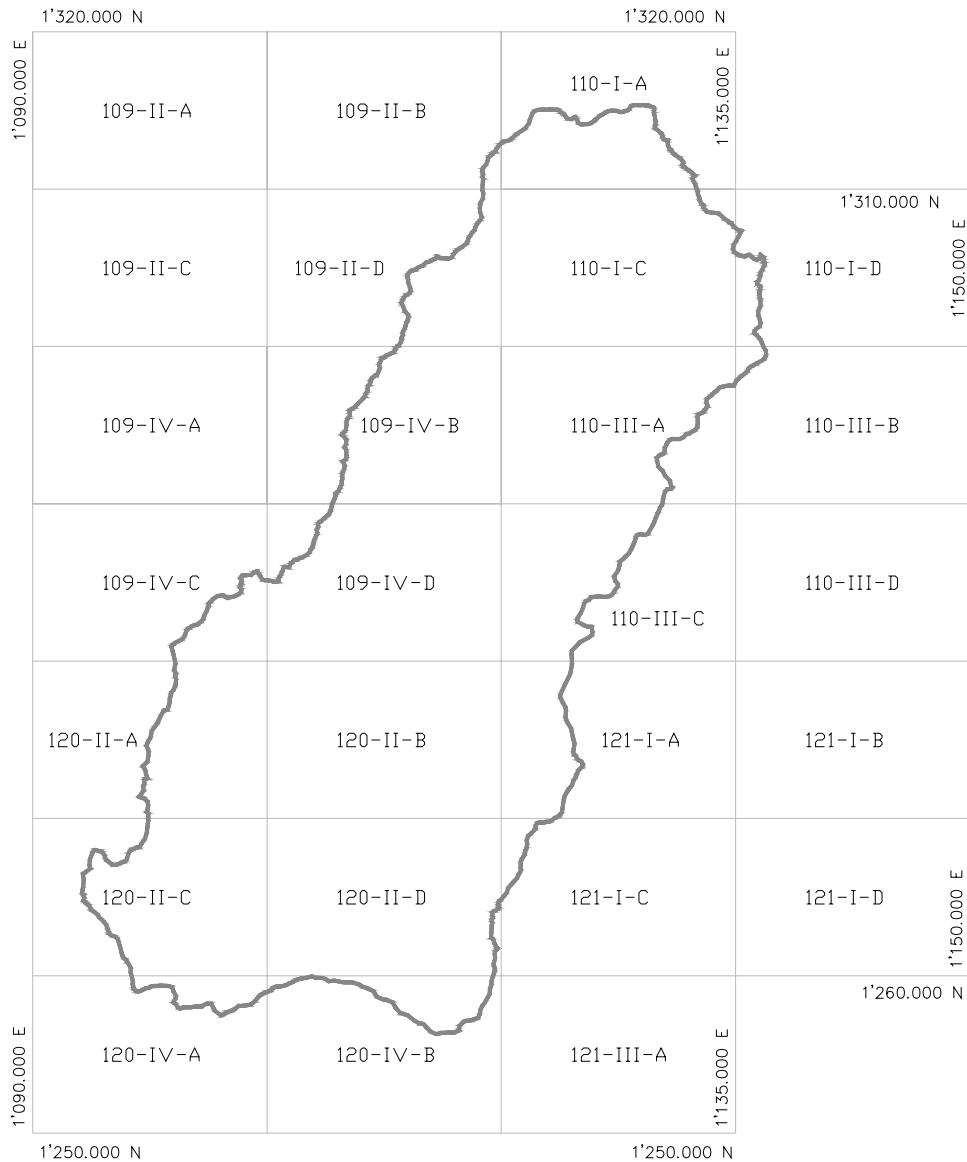


Figura 2.1 Esquema de la cartografía

Fuente: los autores

Como primer paso de la revisión se comprobó que la información digital coincidiera con las planchas originales del IGAC.

Se realizó el pegado de las planchas cartográficas, asegurándose de no dejar curvas de nivel sueltas además de tener los formatos completamente limpios puesto que alguna información adicional se encuentra a diferente escala.

El DEM se desarrollo en el programa SURFER que trabaja en base a archivos .GRID, por este motivo se hizo necesario el uso de una herramienta de software llamada SPELL-Map (GUZMAN, 2003) cuyo objetivo es extraer los datos referentes a las coordenadas espaciales propias de cada polilínea, es decir, sacar todos los puntos que conforman dicha polilínea como parejas espaciales (x,y,z) desde un archivo base .dxf y agruparlas en un archivo .txt el cual queda listo para ser procesado por el programa SURFER.

El método de interpolación usado fue Radial Basis debido a que fue el método que mejor se ajusto al relieve del terreno. Para obtener el área de la cuenca se hizo necesario convertir el modelo obtenido a un archivo compatible con el programa SPELL-Map ya que este programa permite corregir los errores en el llenado de la grilla (PITS), con el modelo corregido se separo el área de la cuenca de resto del modelo (mascara de la CSRL, ver Anexo 3), el cual sirve como base para realizar la espacialización de la precipitación, luego esta mascara base se convirtió a un archivo compatible con el software SURFER para obtener el modelo digital de elevación de la cuenca presentado en la Figura 2.2.

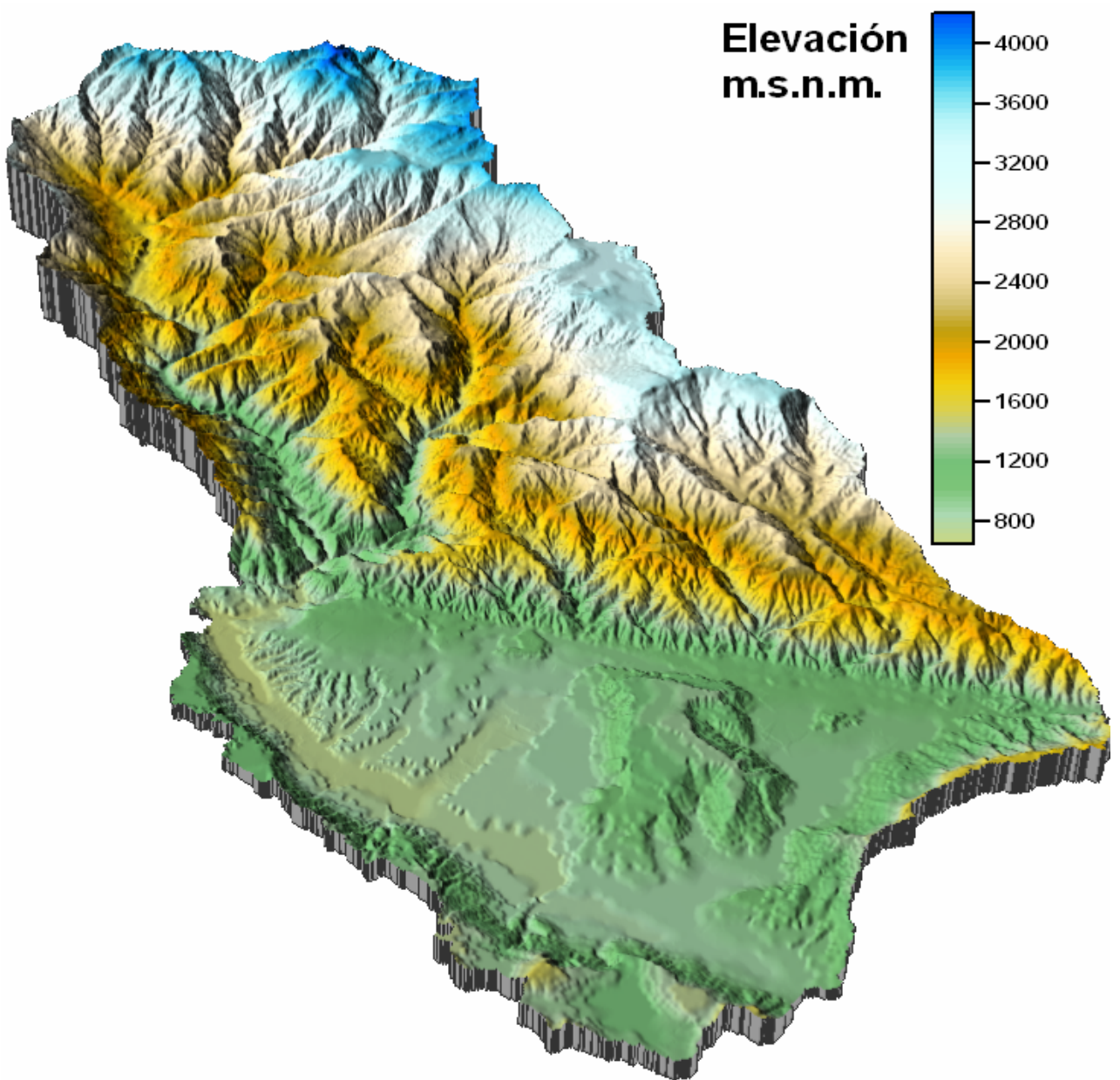


Figura 2.2 Modelo Digital de Elevación de la CSRL con GRID de 50 x 50 m

Fuente: Los Autores (2006)

2.2 Espacialización de la Precipitación

Para conocer los periodos de no lluvia se hizo necesaria la obtención de la precipitación media diaria sobre la cuenca en el periodo de 1970-2000, para esto fue indispensable espacializar la precipitación con una resolución temporal diaria.

Dado que en algunos periodos de tiempo no se tiene registro de precipitación en todas las estaciones, se realizo una matriz o una relación de estaciones - tiempo con resolución temporal mensual, mostrada en el Anexo 2, que permitió visualizar que en todos los periodos de tiempo se contaba con una numero admisible de estaciones para llevar a cabo una obtención aceptable de la precipitación media diaria de la cuenca mediante la espacialización.

Inicialmente se organizo la información diaria de la precipitación en forma matricial, es decir para cada día se proporciono el valor del registro de lluvia que presento cada estación, en la Figura 2.3 se aprecia con mas claridad un segmento de la matriz construida en la herramienta de Spell-SDM (Guzmán, 2006).

DATE	Aeropuerto_	Aeropuerto_	Berlin	Bonanza	Bucaramanga	Bucaramanga	Buenavista
FECHA	Apto_Gomez	Apto_Palome	Berlin	Bonanza	Bucaramanga	Bucaramanga	Buenavista
25569	0.00	ND	0.00	DF	0.00	ND	0.00
25570	0.00	ND	0.00	DF	0.00	ND	0.00
25571	0.00	ND	0.00	DF	0.00	ND	0.00
25572	7.60	ND	0.00	DF	11.00	ND	6.00
25573	0.00	ND	0.00	DF	7.00	ND	0.00
25574	0.00	ND	0.00	DF	0.00	ND	0.00
25575	0.00	ND	0.00	DF	0.00	ND	0.00
25576	0.00	ND	0.00	DF	0.00	ND	0.00
25577	5.00	ND	0.00	DF	0.00	ND	0.00
25578	5.00	ND	0.00	DF	1.50	ND	0.00

Figura 2.3 Matriz de espacialización de precipitación. SDM

El programa (Spell-SDM) generó los archivos diarios donde se agrupaban las estaciones con su respectivo registro de precipitación (12600 archivos .txt), con estos archivos generados se procedió a hacer la espacialización diaria en el software Surfer.

El método de interpolación de Kriging, en estudios anteriores, arrojó resultados aceptables en la distribución de la precipitación anual y mensual basada en información de 28 estaciones en el periodo de registro de 1986-2000 sin embargo se observó menor continuidad en la zona de mayor pluviosidad, esto se podría mejorar teniendo más información y aplicando otros métodos de interpolación (Maradei, Rojas, 2002).

A raíz de esto se optó por probar otros métodos de interpolación, siendo el más acertado el método de Distancia Inversa al Cuadrado ya que este se ubicaba en el rango de valores de precipitación media multianual de la cuenca de 1217 a 1288 mm/año, (Gómez, S, Colegial, J, 2003), como se muestra en la Tabla 2.2 aunque no representa la difusión real de la precipitación puesto que este la asume de forma radial, lo que se ve representado en los círculos de la Figura 2.4b.

Tabla 2.2 Interpolador de la precipitación media anual del año 1970

Interpolador	Precipitación media multianual (mm/año)
Radial Basis	2532
IDP 2	1280
IDP 3	1403
Kriging	1050

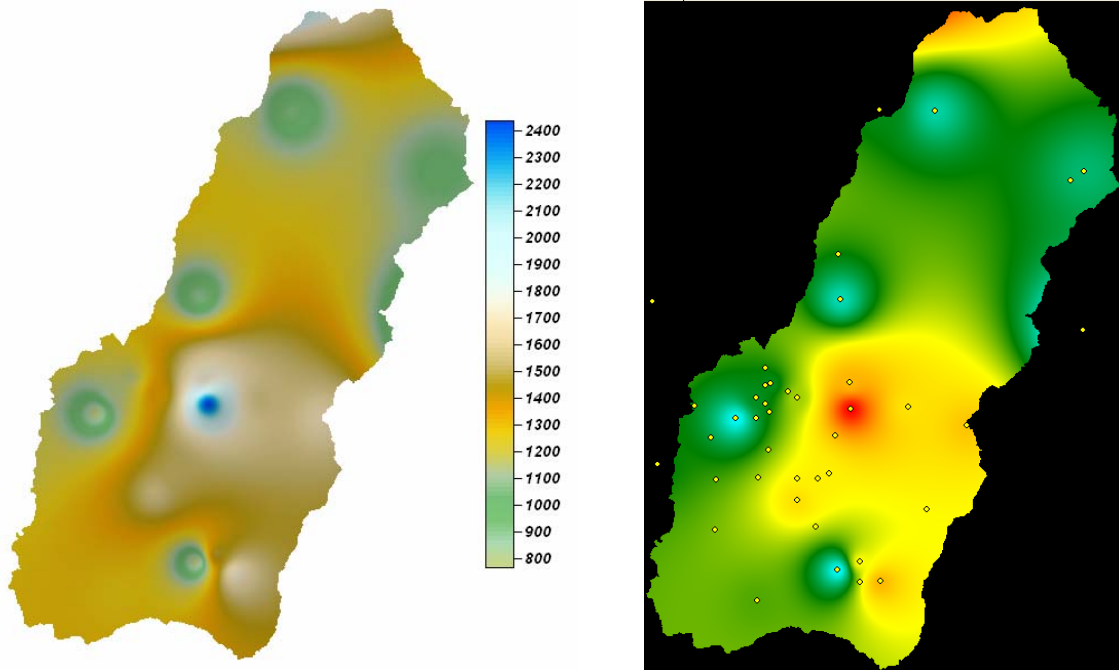


Figura 2.4 Espacialización de la precipitación Media Anual año 1970

a) Mapa de espacialización, Surfer

b) Mapa de espacialización, Spell-Map

2.3 Consistencia y Homogeneidad de Datos de Caudales

Las series de tiempo hidrológicas están caracterizadas por dos componentes: la componente determinística y la componente estocástica. La componente determinística esta caracterizada por presentar tendencia y periodicidad (variaciones temporales y cíclicas). La tendencia es causada por inconsistencia y no-homogeneidad en la serie de tiempo. La no-homogeneidad resulta de cambios naturales o antrópicos en el ambiente durante el periodo de registro. Cambios climáticos y cambios en el uso del suelo puede causar no-homogeneidad en la serie de tiempo. Por otro lado, las inconsistencias resultan de los cambios en la cantidad de errores sistemáticos asociados a la medición de los datos durante los periodos de observación (Hall, 2002). Las inconsistencias pueden ser atribuidas a los errores de lectura y registros por parte del observador, fallas en los

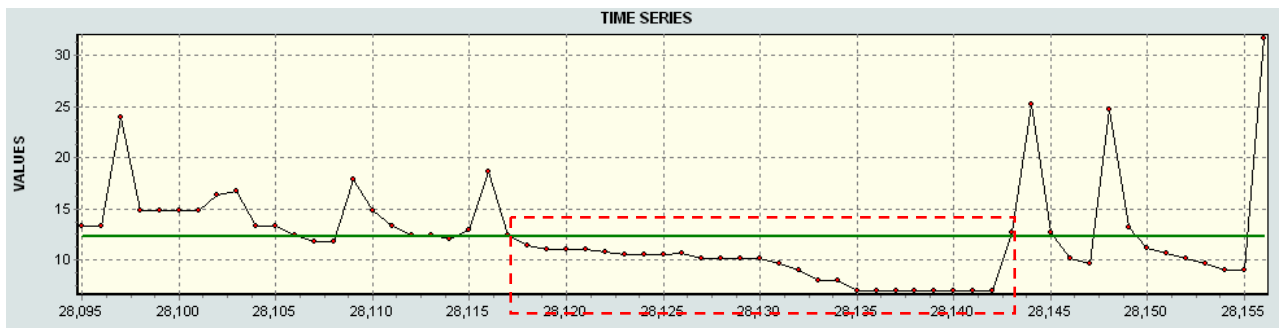
instrumentos y cambios en el procedimiento y lugar de calibración. (Guzmán, et al 2004).

Analizar las series de tiempo es tener en cuenta las características de los datos que describen el contenido, la calidad, la condición y otras generalidades de los datos (metadatos); en esta investigación no se realizó corrección de consistencia y homogeneidad en los datos de caudales debido a la falta de información.

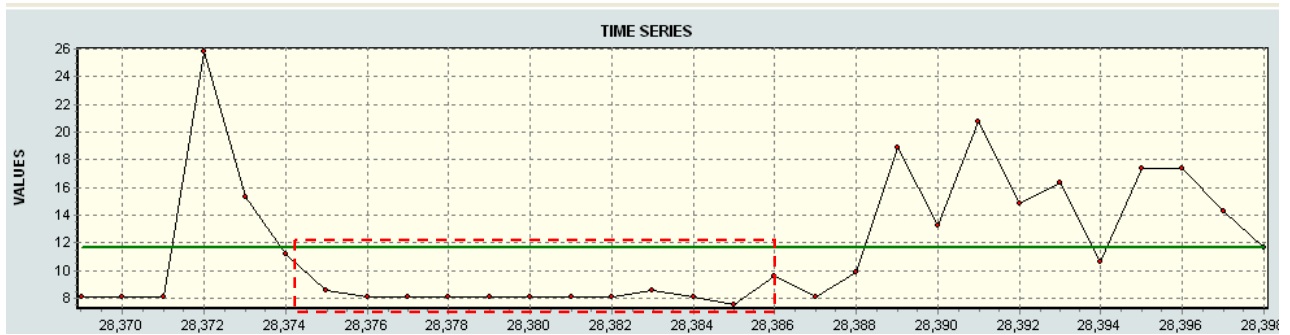
En la investigación se analizaron series de tiempo con una resolución temporal diaria, en las cuales se pudo apreciar inconsistencias en los datos de caudales posiblemente por problemas de vaciado que presentan el limnigrafo por obstrucción debido a la gran cantidad de sedimentos que transporta el río.

En la Figura 2.5 se muestran series de caudales con resolución temporal diaria las cuales muestran gráficas que presentan dificultades en las mediciones posiblemente a la incapacidad del instrumento de medición (Limnigrafo) en registrar valores de menores de caudales.

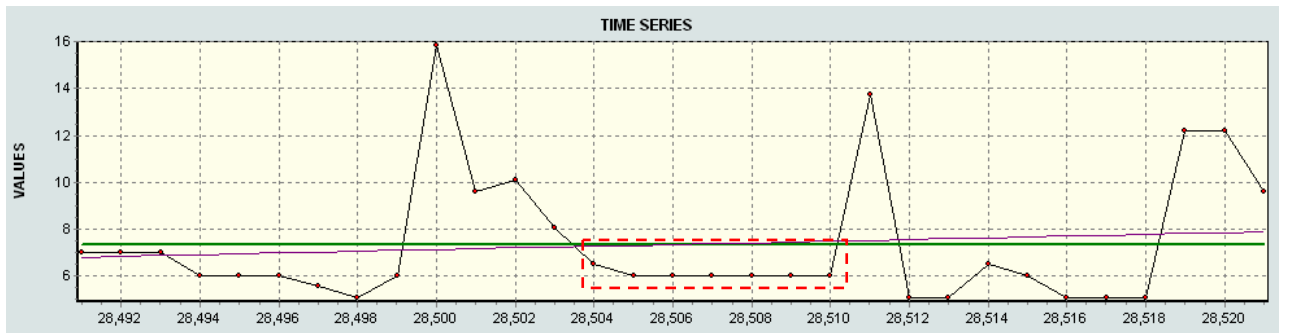
Enero- Febrero 1976



Septiembre 1977



Enero 1978



Diciembre 2000

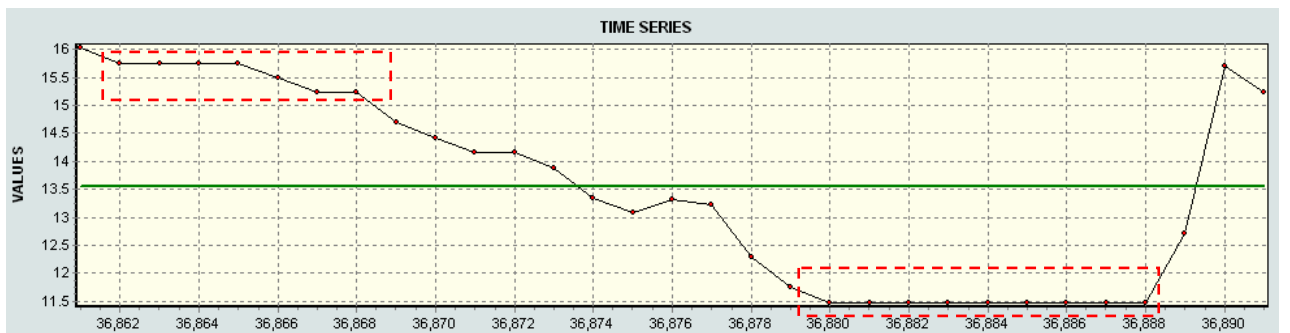


Figura 2.5 Serie de tiempo con problemas de vaciado

Fuente: Los Autores (2006)

Capítulo 3

Separación de Flujo Base

El caudal base se define como el escurrimiento subterráneo, que se produce bajo el nivel freático, que de manera mas lenta llega hasta la salida de la cuenca alimentando las corrientes cuando no se presentan eventos de lluvias sobre la cuenca; también se conoce como el caudal que se presenta antes, durante y después de la adición del volumen precipitado (escorrentía superficial), esto considera al agua que se introduce a la corriente por precipitaciones anteriores (escorrentía subsuperficial) o bien por la infiltración de agua desde los acuíferos a la corriente (flujo subterráneo), entonces el “flujo base es considerado como el resultado de la descarga del agua subterránea en la corriente del río, mientras la escorrentía directa es considerada como el resultado del flujo superficial o cercano a la superficie” (Chapman, 1999).

Identificar y separar el flujo base es incierto ya que depende de la compleja interacción de cuenca que genera la respuesta subsuperficial (rápida y lenta) y de superficie. Interesados en entender el proceso por el cual la precipitación se convierte en corrientes de agua, han usado rastreadores para determinar la proporción de variación en el tiempo de flujos lentos y flujos rápidos.

Desde finales del siglo XIX Boussinesq (1877) había llevado a cabo estudios en acuíferos que permitieron asociar la respuesta hidrológica de subsuperficie en un río a la respuesta de tanque lineal simple (SLR), pero este modelo no es suficiente para describir adecuadamente la respuesta subsuperficial en algunas cuencas, especialmente aquellas en donde se muestra una respuesta de tipo no lineal. (Chapman, 1999)

Normalmente se ha entendido en la ingeniería hidrológica que el flujo base corresponde al caudal proveniente de la “respuesta lenta” de los acuíferos, sin embargo la incorporación de “flujo rápido” provenientes probablemente de

acuíferos libres poco profundos es importante y significativo desde el punto de vista de caudal aportado. La introducción del termino “edad del agua” (Schöninger, 1990; Chapman y Maxwell, 1996) puede ayudar a dar claridad a que se entiende por flujo base en este trabajo; entendiéndose este como la incorporación de las “aguas viejas” que son forzadas a incorporarse a los ríos durante el proceso de precipitación, donde el “agua vieja” es entendida como aquella agua almacenada en los acuíferos producto de eventos de precipitación anteriores. (Chapman, 1999)

3.1 Curva Maestra de Recesión

La separación del flujo base de una corriente hidrográfica inicia con la identificación de los puntos en los cuales el escurrimiento directo comienza y finaliza. El punto de inicio del escurrimiento directo (escurrimiento directo es el agua que proviene del evento de lluvia, durante o cuando ya ha transcurrido algún tiempo después de que acabo de llover) es fácilmente reconocido puesto que es el tiempo en que el flujo empieza a incrementarse, mientras los puntos de finalización o de terminación del escurrimiento directo se suele tomar como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión (Aparicio, 1987)

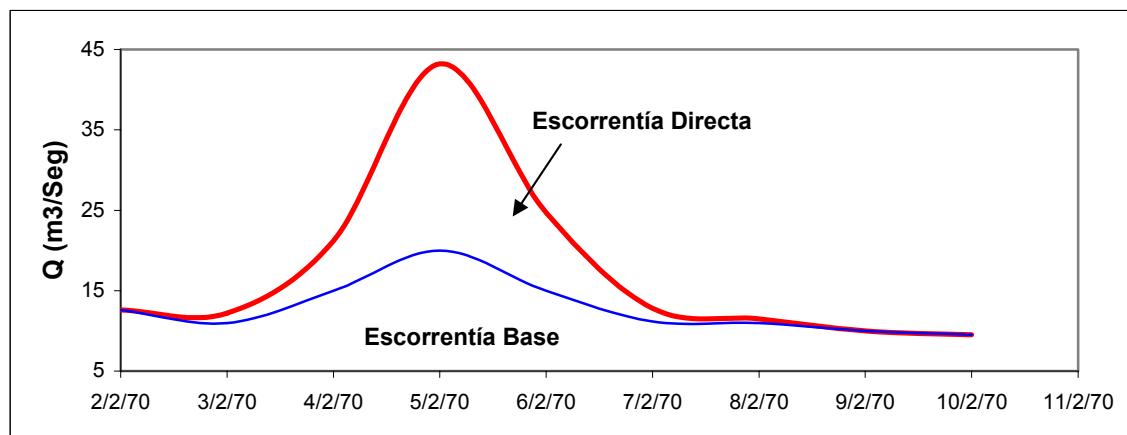


Figura 3.1 Componentes del Hidrograma

Es muy difícil conocer con precisión el punto final del escurrimiento directo de un hidrograma, esto hace que la separación del flujo base del directo no sea una labor sencilla, con el fin de determinar el escurrimiento directo se analizan varios hidrogramas y se seleccionan aquellos tramos en donde solo existe escurrimiento base, estos tramos seleccionados se dibujan posteriormente en papel semilogarítmico de tal forma que sus extremos inferiores sean tangentes a una línea, esta línea resultante se conoce como curva maestra de recesión. El punto final del escurrimiento directo del hidrograma se localiza suponiendo la curva maestra de recesión dibujada en papel aritmético a la misma escala que el hidrograma con la curva de recesión del hidrograma. El punto final del escurrimiento se encuentra donde ambas líneas se separa. La pendiente de la línea resultante de la curva maestra de recesión corresponde al valor de la constante de recesión k .

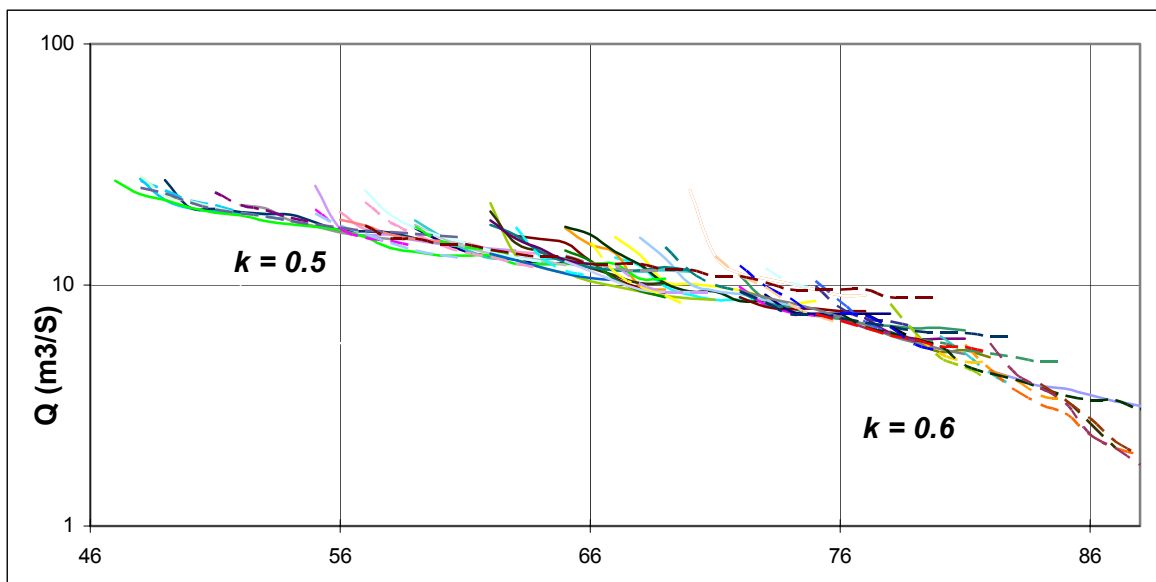


Figura 3.2 Curva maestra de recesión

En estudios anteriores de curvas maestra de recesión se estableció relación entre los parámetros físicos e hidrogeológicos para las subcuencas Río Surata Alto, Frío Alto, Vetas, Tona Alto, Proandes, Oro Alto, Subcuencas pertenecientes a la CSRL (Niño, Garzón, 2003); Al realizar la curva maestra de recesión de los datos de la

estación Café Madrid, punto donde convergen los diferentes procesos hidrológicos que se presentan en la cuenca, no podríamos basarnos en los datos obtenidos en el estudio mencionado anteriormente, además los datos con los que se cuentan presentan inconvenientes, como se explico en el numeral 2.3 por esto se pueden observar en la curva dos pendientes.

Una vez identificado el punto final del escurrimiento directo resta trazar la línea de separación entre el flujo base y el directo, para este propósito existen varias metodologías que se explican a continuación.

3.2 Métodos de Separación de Flujo Base

Se han desarrollado varios métodos de separación entre las cuales se hallan los métodos gráficos y los métodos de algoritmo.

❖ Métodos Gráficos:

- Método de la línea recta
- Método de las Dos Líneas Rectas
- Método de la Línea curva

Estos métodos no son la mejor herramienta para realizar separación de flujo base ya que no tienen en cuenta los parámetros físicos de la cuenca, pero pueden dar resultados con buena aproximación de forma especial en tormentas pequeñas ya que no necesitan datos históricos sino únicamente la información del evento a estudiar. En general subestiman el volumen del flujo base (Aparicio, 1987).

❖ Métodos de Intervalo:

- Método de Intervalo Fijo
- Método del Intervalo Desplazado

- Método del Mínimo Local

Los métodos son presentados por la USGS en el programa HYSEP (Sloto y Croase, 1996), solo tiene en cuenta algunos parámetros físicos de la cuenca como el área, además trabajan cualquier tipo de tormenta; la inconveniencia de estos métodos es que solo trabajan hidrogramas diarios de los cuales se deben tener información histórica.

3.2.1 Métodos de Algoritmos

La separación de flujo base en registros históricos de caudales requieren el desarrollo de algoritmos que permitan llevar a cabo este cálculo en el largo plazo. Estos métodos permiten dar una estimación mejor del flujo base ya que tienen en cuenta el comportamiento del flujo base similar al hidrograma y además permiten hacer la separación para cualquier tipo de evento.

Chapman (1999), Wittenberg (1999), llevan a cabo un detallado desarrollo histórico de las curvas de agotamiento, de la evolución de los modelos y ecuaciones que describen la respuesta de flujo base para eventos aislados.

Chapman (1999) presenta tres ecuaciones que permiten determinar la componente de flujo base en función de uno, dos y tres parámetros, por su parte Smakhtin (2001) presenta un filtro digital de separación que establece la componente de escorrentía directa con base en dos parámetros.

3.2.1.1 Algoritmo de Un Parámetro

Lyne y Hollick en 1979 aparentan haber sido los primeros en sugerir el uso de un filtro digital, el cual fue usado en Australia. Chapman (1990-199) demostró que la forma del filtro demostraba que el flujo base fuese constante cuando no se presentara escorrentía directa, y propuso una reformulación, la cual fue subsecuentemente simplificada (Chapman y Maxwell, 1996), a una forma que esta basada en que el flujo base es un simple promedio entre el escurrimiento directo y el flujo base en el intervalo de tiempo anterior, es decir:

$$Q_{b(i)} = kQ_{b(i-1)} + (1-k)Q_{d(i)} \quad (1)$$

Donde $Q_{b(i)}$ y $Q_{d(i)}$ representan el flujo base y la escorrentía directa respectivamente, en el intervalo de tiempo i , y el parámetro k es la constante de recesión durante el periodo donde no se presentó escorrentía directa. Como el total del flujo del río Q es la suma del flujo base Q_b y escorrentía directa Q_d , entonces se tiene:

$$Q_{b_i} = \frac{k}{2-k} Q_{b_{i-1}} + \frac{1-k}{2-k} Q_i \quad (2)$$

Condicionada por: $Q_{b(i)} \leq Q_{(i)} \quad (3)$

3.2.1.2 Algoritmo de Dos Parámetros

Desarrollado por Boughton en 1993 es un modelo que provee mayor flexibilidad al introducir un segundo parámetro C , que reemplaza a $(1-k)$ en la ecuación (2), aunque la determinación de este parámetro C es subjetivo, ya que el valor es determinado por medio de la variación de este, hasta que el modelo se ajuste con el hidrograma en la parte final del escurrimiento directo. Es el mismo algoritmo usado en el modelo AWBM.

$$Q_{b_i} = \frac{k}{1+C} Q_{b_{i-1}} + \frac{C}{1+C} Q_i \quad (4)$$

Esta ecuación esta condiciona a la ecuación (3)

3.2.1.3 Algoritmo de Tres Parámetros

Es la forma generalmente elegida del modelo lineal de IHACRES (Jakeman y Hornberger, 1993) y se basa en que el exceso de lluvia μ es dividido en componentes lento y rápido, nombrados Q_b y Q_d

$$\begin{aligned} Q_{b(i)} &= \beta_s \mu_{(i)} - \alpha_s Q_{b(i-1)} \\ Q_{d(i)} &= \beta_q \mu_{(i)} - \alpha_q Q_{d(i-1)} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde los α y β son parámetros y los sufijos q y s se refieren al flujo rápido y lento respectivamente, cabe notar que las α son negativas

Eliminado el exceso de lluvia μ de estas ecuaciones, y expresado la escorrentía directa como la diferencia entre el flujo base Q_b y la descarga total del río Q_d , da como resultado la siguiente ecuación de flujo base:

$$Q_{b(i)} = -\frac{\alpha_s \beta_q + \alpha_q \beta_s}{\beta_q + \beta_s} Q_{b(i-1)} + \frac{\beta_s}{\beta_q + \beta_s} [Q_{(i)} + \alpha_q Q_{(i-1)}] \quad (6)$$

Ha de notarse que Q en esta ecuación corresponde al flujo modelado en lugar del flujo observado.

Reemplazando $C = \frac{\beta_s}{\beta_q}$ $k = -\alpha_s - \alpha_q \frac{\beta_s}{\beta_q}$ en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Q_{b(i)} = \frac{K}{1+C} Q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} (Q_{(i)} + \alpha_q Q_{(i-1)}) \quad (7)$$

3.2.1.4 Algoritmo de Smakhtin

La diferencia principal entre este algoritmo y los tres anteriores es que este halla la componente de escorrentía directa y obtiene el flujo base entre la diferencia del total del río y el valor de escorrentía obtenido.

$$q_i = \alpha q_{i-1} + \beta(1 + \alpha)(Q_i - Q_{i-1}) \quad (8)$$

$$QB_i = Q_i - q_i \quad (9)$$

Donde:

$Q_i = \text{Flujo Total}$

$q_i = \text{Escorrentía Directa Calculada}$

$QB_i = \text{Flujo Base Calculado}$

$i = \text{Intervalo de Tiempo}$

$\alpha, \beta = \text{Parametros de Separación} (0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 0.50)$

La componente de flujo base (QB_i) nunca debe ser menor que cero ni mayor que el flujo total (Q_i). El parámetro α condiciona el volumen de flujo base, con valores altos resulta relativos volúmenes bajos de flujo base y valores bajos de α generan altas proporciones de flujo base con relación al flujo total. La cantidad de flujo base resulta de un valor específico del parámetro α que es muy dependiente de la forma de las variaciones naturales del hidrograma.

3.2.2 Método Isotópico

Otro método para la separación de flujo base es la utilización de trazadores de precipitación como los isótopos estables ^{18}O y ^2H (Deuterio), estos se utilizan debido a la gran ventaja que presentan al ser átomos componentes de la molécula de agua (H_2O), y no sustancias ajenas agregadas a esta, por la cual se les conocen como trazadores naturales.

El agua durante cada etapa del ciclo hidrológico, presenta pequeñas variaciones en su concentración isotópica. Donde estas variaciones son tan únicas que proveen una firma isotópica característica.

En el agua que se convierte en recarga de un acuífero su concentración de ^{18}O y ^2H depende de su estado anterior, desde que parte del océano hasta que queda

fuera de la influencia del medio exterior, por haberse percolado alcanzado los niveles freáticos. El agua percolada no esta dispuesta a cambios de estado por esto su concentración de ^{18}O y ^2H no varia con el tiempo, salvo en los casos de mezclas con aguas de distintas concentraciones.

Los ríos más pequeños responden más rápidamente a los cambios en la composición isotópica de la precipitación que los ríos grandes. Ya que la composición isotópica de los ríos pequeños varían sustancialmente con la mezcla de este con el agua lluvia. Esto se debe a que el componente de la escorrentía superficial en el caudal es más directo y prominente (Ronzaski et al, 2002).

La separación de flujo en dos componentes (escorrentía superficial y flujo base) se basa en la continuidad hidráulica (Clark y Fritz, 1997)

$$Q_T = Q_s + Q_0 \quad (10)$$

Donde Q_T representa la escorrentía total, Q_s la componente de escorrentía superficial y Q_0 la componente del flujo base. También se utiliza el balance de masas, por lo cual se puede relacionar las concentraciones de los isótopos estables:

$$Q_T \delta_t = Q_s \delta_s + Q_0 \delta_0 \quad (11)$$

Donde Q_T , Q_0 , Q_s , son la escorrentía total, flujo base y escorrentía superficial respectivamente. δ_T , δ_0 , δ_s , son la desviación isotópica de la escorrentía total, del flujo base y de la escorrentía superficial (que está representada por la desviación isotópica de la precipitación) respectivamente.

Despejando las ecuaciones (8) y (9) obtenemos:

$$Q_s = Q_T - Q_0 \quad (12)$$

$$Q_0 = \frac{Q_T \delta_T - Q_s \delta_s}{\delta_0} \quad (13)$$

Reemplazando la ecuación (10) en (11), tenemos:

$$Q_0 = \frac{Q_T (\delta_T - \delta_s)}{\delta_0 - \delta_s} \quad (14)$$

3.3 Aplicación de los Métodos de Algoritmos de Separación

La separación de flujo para la serie histórica de caudales se llevo a cabo mediante los métodos de algoritmos de separación ya que estos dan al flujo base un comportamiento similar al del hidrograma y no un comportamiento lineal como los métodos gráficos y de intervalo.

Antes de llevar a cabo la separación de flujo base se determino la constante de recesión k la cual se hallo determinando la curva maestra de recesión con el procedimiento indicado en el numeral 3.1; tomando como valor base $k = 0.6$ ya que la calibración se realizo utilizando periodos secos.

Como los parámetros en los tres algoritmos de separación debían ajustarse hasta que la separación en la curva de recesión se aproximara a la escorrentía total sin que el valor del flujo base supere al de la escorrentía total se hizo necesario desarrollar un programa computacional (SPELL- BFS, Guzmán, 2006) para aplicar y mostrar el ajuste en la serie de tiempo.

3.3.1 Algoritmo de Un Parámetro

El valor de la constante k debe ser variado en la ecuación de este método para su ajuste, por esto se tomaron eventos con periodos de no lluvia de mas de 5 días, iniciando con el valor de $k = 0.6$.

En la Tabla 3.1 se presenta un cálculo de la obtención del flujo base en un periodo de 12 días y en la Figura 3.3 se muestra la separación del hidrograma.

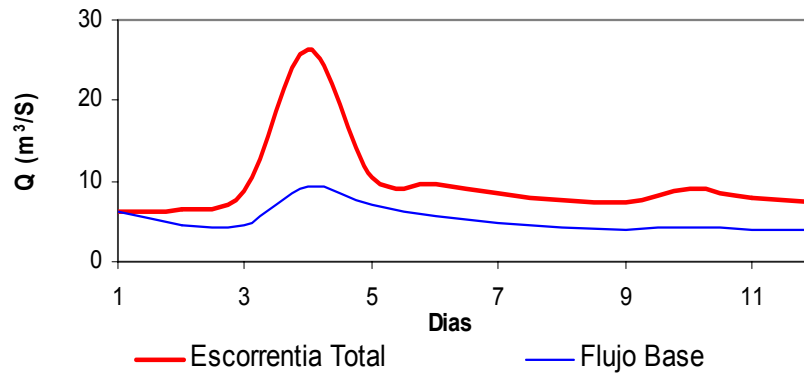


Figura 3.3 Separación del hidrograma por algoritmo de Un parámetro

Tabla 3.1 Separación del evento por algoritmo de Un parámetro.

Fecha	T (días)	P (mm/día)	Q _T (m ³ /seg)	Q _B (m ³ /seg)	% Q _T
10/01/1973	1	0.4	6.30	6.30	100.00
11/01/1973	2	3.3	6.60	4.59	69.48
12/01/1973	3	6.9	8.90	4.51	50.65
13/01/1973	4	3.5	26.40	9.47	35.89
14/01/1973	5	0.1	10.40	7.03	67.62
15/01/1973	6	0.0	9.60	5.76	59.96
16/01/1973	7	0.0	8.40	4.87	57.94
17/01/1973	8	0.2	7.60	4.26	56.02
18/01/1973	9	2.7	7.40	3.94	53.23
19/01/1973	10	1.7	9.10	4.29	47.12
20/01/1973	11	0.9	7.90	4.09	51.83
21/01/1973	12	3.6	7.40	3.87	52.29

Volumen de Escorrentía = 10`022.400 m³

Volumen de Flujo base = 5`440.873 m³

% de Flujo base = 54.29 %

3.3.2 Algoritmo de Dos Parámetros

Con base en el valor de $k = 0.6$ obtenido de la curva recesión, se inicia la obtención del parámetro C mediante la calibración del la ecuación de dos parámetros, este ajuste arrojó un valor de $C = 0.9$.

En la Tabla 3.2 se presenta un cálculo de la obtención del flujo base en un periodo de 12 días y en la Figura 3.4 se muestra la separación del hidrograma.

Tabla 3.2 Separación del evento por algoritmo de Dos parámetros.

Fecha	T (días)	P (mm/día)	Q _T (m ³ /seg)	Q _B (m ³ /seg)	% Q _T
10/01/1973	1	0.4	6.3	6.30	100.00
11/01/1973	2	3.3	6.6	5.12	77.51
12/01/1973	3	6.9	8.9	5.83	65.52
13/01/1973	4	3.5	26.4	14.35	54.34
14/01/1973	5	0.1	10.4	9.46	90.93
15/01/1973	6	0.0	9.6	7.53	78.48
16/01/1973	7	0.0	8.4	6.36	75.69
17/01/1973	8	0.2	7.6	5.61	73.79
18/01/1973	9	2.7	7.4	5.28	71.30
19/01/1973	10	1.7	9.1	5.98	65.68
20/01/1973	11	0.9	7.9	5.63	71.26
21/01/1973	12	3.6	7.4	5.28	71.39

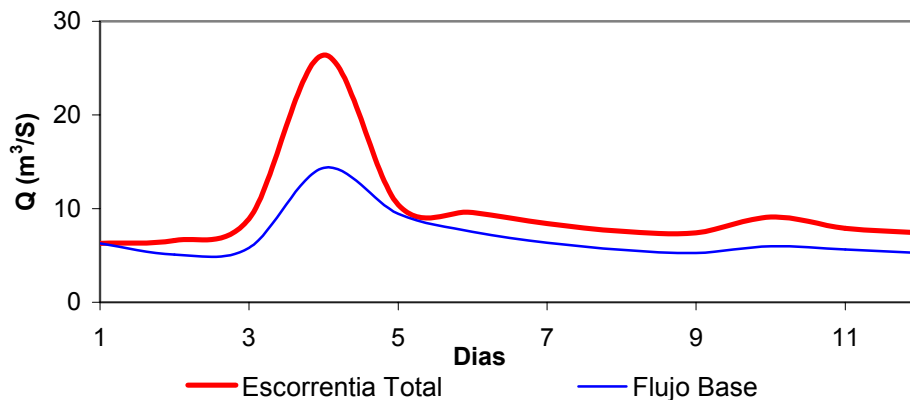


Figura 3.4 Separación del hidrograma por algoritmo de Dos parámetros

Volumen de Escorrentía = 10`022.400 m³

Volumen de Flujo base = 7`414.902 m³

% de Flujo base = 73.98%

3.3.3 Algoritmo de Tres Parámetros

Este algoritmo no usa parámetros k y C , en lugar de estos trabaja con índices de cuantificación del flujo lento y rápido, estos parámetros son también hallados mediante calibración del algoritmo.

Los parámetro obtenidos después del ajuste $\alpha_q = -0.05$, $\alpha_s = -0.97$, $\beta_q = 16$, $\beta_s = 1.30$, están aplicados en un periodo de 12 días que se presenta en la Tabla 3.3 y en la Figura 3.5 se muestra la separación del hidrograma.

Tabla 3.3 Separación del hidrograma por algoritmo de Tres parámetros

Fecha	T (días)	P (mm/día)	Q_T (m ³ /seg)	Q_B (m ³ /seg)	% Q_T
10/01/1973	1	0.4	6.3	6.30	100.00
11/01/1973	2	3.3	6.6	6.15	93.15
12/01/1973	3	6.9	8.9	6.18	69.46
13/01/1973	4	3.5	26.4	7.52	28.48
14/01/1973	5	0.1	10.4	7.46	71.70
15/01/1973	6	0.0	9.6	7.40	77.08
16/01/1973	7	0.0	8.4	7.26	86.44
17/01/1973	8	0.2	7.6	7.08	93.17
18/01/1973	9	2.7	7.4	6.91	93.33
19/01/1973	10	1.7	9.1	6.88	75.58
20/01/1973	11	0.9	7.9	6.76	85.51
21/01/1973	12	3.6	7.4	6.61	89.35

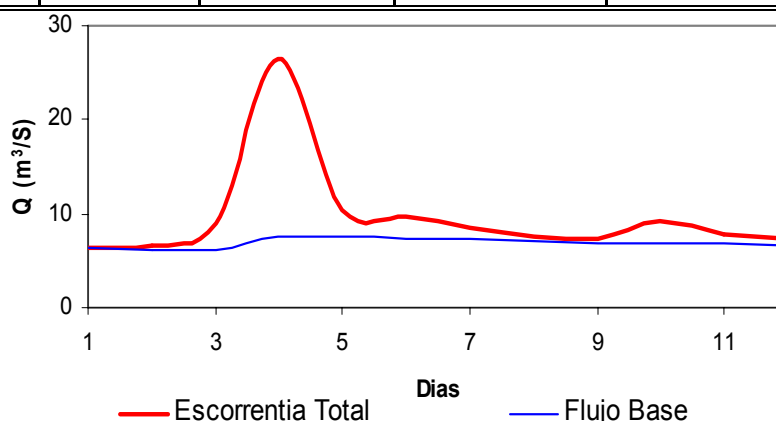


Figura 3.5 Separación del hidrograma por algoritmo de Tres parámetros

Volumen de Escorrentía = 10`022.400 m³

Volumen de Flujo base = 7`128.084 m³

% de Flujo base = 71.12%

3.3.4 Algoritmo de Smakhtin

Este algoritmo de obtención de flujo base utiliza parámetros de separación α y β diferentes a los usados en el algoritmos de tres parámetros, el resultado de la calibración arrojó valores de $\alpha = 0.997$ y $\beta = 0.45$ los cuales se pueden ver aplicados en un periodo de 12 días en la Tabla 3.4 y la separación del hidrograma se presenta en la Figura 3.6.

Tabla 3.4 Separación del hidrograma por algoritmo de Smakhtin

Fecha	T (días)	P (mm/día)	Q_T (m ³ /seg)	q_i	Q_B (m ³ /seg)	% Q_T
10/01/1973	1	0.4	6.3		6.30	100.00
11/01/1973	2	3.3	6.6	0.27	6.33	95.92
12/01/1973	3	6.9	8.9	2.34	6.56	73.76
13/01/1973	4	3.5	26.4	18.06	8.34	31.61
14/01/1973	5	0.1	10.4	3.62	6.78	65.17
15/01/1973	6	0.0	9.6	2.89	6.71	69.87
16/01/1973	7	0.0	8.4	1.81	6.59	78.50
17/01/1973	8	0.2	7.6	1.08	6.52	85.77
18/01/1973	9	2.7	7.4	0.90	6.50	87.86
19/01/1973	10	1.7	9.1	2.42	6.68	73.37
20/01/1973	11	0.9	7.9	1.34	6.56	83.07
21/01/1973	12	3.6	7.4	0.88	6.52	88.05

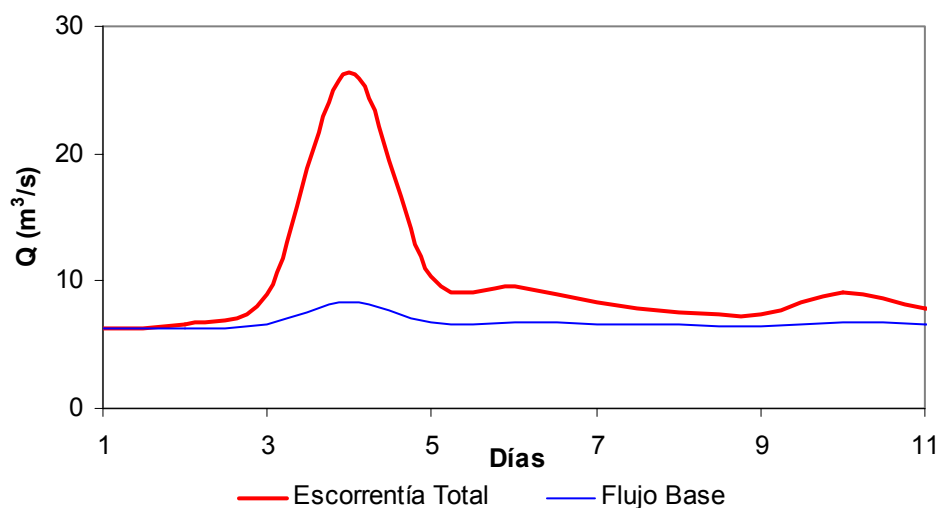


Figura 3.6 Separación del hidrograma por algoritmo de Smakhtin

Volumen de Escorrentía = 10`022.400 m³

Volumen de Flujo base = 6`946.028 m³

% de Flujo base = 69.31%

Índice de Flujo Base (BFI):

El Índice de Flujo Base esta definido como la razón a largo plazo del flujo base total del río. Para el algoritmo de tres parámetros puede obtenerse mediante la síntesis de los términos de la ecuación (7), sobre un periodo suficientemente largo

que la diferencia entre el flujo inicial y final son insignificamente relativos a los términos en la expresión final. Esto da:

$$BFI = \frac{C(1 + \alpha_q)}{1 + C - k} \quad (15)$$

Para el algoritmo de Dos parámetros $\alpha_q = 0$, y reemplazando $C = 1 - k$ nos da el BFI para el algoritmo de Un parámetro.

3.4 Comparación de los Métodos de Separación

Para determinar cual de los algoritmos de separación se asemejaba mejor a las condiciones del flujo total del río, se contó con la ayuda de datos de flujo base obtenidos mediante separación isotópica por el método de ajuste de dos componentes (Two Components Mixing). Se presentaron errores en la concentración isotópica debido a que no se tuvo en cuenta las diferentes concentraciones en las corrientes de la zona del macizo y el valle aluvial, sin embargo se trato de hacer una aproximación con los datos suministrados con el propósito de hacer un acercamiento al comportamiento del flujo base; a continuación se muestran los resultados arrojados por el estudio isotópico, para escoger el mejor algoritmo que represente el flujo base:

Se aplicaron a los datos isotópicos métodos de especialización Función de base radial (RBF), distancia inversa al cuadrado (IDQ); para obtener valores promedios representativos de la cuenca.

$$Q_e = Q_s \frac{(\delta_s - \delta_o)}{(\delta_e - \delta_o)} \quad Q_o = Q_s \frac{(\delta_s - \delta_e)}{(\delta_o - \delta_e)}$$

Groundwater		
	$\delta^2\text{H-2002}$	$\delta^{18}\text{O-2002}$
RBF	-51.51	-8.04
IDQ	-54.42	-8.29
	$\delta^2\text{H-Feb 6/03}$	$\delta^{18}\text{O-Feb 6/03}$
RBF	-52.83	-8.19
IDQ	-53.61	-8.31
	$\delta^2\text{H-Feb 6/03}$	$\delta^{18}\text{O-Feb 6/03}$
RBF	-53.88	-8.27
IDQ	-54.88	-8.33
AVG	-53.52	-8.24

Stream		
	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$
Café Madrid	-55.32	-8.25
Conquistador	-61.51	-9.18
Majadas	-60.07	-8.93
La Esperanza	-52.21	-8.14
AVG	-57.22	-8.62

Spring		
	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$
RBF	-71.12	-9.55
IDQ	-62.59	
Kriging	-68.71	
AVG	-67.47	-9.55

Baseflow		
	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$
	0.871	0.992
	0.428	0.281
	0.530	0.473
	1.094	1.073
AVG	0.735	0.709

Average		
	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$
Q Base	0.735	0.709
Q Escorrentia	0.265	0.291

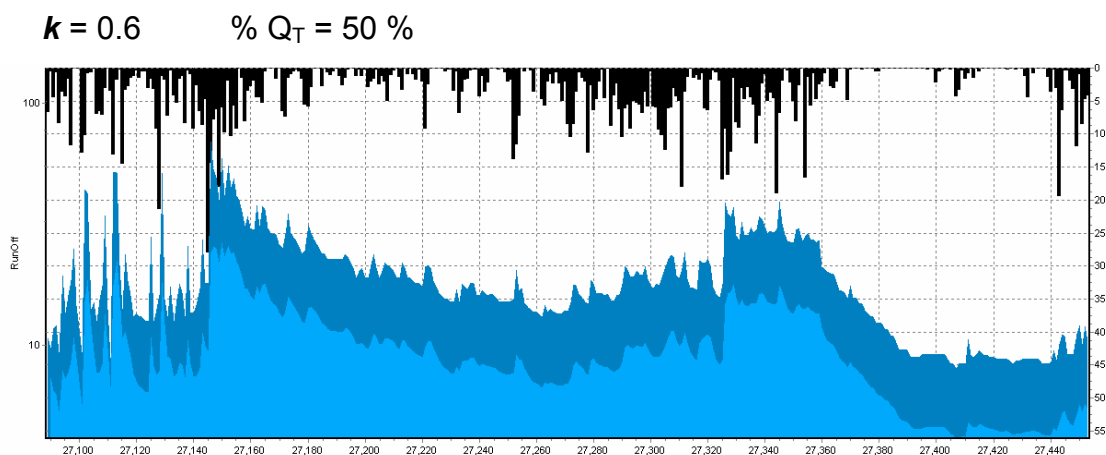
Se obtuvo un promedio de flujo base entre el 71% a 74% de la escorrentía total, y una escorrentía directa entre 29% y el 26%.

Teniendo el porcentaje de flujo base dado por la separación isotópica se procedió a comparar los algoritmos para ver cual tenia el mejor comportamiento.

Se hizo necesaria la aplicación de los algoritmos en diferentes periodos de tiempo, es decir, un evento, en un año y en el total de la serie de caudales para determinar que las constantes se ajustaran tanto a series históricas de caudales largas como a series mas pequeñas (eventos aislados) arrojando como resultado valores de parámetros iguales a diferentes escalas de tiempo, excepto para el algoritmo de Smakhtin ya que sus parámetros varían dependiendo de la resolución temporal; en gran parte porque la mayoría de procedimientos de separación de flujo se han diseñado para ser aplicados a eventos individuales los cuales presentan múltiples picos en el flujo, pero con un componente importante de flujo base. (Hughes, 2003)

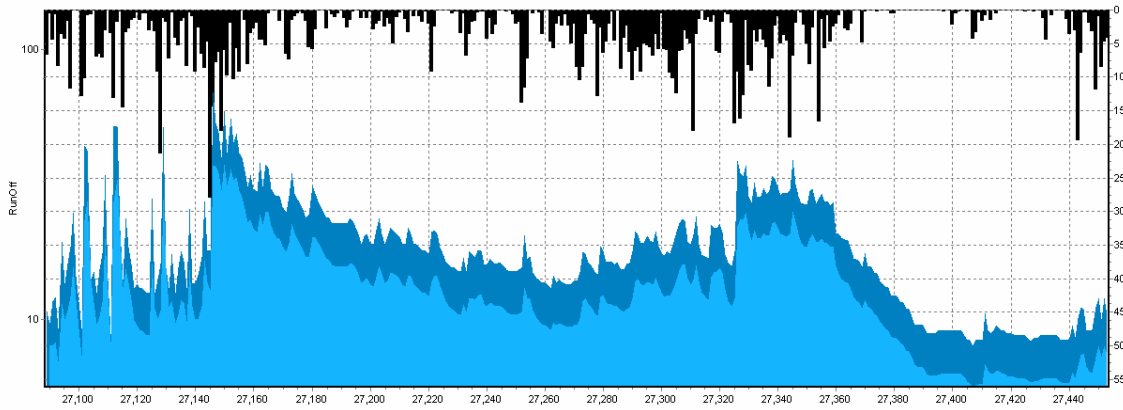
Se compararon los algoritmos en periodos de tiempo anual, en la Figura 3.7 se muestra los resultados del año hidrológico 1974 - 1975.

a) Algoritmo de Un parámetro (Line y Hollick)



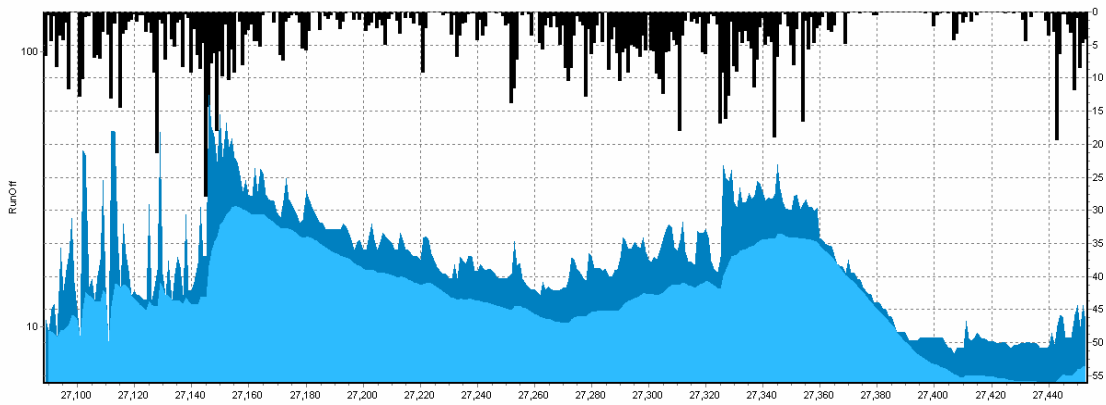
b) Algoritmo de Dos parámetros (Boughton)

$k = 0.6$ $C = 0.9$ % $Q_T = 69.20$ %



c) Algoritmo de Tres parámetros (IHACRES)

$\beta_q = 16$ $\beta_s = 1.30$ $\alpha_q = -0.05$ $\alpha_s = -0.97$ % $Q_T = 71.54$ %



c) Algoritmo de Smakhtin

$$\beta = 0.45 \quad \alpha = 0.997 \quad \% Q_T = 71.85 \%$$

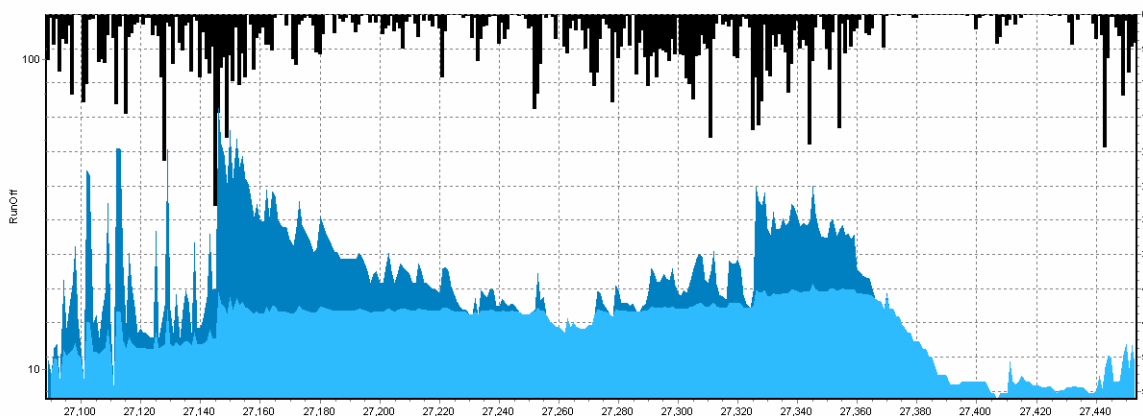


Figura 3.7 Separación de flujo base aplicando BFS (Guzmán, 2006)

El porcentaje de flujo base para la serie de tiempo del año hidrológico 1974-1975 aplicando el algoritmo de Un parámetro dio un valor de 50%, el de Dos parámetros 69%, el de Tres parámetros 71% y para el algoritmo de Smakhtin 71.85%.

Tabla 3.5 Resultados de Flujo Base para la serie histórica de caudales periodo 1970 a 2000.

Algoritmo	% Q_T
Line y Hollick	50
Boughton	69
IHACRES	71
Smakhtin	72

En el Anexo 6 se puede observar una tabla comparativa de los algoritmos de separación de flujo aplicados a escala anual.

Para obtener el índice de flujo base (BFI) de la serie total de caudales se aplicó la ecuación (15). El BFI para el algoritmo de Un parámetro dio como resultado 0.5 es decir el 50% de la escorrentía total esto muestra claramente la importancia de la limitación en la ecuación (2) donde el flujo base obtenido no debe exceder el valor del caudal observado en el río. Para el algoritmo de Dos parámetros se obtuvo un BFI de 0.69 y dando un mejor resultado del flujo base respecto al algoritmo de Un parámetro puesto que se asemeja mejor al comportamiento del hidrograma. Para el algoritmo de Tres parámetros se consiguió un BFI igual a 0.71, dándole al flujo base un comportamiento más idéntico al valor dado por la separación isotópica del total del flujo, por lo cual se considera como el algoritmo que mejor representa dicha separación.

En la Figura 3.8 se muestra una comparación de los algoritmos de separación en el periodo de 01 de Enero al 10 de Abril de 1974 donde se observa el comportamiento del Flujo Base de cada algoritmo. Seguidamente se presenta el volumen de flujo base del hidrograma correspondiente a cada método.

Volumen de Escorrentía Total =	136`568.160 m ³	% Q _{Total}
Lyne y Hollick	= 69`231.031 m ³	50.69
Boughton	= 94`579.468 m ³	69.25
IHACRES	= 91`125.091 m ³	66.72
Smakhtin	= 117`820.380 m ³	86.27

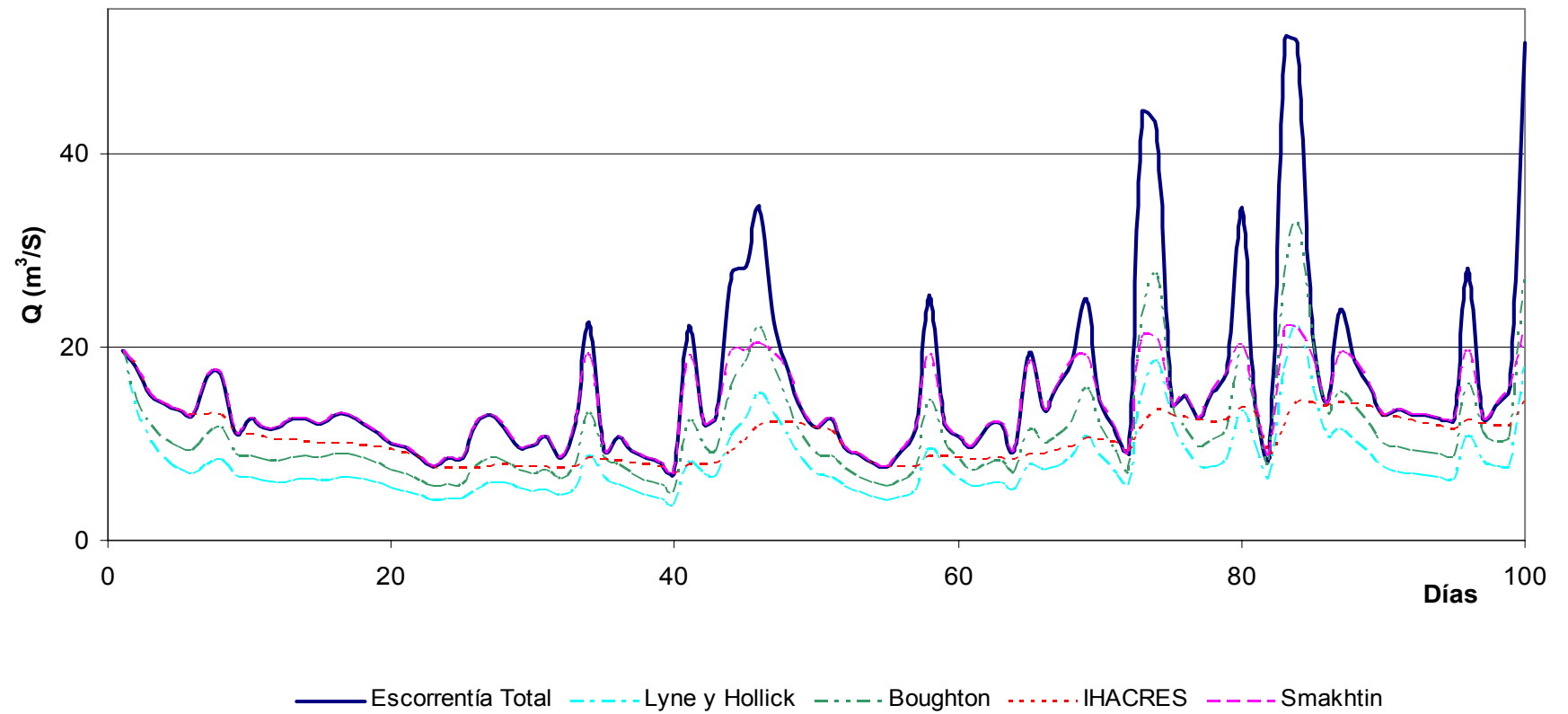


Figura 3.8 Comparación de los algoritmos de separación en la estación Café Madrid

Conclusiones

- Se evaluaron 4 modelos de separación de flujo base, encontrándose que el que mejor representa las condiciones de la CSRL es el modelo de tres parámetros (IHACRES, 1993). Para este modelo se estimó el flujo base como el 71% de la Escorrentía medida en la estación de Café Madrid. Los modelos de un parámetro, Boughton y Smakhtin estimaron el flujo base en 50, 69 y 72 % respectivamente. El algoritmo de Smakhtin parece no representar adecuadamente el flujo base en series de tiempo largas en la CSRL.
- El modelo de un parámetro y el algoritmo de Boughton (dos parámetros) asociados al modelo de tanque (SLR –Single Linear Reservoir) no representaron adecuadamente la respuesta de flujo base para la CSRL. Se considera que este resultado encontrado está asociado al modelo de tipo lineal de los cuales se derivan los algoritmos.
- Se procesaron lluvias diarias en un periodo de 30 años en la CSRL utilizando algoritmos de espacialización. Se utilizó el rango de valores de precipitación total multianual estimado entre 1217 a 1288 mm/año, como el rango de valores de calibración del algoritmo de espacialización (Distancia Inversa al Cuadrado - DIC) y sus parámetros, estimándose el valor multianual de 1280 mm/año. El algoritmo de espacialización DIC produce una distribución espacial concéntrica no realista para las estaciones, pero en sus valores totales medios fue el que mejor se ajustó a los valores de calibración estimados por otros métodos.

- La serie histórica de caudales en la estación de Café Madrid presentan problemas sistemáticos en la medición de caudales mínimos, encontrándose que el vaciado del Limnigrafo no se lleva a cabo adecuadamente en ciertas épocas o a partir de ciertos niveles. Esta condición hace que la curva maestra de Agotamiento pierda representatividad o muestre constantes de agotamiento que no corresponden a la respuesta de la cuenca, a su vez que es difícil encontrar periodos largos sin presencia de lluvia en la cuenca (Mayores a 10 días).
- En el presente proyecto se utilizó el ajuste gráfico a la respuesta lineal en escala logarítmica de la fase de agotamiento en periodos sin lluvias (mas de cinco días) o secos (con lluvias) como metodología de calibración de los parámetros de los algoritmos de separación de flujo base. Los diferentes métodos de separación de flujo base están asociados a la misma definición de que es Flujo Base desde las diferentes ópticas de la ingeniería aplicada o de la comprensión científica de los procesos hidrológicos.

Recomendaciones

- Se considera que la utilización de trazadores isotópicos, la estimación del Tiempo de Residencia Medio (TRM) y la edad del agua serian las metodologías mas apropiadas para calibrar los algoritmos de separación de flujo base utilizados.
- Para obtener un mejor registro de caudales se recomienda hacer revisión periódica de los instrumentos, para evitar fallas en las mediciones por diversas razones en especial la Estación Café Madrid, ya que es la estación que se encuentra en el punto cierre de la CSRL.
- Se recomienda la instalación de una red pluviométrica más densa en la zona del macizo que presenten periodos de registro continuo y que las estaciones existentes tengan un adecuado mantenimiento para obtener series consistentes y homogéneas que permitan mejorar las estimaciones de la distribución de la precipitación,
- Se hace necesario la implementación de separación isotópica con base en muestreos más prolongados y continuos a lo largo de las corrientes para conocer la variación de las concentraciones isotópicas en diferentes alturas del cauce, que permitan representar la variación de la concentración isotópica haciendo que el resultado de los análisis sean más confiables.
- Debe continuarse con el estudio de algoritmos de espacialización para hallar el interpolador que refleje en forma más realista la distribución espacial de la lluvia en la CSRL.

Bibliografía

- Aparicio, F., 1987. Fundamentos de hidrología de superficie., Noriega editores Limusa. p. 27-35
- Boussinesq, J. 1877. 'Essai sur la théorie des eaux courantes', Mém. prés. par divers savants à l'Acad. des Sci. de l'Inst. Nat. De France, 23, 1-680.
- Boughton, W.C., 1993. A Hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. Hydrol. and Water Resour. Symp., Institution of Engineers Australia, Newcastle, NSW. pp. 317-324.
- Chapman, T. G., Maxwell, A. I., 1996. Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Hydrol. and Water Resour. Symp. Institution of of Engineers Australia, Hobart. pp. 539-545.
- Chapman, T. G., 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrological Processes. 13, 701-714.
- Clark, I, Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. En Hydrograph Separation in Cathment Studies. Lewis Publishers p. 99-102.
- Gómez, S., Colegial, J., 2003. Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el macizo de Santander e identificación de acuíferos.
- Guzmán, J., Chu, M, 2002, SPELL Stat. No publicado.
- Guzmán, J., 2006, SPELL SDM. No publicado.
- Guzmán, J., 2003, SPELL Map. No publicado.
- Guzmán, J., 2006, SPELL AMO. No publicado.
- Guzmán, J, Gómez, S., Colegial, D., Anaya, A., Niño E., 2005. Cuenca Experimental de Río Sucio (CERS). Sin publicar.
- Hughes, D., Hannant, P., Watkins, D., 2003. Continuous baseflow separation from time series of daily and monthly streamflow data. Water SA, Vol. 29 N° 1

- Jakeman, A. J., Hornberger, G. M., 1993. How much complexity is warranted in rainfall-runoff facility. Hydrology Paper 25. Colorado State University, Fort Collins.
- Maldonado J., Velasco W., 2005. Implementación de una metodología para el muestreo de isótopos estables y aplicación a la separación de flujo base. Tesis de Pregrado.
- Maradei, Z., Rojas, J., 2002. Distribución espacial de variables hidrológicas en la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL) utilizando geoestadística. Tesis de Pregrado.
- Niño, E., Garzón, L., 2003. Estudio de curvas de recesión en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Tesis de Pregrado.
- Ronzaski C., Froehlich K., Mook, W., 2002. Isótopos Ambientales en el ciclo hidrológico, Principios y aplicaciones. Sección III, Agua Superficial, Madrid: Editores
- Schöninger, M., 1990. Beitrag zur Abflußbildung and Grundwasserneubildung im paläozoischen Festgestein (LangeBramke/Harz). Landschaftökologie Umweltforsch. 18, 1-203.
- Sloto, R. and Croase, M. Hysep: A computer program for streamflow hydrograph separation and análisis. En: U.S: Geological Survey Water Resources, 1996. 1-7
- Smakhtin, V. 2001. Low flow hydrology: a review. Elsevier Science B:V Journal of hydrology 240, 147- 186.
- Wittenberg, H., 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. Hydrological processes. 13, 715-726.

Anexos

Anexo 1: Información de estaciones Hidroclimáticas en la CSRL

La información de las estaciones hidroclimáticas en la CSRL son clasificadas por la entidad que la opera. Se presenta de cada estación el código, nombre, tipo de variable, localización geográfica, subcuenca, municipio, fecha de instalación y de suspensión.

CDMB									
Código	Tipo	Nombre	Subcuenca	Municipio	Localización Geográfica			Fecha	
					Este	Norte	msnm	INST	SUSP
2319072	PG	CDMB	Lebrija	B/manga	1105857.0	1279070.0	950	1972 - 01	
2319073	PG	La Flora	Lebrija	B/manga	1100617.0	1276796.0	1100	1972 - 01	
2319521	CO	La Esperanza	Lebrija	F/blanca	1119914.0	1270294.0	1020	1979 - 09	
2319739	CO	El Rasgon	Q. El Rasgon	P/cuesta	1111228.0	1273582.0	1950	1985 - 05	
	PG	Chimlta			1107543.4	1280894.1	684		
	CO	PTAR	Frío	Girón	1104802.9	1273129.0	760		
	CP	UIS	Tona	B/manga	1105545.0	1281485.0	989		

FNC									
Código	Tipo	Nombre	Subcuenca	Municipio	Localización Geográfica			Fecha	
					Este	Norte	msnm	INST	SUSP
2319061	PM	Bonanza	De Oro	Girón	1101014.0	1272986.2	1250	1967 - 11	
2319063	PM	La Loma	De Oro	F/blanca	1105505.0	1282998.0	1400	1967 - 12	
2319064	PM	Miporal	De Oro	F/blanca	1110222.3	1273005.9	1237	1967 - 06	
2319065	PM	Ceylan	Surata	B/manga	1108380.6	1273001.0	1300	1968 - 01	
	CO	San Antonio	Frío	F/blanca	1111733.4	1276955.8	1480	1991 - 01	

COLT									
Código	Tipo	Nombre	Subcuenca	Municipio	Localización Geográfica			Fecha	
					Este	Norte	msnm	INST	SUSP
2319004	PM	Bucaramanga	De Oro	B/manga	1108365.0	1280375.1	1018	1953 - 01	
2319017	PM	Floridablanca	De Oro	F/blanca	1110222.3	1273005.1	860	1958 - 10	

IDEAM									
Código	Tipo	Nombre	Subcuenca	Municipio	Localización Geográfica			Fecha	
					Este	Norte	msnm	INST	SUSP
2319010	PM	Planta Eléctrica	Q. El Rasgon	P/cuesta	1115767.9	1263799.7	1000	1958 - 03	1971 - 09
2319012	PM	Matanza	Surata	Matanza	1115671.1	1306200.6	1570	1958 - 05	1971 - 10
2319016	PM	Vetas	Vetas	California	1134091.4	1300716.3	3100	1958 - 07	1972 - 07
2319020	PM	Cachiri 1	Cachiri	Surata	1117480.6	1319109.7	1967	1959 - 10	1972 - 08
2319026	PM	La Laguna	Q. La Angula	Lebrija	1095824.0	1274328.0	1050	1967 - 05	
2319027	PM	Limoncito	Frío	F/blanca	1108384.0	1271157.0	820	1967 - 05	1971 - 09
2319028	PM	Palogordo	De Oro	Girón	1104708.0	1262055.0	950	1967 - 06	
2319030	PM	El Picacho	Tona	Tona	1123563.0	1277828.0	3310	1967 - 07	
2319033	PM	Buenavista	Lato	P/cuesta	1113921.9	1265639.1	1020	1967 - 10	1971 - 09
2319034	PM	Matajira	Surata	Matanza	1112243.0	1289201.0	996	1967 - 10	
2319038	PM	Palmas	Q. Honda	Lebrija	1095305.0	1288951.0	855	1967 - 11	
2319040	PM	La Galvicia	Tona	F/blanca	1113124.0	1279371.0	1779	1968 - 01	
2319041	PM	El Brasil	Tona	Tona	1113013.0	1281730.0	1090	1968 - 07	1971 - 11
2319043	PG	Piedecuesta	Lato	P/cuesta	1113925.9	1263795.6	1000	1969 - 01	1971 - 01
2319044	PM	El Naranja	Q. San Benito	Lebrija	1086255.0	1288290.0	825	1971 - 04	
2319045	PM	Vetas el Pozo	Vetas	Vetas	1132805.0	1299852.0	3220	1971 - 03	
2319059	PG	La Floresta	Q. La Iglesia	B/manga	1105735.0	1275607.0	925	1978 - 06	
2319060	PM	El Pantano	Q. La Angula	Girón	1094399.0	1230084.0	1280	1967 - 11	
2319070	PG	Gja Piedecuesta	Lato	P/cuesta	1111958.0	1264897.0	1000	1970 - 07	
2319080	PM	Himat	De Oro	B/manga	1104686.0	1278523.9	1010	1984 - 06	1989 - 05
2319083	PG	Bucaramanga	Surata	B/manga	1105512.0	1279816.0	1025	1996 - 10	
2319503	SS	Apto Gómez Niño	De Oro	B/manga	1104682.2	1280367.4	931	1940 - 06	1974 - 07
2319504	PG	UIS	Tona	B/manga	1105937.0	1281629.0	1018	1957 - 01	
2319505	CP	Vivero Chimita	Surata	B/manga	1102845.0	1278520.0	830	1968 - 08	1971 - 06
2319506	PM	La Mariana	Surata	Tona	1118252.0	1279542.0	2250	1968 - 10	1975 - 10
2319508	CO	La Urbina	Lebrija	Lebrija	1080694.4	1311661.1	410	1968 - 05	1976 - 06
2319509	CO	Vivero Surata	Surata	Surata	1120671.0	1306120.0	1725	1968 - 09	
2319511	CO	Llanogrande	De Oro	Girón	1100961.0	1268438.0	777	1971 - 07	
2319513	SP	Apto Palonegro	De Oro	Lebrija	1099190.0	1279557.0	1189	1974 - 08	
2319520	CO	Cachiri 2	Cachiri	Surata	1120243.0	1317948.0	1850	1971 - 06	
2406007	PG	La Parroquia	Q. Aguablanca	Girón	1083087.0	1273906.0	267	1959 - 09	1965 - 06
2406502	CP	Hda la esperanza	Sogamoso	Lebrija	1086281.3	1272959.4	520	1974 - 10	1986 - 02
2406503	CP	Hda Trigueros	Sogamoso	Girón	1079864.0	1274085.0	400	1996 - 03	
3701502	CP	Berlín	Jordán	Tona	1133945.0	1286396.0	3214	1968 - 05	

AMB									
Código	Tipo	Nombre	Subcuenca	Municipio	Localización Geográfica			Fecha	
					Este	Norte	msnm	INST	SUSP
	PM	La Granja	Surata	Charta	1112019.0	1293287.0	1240	1982 / 05	1992

URBANAS									
Código	Tipo	Nombre	Subcuenca	Municipio	Localización Geográfica			Fecha	
					Este	Norte	msnm	INST	SUSP
	PG	Ruitoque Alto		P/cuesta	1110037.8	1268701.9	1297	1992	

Nomenclatura de estaciones Hidroclimáticas:

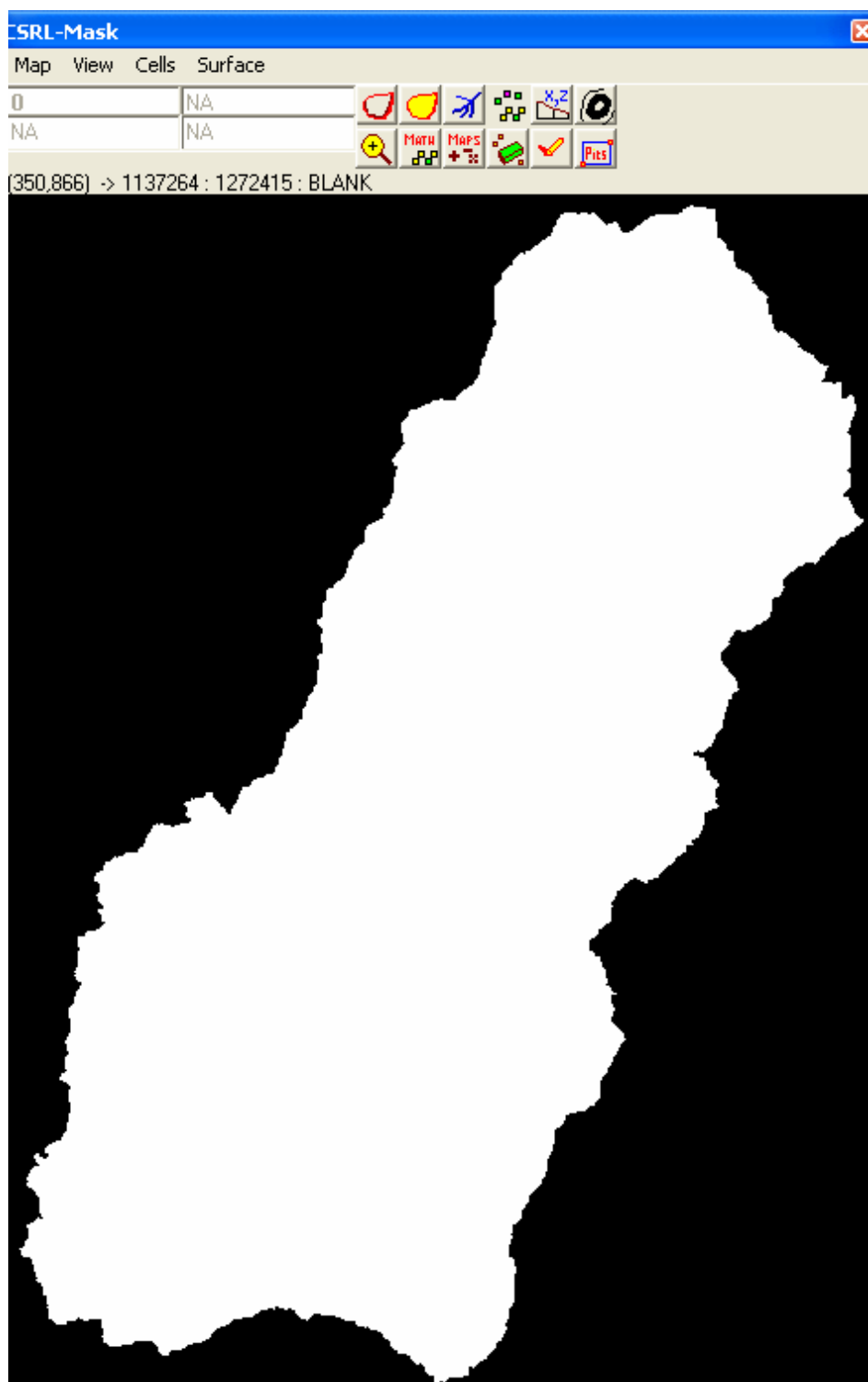
- SP: Sinóptica Principal
- SS: Sinóptica Secundaria
- CO: Estación climatológica ordinaria
- CP: Estación climatológica principal
- PG: Estación pluviográfica
- PM: Estación pluviométrica

Anexo 2: Porcentaje de Datos de Precipitación en las Estaciones dentro y en las cercanías de la CSRL.

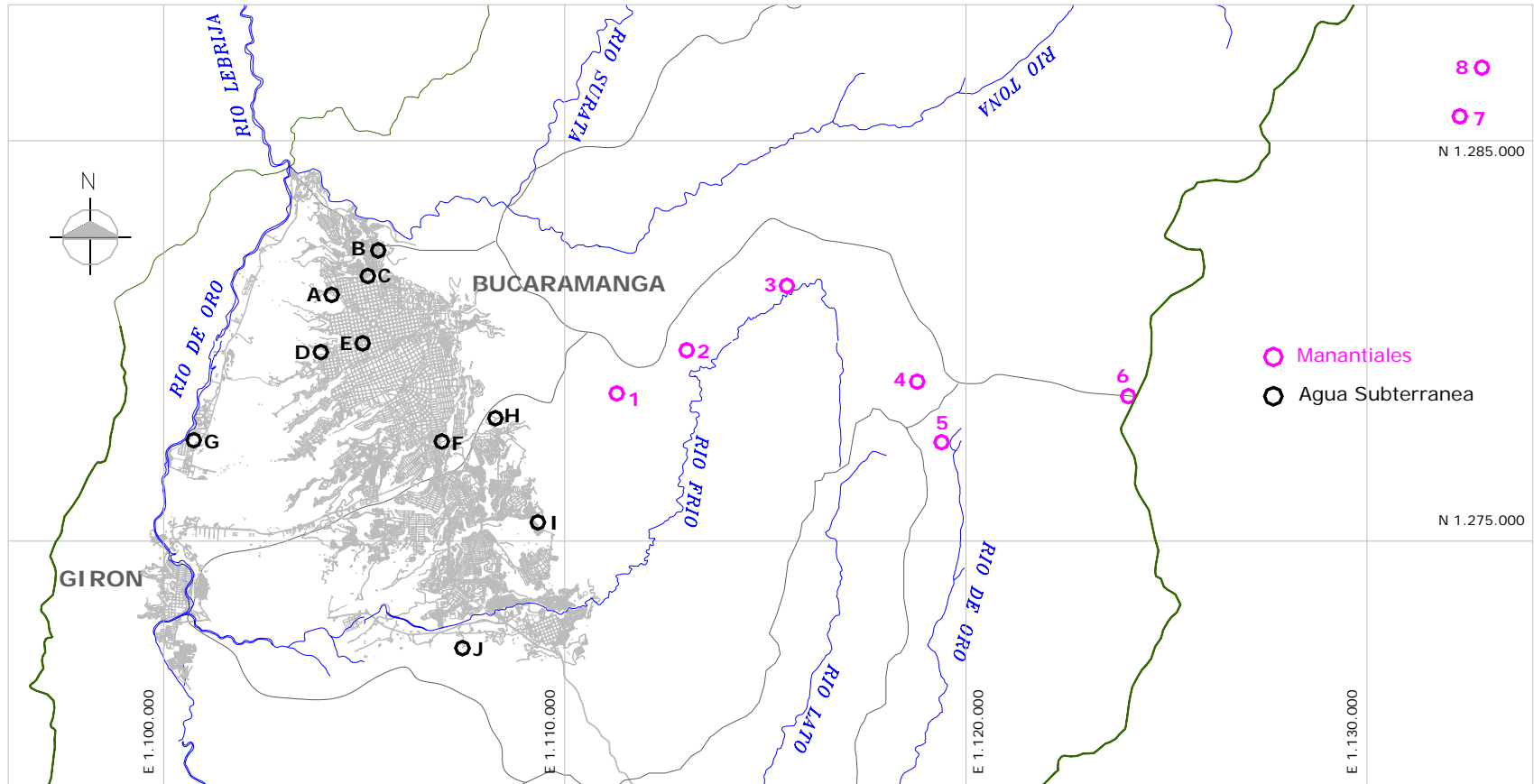
Estación	Total Datos	% de Datos	
		Existentes	Faltantes
Apto_Gomez_Niño	1671	99.34	0.66
Apto_Palonegro	10927	98.15	1.85
Berlin	12600	95.66	4.34
Bonanza	12600	61.01	38.99
Bucaramanga	12600	10.87	89.13
Bucaramanga_IDEAM	2799	97.25	2.75
Buenavista	631	100.00	0.00
Cachiri_1	943	96.82	3.18
Cachiri_2	12081	97.21	2.79
CDMB	6391	79.61	20.39
Ceylan	12600	28.19	71.81
Chimita	1276	99.61	0.39
El_Brasil	673	100.00	0.00
El_Naranja	12130	92.94	7.06
El_Pantano	12600	94.44	5.56
El_Picacho	12600	98.56	1.44
El_Rasgon	6391	79.93	20.07
Floridablanca	334	100.00	0.00
Granja_Piedecuesta	12404	98.25	1.75
Hda_la_esperanza	10851	94.29	5.71
Hda_Trigueros	3013	95.79	4.21
Himat_R.11	1694	100.00	0.00
La_Esperanza	6391	79.85	20.15
La_Flora	6391	79.94	20.06
La_Floresta	9497	98.05	1.95

Estación	Total Datos	% de Datos	
		Existentes	Faltantes
La_Galvicia	12600	96.02	3.98
La_Granja	6391	79.99	20.01
La_Laguna	12600	91.66	8.34
La_Loma	12600	14.50	85.50
La_Mariana	2130	97.61	2.39
La_Parroquia	12600	97.09	2.91
La_Urbina	2343	83.27	16.73
Limoncito	1339	89.99	10.01
Llano_Grande	12049	93.99	6.01
Matajira	12600	99.98	0.02
Matanza	637	99.53	0.47
Miporal	7639	32.24	67.76
Palmas	12600	98.06	1.94
Palo_Gordo	12600	99.69	0.31
Piedecuesta	638	42.79	57.21
Pita_Electrica	631	98.26	1.74
PTAR	6391	93.40	6.60
Ruitoque	4387	95.85	4.15
San_Antonio	4199	95.67	4.33
UIS_CDMB	880	99.77	0.23
UIS_IDEAM	12600	91.22	8.78
Vetas	937	100.00	0.00
Vetas_El_Pozo	12122	98.83	1.17
Vivero_Chimita	546	96.15	3.85
Vivero_Surata	12600	96.45	3.55

Anexo 3: Mascara CSRL en Spell-Map.



Anexo 4: Ubicación muestreo de isótopos de manantiales y agua subterránea.



Anexo 5: Sitios de muestreo de Isótopos.

	Agua Subterránea	Norte	Este	Deuterio	¹⁸O
A	Nazaret Dren 7a	1,281,150	1,104,190	-56.2	-8.49
B	Ciudad Norte Pozo de Bombeo	1,282,260	1,105,349	-53.7	-8.07
C	Barrio Independencia Dren	1,281,620	1,105,090	-54.6	-8.4
D	Barrio Argelia Dren	1,279,722	1,103,920	-55.5	-8.42
E	Vivero La Rosita Dren	1,279,940	1,104,960	-54.9	-8.23
F	Nac. Conucos	1,277,488	1,106,934	-54.4	-8.36
G	Terpel - Chimita	1,277,520	1,100,750	-50.8	-7.48
H	Jardín La Colina	1,278,069	1,108,271	-56.3	-8.48
I	Estación Oriental T	1,275,468	1,109,328	-62.3	-9.79
J	Piezómetro la Flora	1,272,329	1,107,449	-45.5	-7.16

	Manantial	Norte	Este	Deuterio	¹⁸O	Elevación
1	Km 12	1,278,689	1,111,295	-53.8	-7.2	1600
2	Km 15 "Lago Miramanga"	1,279,767	1,113,039	-51.4	-7.51	1300
3	Km 18	1,281,377	1,115,537	-60	-8.87	1800
4	Km 24	1,278,983	1,118,785	-60.7	-8.69	2000
5	Km 29	1,277,470	1,119,393	-64.4	-9.06	2400
6	Km 34	1,278,620	1,124,048	-65.2	-9.64	2600
7	Km 45	1,285,607	1,132,311	-68.2	-9.13	3200
8	Páramo de Berlín	1,286,823	1,132,864	-75.3	-10.55	3000

Anexo 6: Resultados de Flujo Base Anuales.

Año		Precipitación	% Q _T			
			1 Parámetro	2 Parámetros	3 Parámetros	Smakhtin
1970	Húmedo	1378.16	50	69	68	69
1971	Húmedo	1570.56	50	69	72	75
1972		1238.70	50	69	72	76
1973		1139.85	50	69	67	75
1974		1208.64	50	69	71	84
1975	Húmedo	1452.01	50	69	69	64
1976		1201.67	50	69	71	93
1977		1179.91	50	69	70	73
1978	Húmedo	1399.09	50	69	71	64
1979	Húmedo	1611.92	50	69	70	60
1980		1214.27	50	69	71	90
1981	Húmedo	1478.69	50	69	72	77
1982		1293.37	50	69	71	72
1983	Seco	995.76	50	69	72	72
1984		1308.45	50	69	63	61
1985		1129.26	50	69	63	74
1986		1307.85	50	69	70	74
1987		1240.12	50	69	71	82
1988	Húmedo	1575.66	50	69	70	81
1989		1109.12	50	69	73	94
1990		1189.29	50	69	69	80
1991		1083.07	50	69	70	82
1992	Seco	929.50	50	69	69	89
1993		1165.90	50	69	68	67
1994		1205.06	50	69	69	66
1995		1243.23	50	69	70	70
1996	Húmedo	1351.44	50	69	69	77
1997		1037.37	50	69	69	93
1998	Húmedo	1352.38	50	69	65	64
1999	Húmedo	1421.65	50	69	69	71
2000		1154.27	50	69	68	79