

**ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MENSUAL EN LA PARTE ALTA DE LA  
CUENCA DEL RIO FRÍO POR MEDIO DE UN MODELO HIDROLÓGICO  
DISTRIBUIDO.**

**EDINSON GOMEZ BORRERO  
CARLOS ALBERTO LÓPEZ MELO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS.  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2005**

**ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MENSUAL EN LA PARTE ALTA DE LA  
CUENCA DEL RIO FRÍO POR MEDIO DE UN MODELO HIDROLÓGICO  
DISTRIBUIDO.**

**EDINSON GOMEZ BORRERO  
CARLOS ALBERTO LÓPEZ MELO**

**Proyecto de investigación presentado como requisito para optar al  
título de ingeniero civil.**

**Dirigido por:**

**Sully Gómez Isidro (I.C., M.Sc, Ph.D)**

**Jorge Alberto Guzmán (I.C., M.Sc)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS.  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2005**

## TABLA DE CONTENIDO

FORMATO DE APROBACIÓN DE PROYECTO.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	x
RESUMEN.....	xii
SUMMARY.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPITULO 1- SUBCUENCA DE RIO FRÍO PARTE ALTA.....	1
1.1. LOCALIZACIÓN Y ASPECTOS GENERALES.....	1
1.2. USO DE SUELO.....	5
1.3. SUELO SUPERFICIAL.....	8
1.3.1. Fase PRg y SRg.....	12
1.3.2. Fase FRg y LRg.....	13
1.3.3. Fase MRf.....	13
1.3.4. Fase MRg1, HRg1 y RRg1.....	14
1.3.5. Fase MIb.....	15
1.4. GEOLOGÍA.....	15
1.4.1 Estratigrafía.....	16
1.4.1.1 Precámbrico.....	18
1.4.1.2 Mesozoico.....	19
1.4.2 Geología estructural.....	19
1.5. GEOMORFOLOGIA.....	21
1.5.1. Morfometría.....	22



1.5.2. Procesos Morfodinámicos.....	22
1.5.3. Caracterización Geomorfológica.....	22
1.6. PRECIPITACION.....	25
1.7. CAUDALES.....	28
CAPITULO 2-MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO.....	29
2.1. MODELOS DE PRECIPITACIÓN ESCORRENTIA.....	31
2.2. MODELO SHIA (SIMULACIÓN HIDROLÓGICA ABIERTA).....	32
2.2.1. Almacenamiento capilar o capacidad de campo, interceptación de la cobertura vegetal y evapotranspiración (Tanque 1).....	37
2.2.2. Almacenamiento superficial, zona de encharcamiento y escorrentía superficial (Tanque 2).....	40
2.2.3. Almacenamiento y escorrentía subsuperficial(Tanque 3).....	41
2.2.4. Almacenamiento y escorrentía subterránea (Tanque 4).....	43
CAPITULO 3-ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO SHIA EN LA CUENCA.....	46
3.1. DATOS DE ENTRADA.....	46
3.1.1 <b>Modelo digital de elevación Río Frió Alto y su procesamiento</b> .....	48
3.1.1.1 Métodos de interpolación analizados.....	49
3.1.1.2 Selección y procesamiento del MDE.....	55
3.2. PARAMETROS DEL MODELAMIENTO.....	60
3.2.1. Modelos digitales de Terreno.....	61
3.4. INFORMACION HIDROLOGICA Y CLIMATOLOGICA.....	65
3.4.1. Precipitación.....	66
3.4.2. Evapotranspiración (ET).....	69
3.4.2.1. La evapotranspiración en el modelo.....	73
CAPITULO 4-CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO.....	74



4.1.	INFORMACION DE CAUDALES.....	75
4.2.	PARAMETROS DE CALIBRACION.....	77
4.3.	VALIDACION DEL MODELO HIDROLOGICO.....	81
CAPITULO 5-ANALISIS DE RESULTADOS.....		83
5.1.	RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.....	83
5.1.1	MDT's de características hidráulicas de suelo.....	83
5.1.2	Precipitación.....	88
5.1.3	Evapotranspiración Potencial (ETP) y Real (ETR).....	88
5.1.4	Componentes de la Escorrentía.....	91
5.1.5	Recarga.....	93
5.2	RESULTADOS DE LA VALIDACION.....	94
5.2.1	Precipitación.....	94
5.2.2	Evapotranspiración Potencial (ETP) y Real (ETR).....	95
5.2.3	Componentes de la Escorrentía.....	96
5.2.4	Recarga.....	97
5.3	APORTE DE LA SUBCUENCA DE RIO FRIO A LA RECARGA TOTAL MENSUAL Y ANUAL DE LA CUENCA DE RIO DE ORO PARA EL PERIODO ENTRE 1987-1991.....	99
CAPITULO 6-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		101
6.1	CONCLUSIONES.....	101
6.2	RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		104
ANEXOS.....		A-1



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parte alta de la subcuenca Río Frío. Ubicación general.....	2
Figura 2. Zona de estudio. Subcuenca parte alta de Río Frío.....	3
Figura 3. Mapa de Cobertura Vegetal.....	5
Figura 4. Histograma de Frecuencia de Cobertura Vegetal.....	7
Figura 5. Mapa de Tipos de Suelo.....	10
Figura 6. Histograma de Frecuencia de tipo de suelo.....	10
Figura 7. Mapa de Geología.....	17
Figura 8. Histograma de Frecuencia. Unidades geológicas.....	17
Figura 9. Mapa Geomorfológico.....	23
Figura 10. Histograma de Frecuencia. Unidades Geomorfológicas.....	24
Figura 11. Precipitación media mensual multianual. Río frío Alto.....	27
Figura 12. Caudal Medio Mensual Multianual.....	28
Figura 13. Esquema General de Modelos Hidrológicos.....	30
Figura 14. Esquema de conexión de los elementos de la celda.....	34
Figura 15. Esquema de los parámetros del Tanque 1.....	37
Figura 16. Esquema de los parámetros del Tanque 2.....	40
Figura 17. Esquema de los parámetros del Tanque 3.....	42
Figura 18. Esquema de los parámetros del Tanque 4.....	43
Figura 19. Esquema de Muestreo para construcción del Variograma Experimental en el espacio para una variable que presenta anisotropía. ....	52
Figura 20. Representación del variograma experimental.....	53



Figura 21. (a) Esquema de sumidero. (b) Corrección de sumidero. (c) Esquema Modelo D8.....	56
Figura 22. MDE 3D. Mascara de la cuenca de Río Frío Alto.....	57
Figura 23. Mapa de Pendientes. Río Frío Alto.....	58
Figura 24. Mapa direcciones. Río Frío Alto.....	58
Figura 25. Mapa de celdas acumuladas sobre la Red Hídrica.....	59
Figura 26. Mapa de divisiones de almacenamiento de la Capa Superior de suelo. Parámetro Arh.....	63
Figura 27. Mapa de divisiones de Conductividad Hidráulica en la capa inferior del suelo. Parámetro Arkp.....	65
Figura 28. Distribución espacial de precipitación media multianual. Río Frío Alto.....	68
Figura 29. Localización de las estaciones de Precipitación utilizadas.....	69
Figura 30. (a). ETR Multianual. (b). Oferta Hídrica Multianual.....	72
Figura 31. Representación de los caudales vs. Precipitación promedio.....	76
Figura 32. Hidrogramas de caudales simulados y observados o medidos. ....	80
Figura 33 Representación de los caudales y sus probabilidades de excedencia Año 1995.....	80
Figura 34. Hidrogramas de caudales simulados y observados, año 2000. ....	81
Figura 35. Hidrogramas de caudales simulados y observados, serie 1987 a 1991. ....	82
Figura 36. Valores de almacenamiento capilar de suelo. [mm].....	84
Figura 37. Valores de conductividad hidráulica saturada capa superior de suelo. [mm/día].....	85
Figura 38. Valores de conductividad hidráulica saturada capa inferior de suelo. [mm/día].....	87
Figura 39. Evapotranspiración Real media mensual en la zona de estudio y precipitación como referencia.....	90



Figura 40. Representación de las componentes de escorrentía. Año 1995.....91

Figura 41. Aporte de los caudales promedios simulados de las componentes de escorrentía al caudal del río. Año 1995.....92

Figura 42. Porcentaje del aporte de las componentes de la escorrentía al caudal del río.....92

Figura 43. Recarga, Oferta Hídrica y precipitación media mensual. Año 1995.....94

Figura 44. Evapotranspiración Real media mensual en la zona de estudio y precipitación como referencia. Año 2000.....95

Figura 45. Representación de las componentes de escorrentía. Año 2000.....96

Figura 46. Recarga, Oferta Hídrica y Precipitación media mensual. Año 2000.....98



**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Características físicas y morfológicas de la zona.....4

Tabla 2. Clasificación de coberturas y uso de las tierras de Río Frío Alto.....6

Tabla 3. Definición de la nomenclatura utilizada para los suelos superficiales.....9

Tabla 4. Tipo de suelos.....11

Tabla 5. Unidades Geológicas. Riofrío Alto.....18

Tabla 6. Formas de Origen Estructural Denudacional Río Frío Alto.....24

Tabla 7. Formas de Origen Fluvial. Río Frío Alto.....25

Tabla 8. Precipitación mensual Estación La Galvicia [mm] .....26

Tabla 9. Precipitación mensual Estación La Mariana [mm].....27

Tabla 10. Caudales mensuales, Estación La Esperanza [m3/seg].....28

Tabla 11. Ajustes de variogramas según Surfer 8 y valores de EMC.....53

Tabla 12. Modelos de la función base radial y valores de EMC.....55

Tabla 13. Comparación de los modelos de interpolación preseleccionados.....56

Tabla 14. Precipitación Media Multianual de las estaciones.....67

Tabla 15. Evapotranspiración media multianual de las estaciones.....72

Tabla 16. Relación de la textura con algunas propiedades del suelo.....78

Tabla 17. Almacenamiento capilar para cada subzona.....84

Tabla 18. Conductividad hidráulica superior para cada subzona.....86

Tabla 19. Conductividad hidráulica inferior para cada subzona.....87

Tabla 20. Valores de Evapotranspiración y precipitación mensual (mm). Año 1995.....90

Tabla 21. Valores de Recarga media mensual y su porcentaje respecto a la  
Precipitación media mensual (mm). Año 1995.....94

Tabla 22. Valores de Evapotranspiración y precipitación mensual (mm). Año 2000.....96



Tabla 23. Valores de Recarga media mensual Oferta Hídrica y su porcentaje respecto a la Precipitación media mensual (mm). Año 2000.....98

Tabla 24. Aporte de la recarga mensual y anual de la Subcuenca de Río Frío Parte Alta a la Cuenca de Río de Oro.....99



## DEDICATORIA.

A mi Madre Esperanza Melo, por su esfuerzo y dedicación a sus hijos brindándonos todo lo necesario en todos los aspectos y muchísimo más.

A mi Abuela Maria Isabel Melo, gracias a ella han sido posibles todos mis logros académicos y personales.

A mis hermanos Cristian Nel y Juan Fernando, a mi tío Marcolino Arias, a Lina Maria Rojas Vesga por preocuparse por mí y ser un apoyo grande en la universidad, y a todos mis amigos los que en algún momento me apoyaron.

A mis grandes amigos de la Universidad, Edinson, Oscar, Serrano, Diego, Moya y Omar, por haber hecho más agradable los momentos de tanto stress en la U.

Y a Dios, el más importante, que permitió que todas estas personas estuviesen a mi lado.

**Carlos Alberto López Melo.**



A Dios todo poderoso por haberme dado la oportunidad de culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mi madre Gladys Marina por haberme brindado todo y más de lo que una madre le puede brindar a un hijo.

A mi padre Hector por sus esfuerzos hechos en la realización de este proyecto. A mis hermanitos Hector, Bladimir y Sindy Viviana por sus aportes.

A la Universidad Industrial de Santander por haberme acogido dentro de su grupo selecto de estudiantes.

A mis amigos del alma Oscar Ivan, Carlos Alberto, Juan Leonardo y Diego Andrés con los que pasé ratos agradables en mi vida como estudiante.

**Edinson Gomez Borrero**



## RESUMEN

**TITULO:** ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MENSUAL EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DE RÍO FRÍO POR MEDIO DE UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO.\*

**AUTOR:** EDINSON GOMEZ BORRERO, CARLOS ALBERTO LOPEZ MELO \*\*.

**PALABRAS CLAVE:** Modelamiento Hidrológico Distribuido, Estimación de Recarga, Modelo Conceptual, Balance Hidrológico de Corto Plazo, Cuenca del río de Oro.

**DESCRIPCIÓN:** En el presente trabajo se analizó el comportamiento de la recarga mensual por medio del modelo conceptual de tanques distribuido SHIA. El modelo SHIA calcula las diferentes componentes del ciclo hidrológico en cada una de las celdas del modelo digital de elevaciones de la cuenca incluyendo el cálculo de transferencia a las celdas vecinas y al sistema de drenaje superficial. Este modelo se aplicó en la parte alta de la cuenca de Río Frío la cual hace parte de la cuenca de Río de Oro. La Subcuenca cuenta con un área aproximada de 46.32 km<sup>2</sup> abarcando zona rural de Floridablanca. Para llevar a cabo el modelamiento se usó información hidrológica diaria de precipitación y de caudales.

En general, se encontró que el comportamiento de la recarga es de tipo bimodal, similar al del régimen de lluvias de la zona, su magnitud es cercana al 35 % de la precipitación media multianual y los mayores valores se encuentran al final de los periodos húmedos en la Subcuenca. Se recomienda para futuros estudios desarrollar pruebas de campo y laboratorio, que permitan representar de una mejor forma las propiedades hidráulicas del suelo así como trabajar con el modelo no lineal de producción y transferencia de la escorrentía comparando los resultados con aquellos obtenidos al aplicar el modelo lineal aplicado en el presente trabajo.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil,

Director : Sully Gómez Isidro (I.C.,M.Sc., Ph.D)

Codirector: Jorge Alberto Guzmán (I.C., M.Sc.)



## SUMMARY

**TITLE:** MONTHLY RECHARGE ESTIMATION IN THE PART HIGH OF RÍO FRÍO BASIN USING A CONCEPTUAL DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL. \*

**AUTHOR:** EDINSON GOMEZ BORRERO, CARLOS ALBERTO LOPEZ MELO \*\*.

**WORDS KEY:** Distributed Hydrological Model, Estimate of Recharge, Conceptual Model, Hydrological Balance of Short Time, Oro river Basin.

### DESCRIPTION:

In this work the monthly recharge was studied using the distributed tank conceptual model SHIA. The SHIA model computed the main hydrological components in each grid of the digital elevation model of the catchment. The water transfer to the neighboring cells and the surface drainage were also computed. This model was applied to the Río Frío basin which is part of the Río de Oro basin. The basin has an approximate area of 46.32 km<sup>2</sup> covering the Floridablanca rural zone. In order to set-up the model daily precipitation and runoff data were used.

It was found that the recharge of the basin manifested a bimodal behavior (two seasons per year) just like the precipitation in the catchment. The magnitude of the recharge was estimated to be 35% of the annual average precipitation and the biggest values were found at the end of the wet period. It is recommended for future studies to develop field and laboratory experiment to estimate the hydraulic properties of the soil. For future model application it is recommended to work with a non linear water transfer and runoff estimation.



## INTRODUCCIÓN

El desconocimiento del recurso hídrico y su mala administración, la falta de conciencia y la contaminación han derrocado la hipótesis de que el agua es un recurso inagotable. El mal aprovechamiento de este recurso ha hecho que cada vez se esté más preocupado por encontrar otras fuentes y conservar las que se tienen. Por tal motivo, se ha visto el agua subterránea como una alternativa, pero para su explotación en forma sustentable es importante definir volúmenes de extracción, para conservar estas reservas.

La parte alta de la subcuenca del Río Frío ha demostrado ser en estudios realizados con anterioridad, una zona donde se presenta un volumen alto de infiltración y recarga hacia las reservas de agua subterránea. Esta es la razón principal por la que se decidió realizar un estudio que permitiera corroborar tal suposición que ofrezca algunos resultados a partir de la información hidrológica disponible.

El presente estudio es realizado con base en modelo hidrológico distribuido el cual hace un balance hídrico donde se obtienen valores desconocidos de algunas variables que intervienen en el ciclo hidrológico a partir de otras conocidas. El modelo a utilizar es el modelo conceptual de tanques distribuidos SHIA (Simulación Hidrológica Abierta), que se ha utilizado en investigaciones anteriores y del cual se han obtenido resultados confiables.

En el primer capítulo se hará una descripción detallada de la zona de estudio, donde se registra la información de uso de suelo, geología, geomorfología y suelos superficiales, siendo de gran importancia en el desarrollo de esta investigación.



En el segundo capítulo se describe el funcionamiento del modelo hidrológico SHIA, que permitirá conocer la forma como se realiza el balance hídrico en intervalos de tiempo diario, a partir de la información suministrada.

En el capítulo 3 se registra el procesamiento de la información recopilada para ser incluida en el modelo, explicando cada uno de los procedimientos que se hicieron en su estructuración.

En el cuarto capítulo se describe los procesos de calibración y validación junto con los respectivos controles que se tuvieron en cuenta para llegar al mejor ajuste de los parámetros hidrológicos.

En el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos durante el proceso de la calibración, de los parámetros hidrológicos, donde también son analizados con detenimiento.

Finalmente en el capítulo 6 se dan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.



## CAPITULO 1

### SUBCUENCA DE RIO FRIO PARTE ALTA

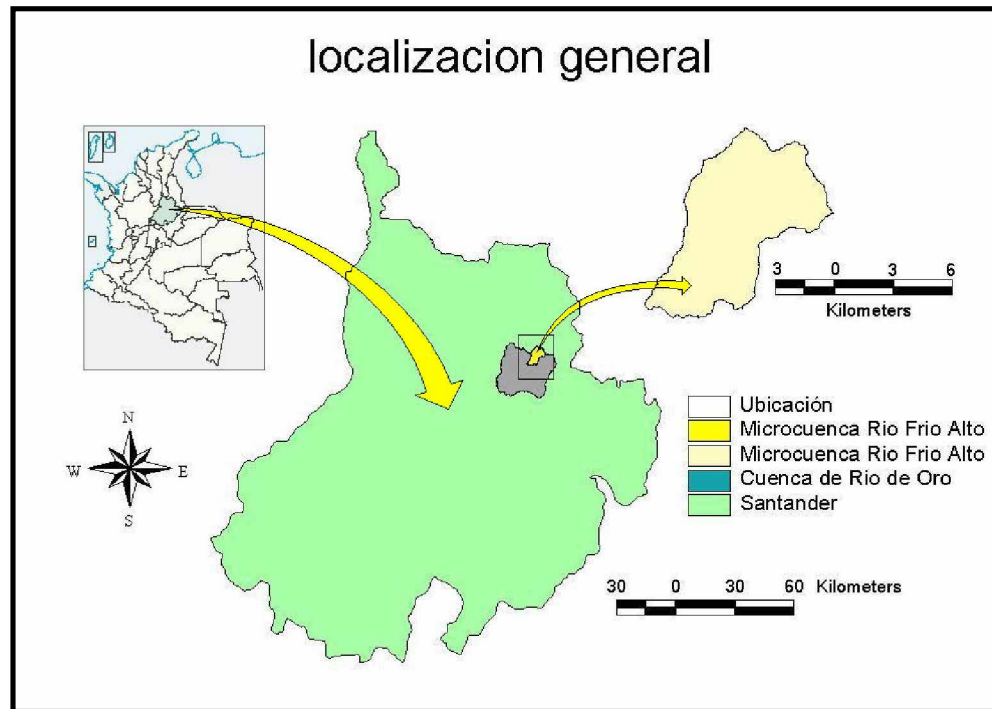
El presente estudio requiere de información detallada, la cual se fundamenta en una descripción física de la zona como la ubicación, el uso de suelo (cobertura vegetal), la forma del suelo (geomorfología), el tipo del suelo superficial, los tipos de formaciones que indican la geología, las estructuras geológicas (fallas) y las propiedades de forma de la cuenca, por otro lado está la descripción hidrológica que se basa en la ubicación, características, datos de precipitación presentados por las estaciones pluviométricas y datos de caudales encontrados en la zona de estudio. Esta información será enumerada y especificada con detalle en el presente capítulo.

#### 1.1 LOCALIZACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

La zona de Río Frío Alto hace parte del grupo de microcuencas que conforman La Cuenca del Río de Oro, esta última pertenece a la cuenca superior del Río Lebrija (C.S.R.L), en el departamento de Santander (Colombia). Este estudio se centra en la parte alta de Río Frío y está conformada por el área que drena a la estación limnimétrica La Esperanza arriba de Floridablanca. Dicha zona está delimitada por las coordenadas 1.282.602 a 1.272.135 Norte y 1.120.010 a 1.110.231 Este. Sus alturas sobre el nivel del mar varían entre los 1050 y 3075 msnm.

El siguiente mapa presenta la ubicación de la zona de estudio dentro del contexto de la cuenca del Río de Oro y a su vez del departamento y del País, lo que permitirá tener una idea mas completa de su ubicación geográfica.



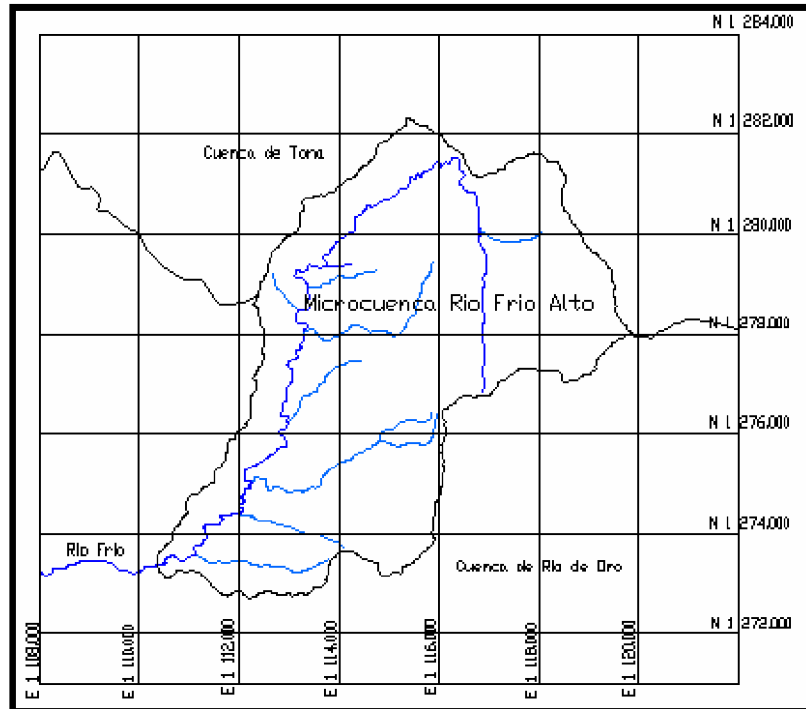


Ø **Fig. 1. Parte alta de la subcuenca Río Frío. Ubicación General.**

La cuenca de Río Frío presenta un área total de 11820 hectáreas y se encuentra ubicada en una región montañosa de la Cordillera Oriental costado oriental de la subcuenca Río de Oro (C.D.M.B.,2003). La parte alta de esta cuenca, objeto del presente estudio, abarca un área de 4632 Hectáreas aproximadamente, siendo delimitada al Norte por la microcuenca del Río Tona, al Oriente por la microcuenca de Río de Oro Alto, al Occidente por la Meseta de Bucaramanga y hacia el sur por la parte baja de la misma microcuenca (Río Frío).

El cauce de Río Frío nace en una elevación de 3050 msnm en el sitio conocido como La Corcova en las divisorias de agua con los ríos Tona y Lato recorriendo una longitud total de 30.1 Km. uniéndose con el Río de Oro en la zona sur-occidental de la meseta de Bucaramanga, siendo la parte alta de Río Frío la zona con mayor receptibilidad de agua sobre la cuenca y posiblemente una zona de un alto valor de recarga subterránea.

En la siguiente figura se observa que existe una red de drenaje apreciable en el área de estudio.



Ø **Fig. 2. Zona de Estudio. Subcuenca Parte Alta del Río Frío.**

Para tener una buena descripción de la zona de estudio se deben conocer algunas características y calcular parámetros físicos del área, las cuales describen las componentes hidrológicas y morfométricas. En la tabla 1 se muestran los parámetros morfométricos de la cuenca de interés, que fueron calculados a partir de la información topográfica e hidrográfica existente. Cabe agregar que en primera instancia fue necesario procesar la información topográfica para obtener la divisoria de aguas de la cuenca y así proceder a calcular los valores morfométricos, que como su nombre lo indica, dependen básicamente de la forma y que dan un primer acercamiento a la posible respuesta hidrológica.

De los parámetros calculados se derivan algunos análisis preliminares que involucran la rapidez con que se produce la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento de lluvia. La Subcuenca presenta un factor de forma bajo que indica que



es alargada y que está menos sujeta a crecientes, y aún más teniendo en cuenta que el cauce principal fluye inicialmente en dirección norte, encontrándose con la falla de Río Frío y cambiando de forma brusca su dirección a S40W, lo cual aumenta el amortiguamiento sobre el flujo del cauce en la zona.

Ø **Tabla. 1. características físicas y morfológicas de la zona.**

<b>Área</b>	46.32 Km <sup>2</sup>
<b>Perímetro</b>	36.077Km
<b>Factor de forma Kf</b>	0.354
<b>Índice de Gravelius Kc</b>	1.485
<b>Orden de Horton</b>	3
<b>Longitud de la corriente principal</b>	19.574Km
<b>Densidad de drenaje</b>	0.892
<b>Sinuosidad de las corrientes</b>	1.148
<b>Pendiente de la corriente principal</b>	7.15%
<b>Pendiente media de la cuenca</b>	41.00%
<b>Altura media de la cuenca</b>	1967.57msnm

El índice de Gravelius de 1.48 indica una similitud relativamente baja entre la subcuenca y un círculo con la misma área, concluyendo que existe una tendencia baja a las crecientes debido a la separación entre el punto más alejado de la cuenca y el punto de control. La pendiente alta de la red hídrica condiciona las altas pendientes de las curvas de recesión en el hidrograma, indicando esto la rápida estabilización del cauce luego de las avenidas.

Para el estudio detallado de la estructura y composición de parte alta de la cuenca de Río de Frío se tomó como referencia el **“Estudio de Plan de Ordenamiento Ambiental de la Subcuenca de Río de Oro”**, documento desarrollado por la C.D.M.B en el año 2003, del cual se utilizaron los mapas de Río de Oro encontrados en formato .dwg de Autocad® y manipulados para extraer la zona de interés para el estudio. Dichos mapas resultantes son analizados para la evaluación de las zonas encontradas dentro del área. A continuación en los





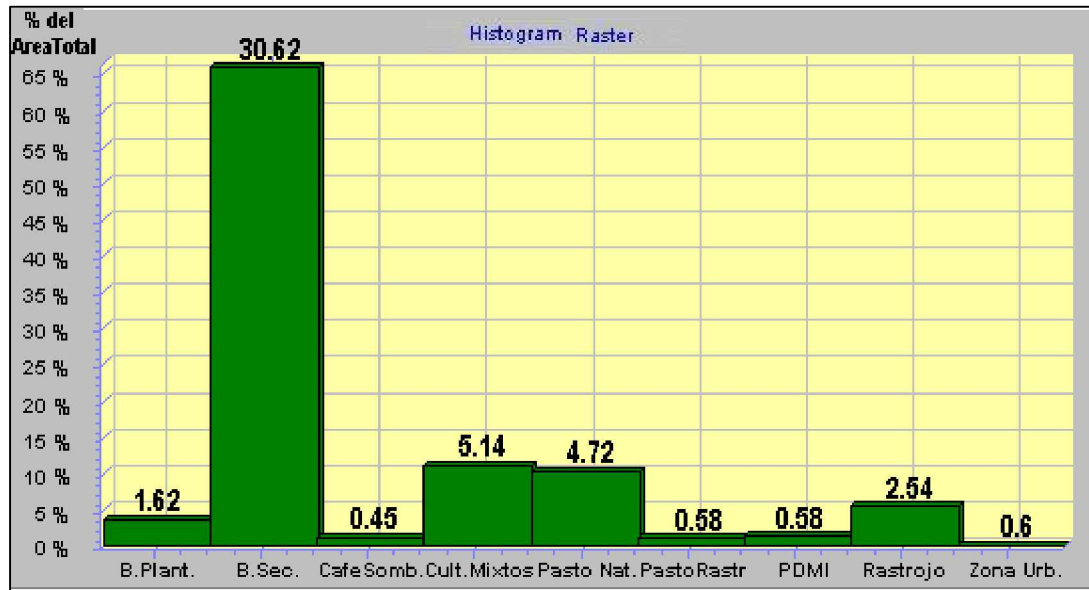
Ø **Tabla 2. Clasificación de coberturas y uso de las tierras de Río Frío Alto.**

GRAN GRUPO	GRUPO	SUBGRUPO
TIERRAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS AGRÍCOLAS MIXTOS	Cultivos transitorios, permanentes y semipermanentes
	POTREROS ABIERTOS	Pastos naturales
TIERRAS AGROFORESTALES	SILVOAGRICOLA	Café + sombrío
	SILVOPASTORIL	Caña-caracoli
BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Bosque natural secundario
		Rastrojo
	BOSQUE PLANTADO	Coníferas
INFRAESTRUCTURA CONSTRUIDA	URBANA	Zona Urbana

(C.D.M.B, 2003)

El siguiente histograma de frecuencias elaborado con el software IDRISI-32, exportando los datos desde Arview, muestra sobre el eje vertical el porcentaje de cada uno de los tipos de vegetación que cubren la Parte Alta de Río Frío y en cada una de las barras del histograma el área respectiva, en el que se observa que el tipo de cobertura vegetal predominante es el Bosque secundario, el cual cubre el 65% de esta, seguido por los Cultivos mixtos y Pasto natural con aproximadamente un 10% cada uno y del resto ninguno excede el 5% de cobertura, diferencia que puede influir en el comportamiento de la zona y su respuesta hidrológica, lo cual será analizado con detenimiento y comprobado en el capítulo 4 de este documento.





Ø **Fig. 4 Histograma de frecuencia de Cobertura Vegetal.**

A continuación se definen los grupos de coberturas nombrados en la Tabla 2; se describen los subgrupos en los cuales se encuentran divididos y las plantas y cultivos encontrados en estas zonas:

Ø **Tierras agropecuarias.**

Son dedicadas principalmente al desarrollo de actividades de *cultivos permanentes* y transitorios de hortalizas, aromáticas y algunos *cultivos semipermanentes* como la mora y tomate de árbol principalmente.

Ø **Tierras agroforestales.**

En orden de importancia se destacan los cultivos de *café con sombrío* de guamos, nogal cafetero y plátano.



Otro tipo de sistema agroforestal es la *caña con caracoli* que fue encontrado en menor proporción.

#### Ø **Bosques.**

Es el tipo de uso suelo mas común en la parte alta de Río Frío, está comprendido por dos subdivisiones de tipo de bosque, el primero es el bosque natural el cual comprende *bosque natural secundario* y rastrojo, el segundo es el *bosque plantado* de coníferas, solo quedan unas mínimas extensiones de los suelos ocupados por bosques que están siendo degradados a un ritmo creciente de tala de bosques y cambio de uso por establecimiento de pasturas y cultivos transitorios como hortalizas y semipermanentes como la mora de castilla.

#### Ø **Zona Urbana.**

La *zona urbana* comprende un área mínima en la parte alta de Río Frío, ubicada al sur-occidente de la zona de estudio.

### **1.3 SUELO SUPERFICIAL.**

En este numeral se describen los suelos superficiales que conforman la cuenca; entendiéndose por suelo superficial aquel que se encuentra en la parte superior de la corteza y cuyo espesor no sobrepasa los dos metros y medio de profundidad; los diferentes tipos de suelos encontrados sobre la zona de estudio son descritos en forma detallada por el “Estudio de Plan de Ordenamiento Ambiental de la Subcuenca de Río de Oro”, el cual asocia cada formación a símbolos que son a su vez definidos de acuerdo al clima, al paisaje, la pendiente y al grado de erosión si este existe;



estas definiciones se encuentran enumeradas en la Tabla 3. La zona de estudio presenta los siguientes tipos de suelo: PRg, FRg, LRg, SRg, MRf, MRg1, RRg1.

Ø **Tabla 3. Definición de la nomenclatura utilizada para los suelos superficiales (C.D.M.B, 2003).**

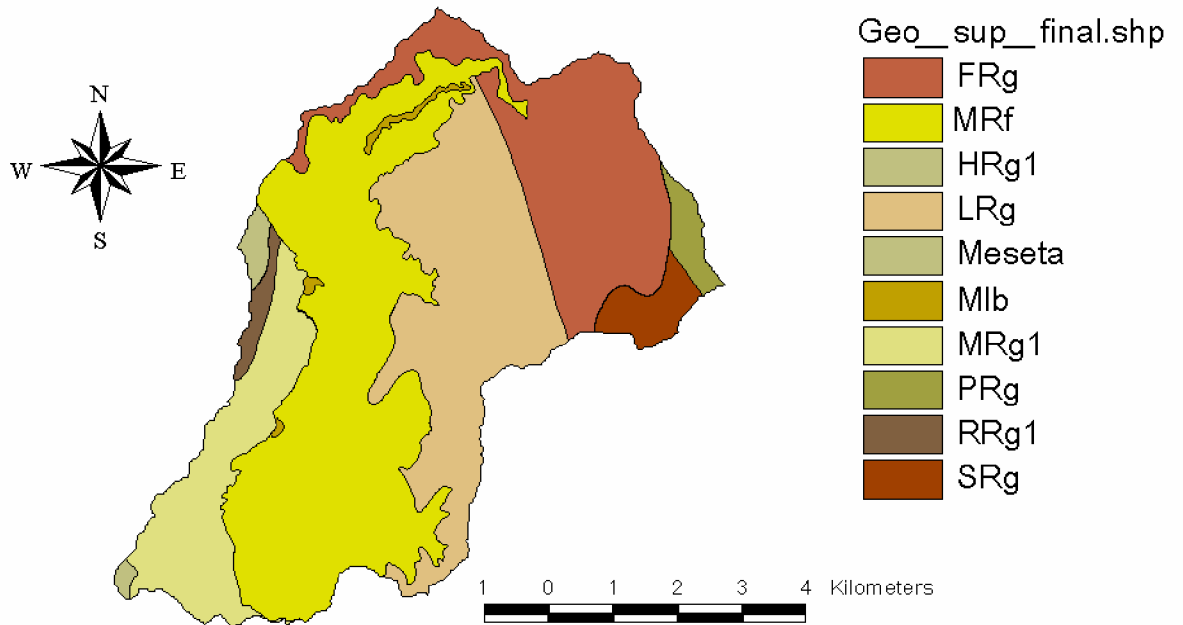
CLIMA	PAISAJE	GRADIENTE DE PENDIENTE	GRADO DE EROSIÓN
<u>P</u> =Subpáramo, muy Frío y ligeramente húmedo. <u>S</u> =Subpáramo, muy Frío y moderadamente húmedo <u>E</u> =Frío moderadamente húmedo. <u>L</u> =Frío semihúmedo <u>H</u> =Medio muy húmedo. <u>R</u> =Medio moderadamente húmedo <u>G</u> = Medio ligeramente húmedo <u>M</u> =Medio semihúmedo <u>I</u> =Medio semiseco <u>C</u> =Cálido semiseco	R =Crestas Ramificadas K =Cuesta C =Cornisa D =Talud de Derrubio L =Lomas A =Lomas muy erosionadas (abanico torrencial bad lands) E =Relictos de abanico torrencial I = Vallecitos intermontanos V =Vegas F =Terraza recientes T =Terrazas recientes G =Terrazas antiguas	a = pendiente 1-3%. Topografía plana b = pendiente 3-7%. Topografía ligeramente inclinada y ligeramente ondulada c = pendiente 7-12%. Topografía ondulada e inclinada d = pendiente 12-25%. Topografía fuertemente ondulada y fuertemente inclinada e = pendiente 25-50%. Topografía fuertemente ondulada, ligeramente quebrada y ligeramente escarpada f = pendiente 50-75%. Topografía fuertemente quebrada y escarpada g = pendiente > del 75%. Topografía muy escarpada	1: Ligero 2: Moderado 3: Severo 4: Muy Severo
			<b>OTROS</b>
			p= pedregosidad r= afloramiento rocoso

C.D.M.B, 2003

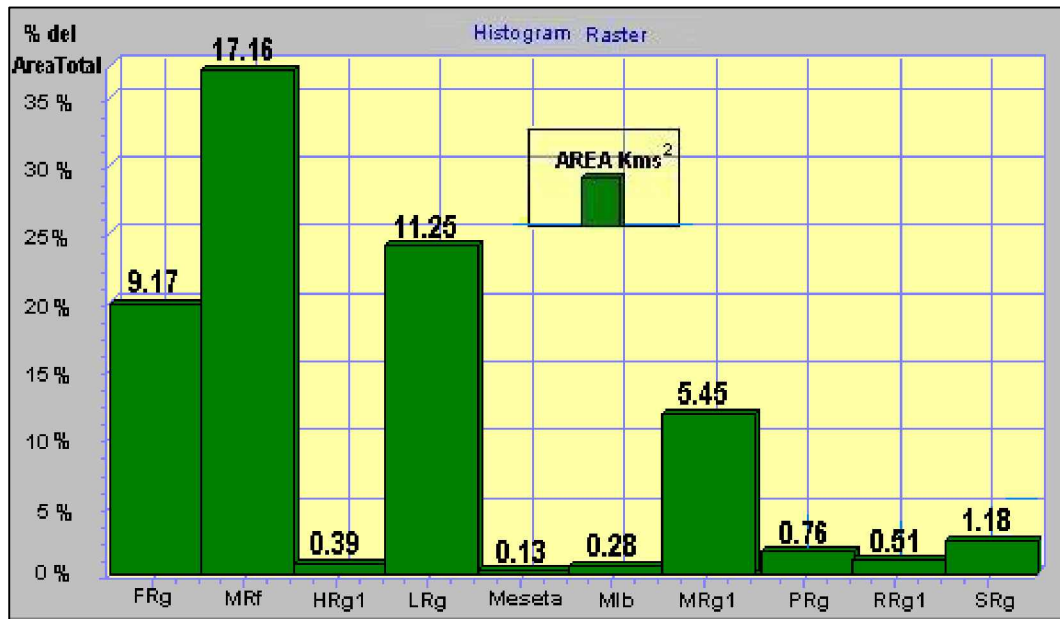
Por ejemplo: para el tipo de suelo PRg se deduce que se encuentra en un Subpáramo muy frío y ligeramente húmedo (P), con crestas ramificadas (R), con pendientes mayores del 75% y topografía muy escarpada (g), y sin erosión; Aplicándose análogamente para los demás tipos de suelo.



### Suelo Superficial



Ø *ig. 5. Mapa de Tipos de Suelo.*



Ø *Fig. 6. Histograma de frecuencia de tipo de suelo*



En la figura anterior se representa gráficamente los tipos de suelos y su ubicación dentro de la zona de estudio. En la figura 6 se muestra el histograma de frecuencia del parámetro en cuestión donde se analizan los porcentajes de área que ocupa cada uno de los tipos de suelo superficial presentes en la zona de estudio, lo cual da una visión global del posible comportamiento de la infiltración en el modelo de acuerdo con las características de los suelos predominantes como el MRf (Franco arcilloso) que según la clasificación de la Tabla 3 se encuentra en un clima Medio Semihúmedo con Crestas ramificadas y pendiente 50-75% con Topografía fuertemente quebrada y escarpada, que ocupa poco mas del 35% del área total de la zona, además basados en la estratigrafía descrita en el numeral 1.3.3 de este capítulo, y que está definida para cada uno de los tipos de suelos en los siguientes numerales.

Ø **Tabla 4. Tipo de suelos.**

Símbolo	Características de los suelos
MRg1	Topografía fuertemente quebrada o escarpada con pendientes mayores del 75%. Textura Franco arcillosa. Fertilidad baja.
Mlb	Topografía ligeramente plana a ligeramente inclinada, con pendientes 1-3-7%, textura franco arenosa sobre franca. Fertilidad media
RRf	Topografía fuertemente quebrada con pendientes mayores del 50%. Textura Franco arcillosa. Fertilidad baja.
MRf	
LRg	Topografía fuertemente quebrada con pendientes mayores del 75%. Textura Francoarcillo arenosa sobre arcillo arenoso gravillosa. Fertilidad baja
HRg1	
RRg1	
PRg	
SRg	
FRg	

Fuente: C.D.M.B 2003



A continuación se describirá la composición -y estratigrafía de cada una de las zonas de acuerdo a las asociaciones de formaciones de suelos descritas en el documento de referencia.

### **1.3.1 Fase PRg y SRg.**

Los suelos que conforman la Fase PRg se encuentran en la parte más alta de la zona de estudio, con altitudes de 2.600 a 3.000 msnm, dentro de un clima muy frío, ligeramente húmedo, Caracterizado por una temperatura media anual inferior a 12° C y una precipitación media anual por encima de 1400 mm.

Los suelos que conforman la Fase SRg presentan un clima muy frío moderadamente húmedo, contiguo a la anterior unidad (PRg), con altitudes de 2.600 a 3.100 msnm. Al igual que la unidad PRg se localizan en la parte alta de la zona de estudio.

El 50% de estas unidades se caracterizan por presentar un perfil de nomenclatura A - B – C - Cr, donde el horizonte A es pardo oscuro y de textura franco arcillo arenoso con gravilla y menos del 1% de piedra; al que subyace un horizonte B grueso, de color pardo amarillento oscuro y de textura arcillo arenosa con gravilla y menos del 1% de piedra; el C es de color pardo amarillento y de textura arcillo arenosa gravillosa con menos del 1% de piedra, el Cr corresponde a cuarzomonzonita o Gneiss altamente meteorizado y su color es pardo amarillento. Son suelos bien drenados, profundos. Su fertilidad natural es baja. Un 40% presenta un perfil de tipo A – B - Cr; en donde los horizontes A tienen colores pardo oscuro y pardo grisáceo muy oscuro, y textura franco arcillo limosa, el horizonte B alcanza un espesor hasta de 100 cm., es de color pardo amarillento oscuro y pardo amarillento y su textura varía de franca a arcillosa; el Cr es material de roca metamórfica en alto grado de meteorización con un 10% de fragmento en proceso de meteorización. Son profundos, bien drenados. Su fertilidad natural es



baja. El 10% restante se caracteriza por presentar un perfil A - R; negro, franco arcillo arenoso que descansa directamente sobre la roca.

### **1.3.2 Fase FRg y LRg.**

Geográficamente los suelos que conforman la fase FRg de esta asociación se localizan en la parte alta de la zona de estudio, en territorio del Municipio de Floridablanca, con altitudes de 2.000 a 2.700 msnm, en un clima frío, moderadamente húmedo, donde la pluviosidad promedio anual oscila de 1200 a 1400 mm y la temperatura media anual es de 14 a 15°C.

La Fase LRg se presenta en un clima frío semihúmedo con una pluviosidad media anual de 1200 a 1300mm y un rango de temperatura media anual de 12 a 16°C; esta fase se localiza en la parte media alta de la zona de estudio, veredas La Judía, Aguablanca y San Ignacio.

La descripción de este tipo de suelos es similar a la de las fases PRg y SRg, con las mismas características estratigráficas y proporciones de 50, 40 y 10%.

### **1.3.3 Fase MRf.**

Los suelos de la Fase MRf se localizan en la parte media de la zona de estudio de Río Frío. La altitud varía de 1.100 a 2.100 msnm; dentro de un clima ambiental medio, semihúmedo; donde la temperatura oscila de 16 a 18°C y las lluvias van de 1.200 a 1.300 mm de precipitación promedio anual.

Conforman la asociación los suelos Typic Dystrudepts en un 50%, los suelos Typic Udorthents en un 40% e inclusiones de suelos Oxíc Dystrudepts en un 10%.



El 50% de esta fase presenta un perfil típico de nomenclatura A-B-Cr; el horizonte A que es de color pardo grisáceo muy oscuro, se encuentra sepultado por un horizonte de 25cm. de espesor de color pardo amarillento oscuro, ambos son de textura franco arcillosa. El horizonte B, alcanza un espesor de 70cm., es de color pardo amarillento y de textura arcillosa. El Horizonte Cr es material saprolítico, de color oliváceo amarillo y su textura es arcillo arenosa con abundantes granos de cuarzo. Son suelos bien drenados, profundos y se encuentran indistintamente en las diferentes formas de terreno de los relieves de Crestas, principalmente en las laderas superiores y resaltos de las laderas intermedias. La fertilidad natural es baja. Un 40% de textura franco arcillo arenosa gravilosa y franco arenosa gravilosa. Predominan en las laderas de las Crestas. Son profundos, limitados por material saprolítico, son bien drenados, La fertilidad natural es baja. El 10% restante es de textura arcillosa, son moderadamente profundos, limitado por compactación del material mineral y bien drenado. Ocupa áreas de los resaltos de las laderas superiores. La fertilidad natural es baja.

#### **1.3.4 Fase MRg1, HRg1 y RRg1.**

Los suelos de la fase MRg1 se localizan geográficamente en la parte media de la cuenca de Río Frío, la altitud varía de 1.000 a 1.600 msnm; dentro de un clima ambiental medio, semihúmedo; donde la temperatura oscila de 19 a 23°C y la precipitación promedio anual varía de 1.000 a 1.600 mm.

Los suelos de la fase HRg1 se localizan a una altitud entre 1.700 y 2.000 msnm; dentro de un clima ambiental medio, superhúmedo; donde la temperatura oscila alrededor de 18°C y la precipitación promedio anual varía de 2.000 a 1.700 mm.



Los suelos de la fase RRg1 se localizan a una altitud de 1.700 y 1.500 msnm; dentro de un clima ambiental medio, moderadamente húmedo; donde la temperatura oscila de 20 a 18°C y la precipitación promedio anual varía de 1.700 a 1.600 mm.

La descripción de cada una de las fases nombradas con anterioridad presenta las mismas características estratigráficas y las mismas proporciones que la fase MRf.

### **1.3.5 Fase MIb.**

Esta unidad se localiza en la subcuenca Oro Alto en las veredas Sevilla y El Polo, a una altura de 1.500 msnm., donde se manifiesta un clima medio, semihúmedo; caracterizado por una temperatura media anual de 16 a 17°C y una precipitación promedio anual entre 1.200 y 1.300 mm. También en la Subcuenca Río Frío se presenta este tipo de suelos en la Vereda La Judía, junto al cauce del río entre las cotas 1.500 y 1.300 msnm con pluviosidad media anual de 1.200 a 1.400 mm y temperatura promedio de 16 a 21°C.

Los suelos de esta unidad tienen un perfil de nomenclatura A - AC - C, caracterizado por un horizonte negro, con texturas franco arenosa y arenosa franca, el cual descansa sobre un horizonte transicional AC de color pardo rojizo oscuro, textura franca con abundantes fragmentos de roca; el horizonte C es amarillo parduzco y textura franca con abundantes fragmentos de roca. Son bien drenados, superficiales; moderadamente ácidos, pobres en calcio y magnesio. Fertilidad natural media.



## 1.4 GEOLOGÍA.

Partiendo de la caracterización geológica en el estudio de la Subcuenca del Río de Oro hecha por la C.D.M.B. 2003, se obtuvieron los datos y la información necesaria como la estratigrafía, la geología estructural y las formaciones existentes en la zona, y de igual forma se manipularon los mapas para extraer aquellas pertenecientes al área de estudio donde cabe anotar que la Subcuenca de Río Frío abarca áreas sobre dos bloques tectónicos regionales, que corresponden al Macizo de Santander y la zona de Mesas, sectores localizados al Este y Oeste respectivamente de la Zona de estudio. Estos bloques están separados por la falla de Bucaramanga que tiene dirección Noroeste y constituye la estructura regional más importante del área y el lindero entre la meseta de Bucaramanga y la zona de estudio ubicada al este de esta falla.

El Macizo de Santander, es una estructura regional alargada de dirección NW-SE, extendiéndose desde la falla de Bucaramanga al Oeste, hasta cercanías de las poblaciones de Chitagá y Pamplona al Este. En el macizo predominan rocas ígneo-metamórficas precretácicas que constituyen el zócalo o basamento. La parte media y alta de la cuenca Río Frío, se localiza sobre el flanco centro occidental del Macizo de Santander.

### 1.4.1 Estratigrafía.

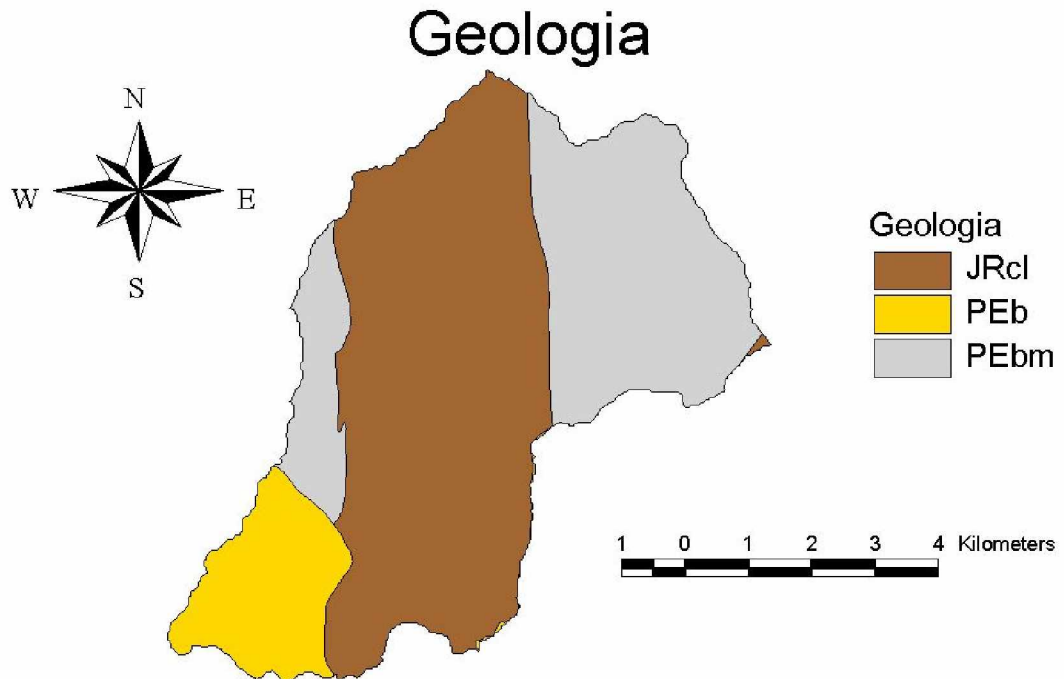
En la parte alta Río Frío se presentan rocas ígneo - metamórficas y sedimentarias con edades que van desde el Precámbrico hasta el Cretáceo. Estas unidades de roca se encuentran cubiertas parcialmente por depósitos cuaternarios de origen diverso. Las descripciones lito-estratigráficas originales son tomadas de



Ward, Goldsmith, Cruz y Restrepo 1973, con nomenclatura empleada para la Cordillera Oriental y el Valle del Magdalena Medio.

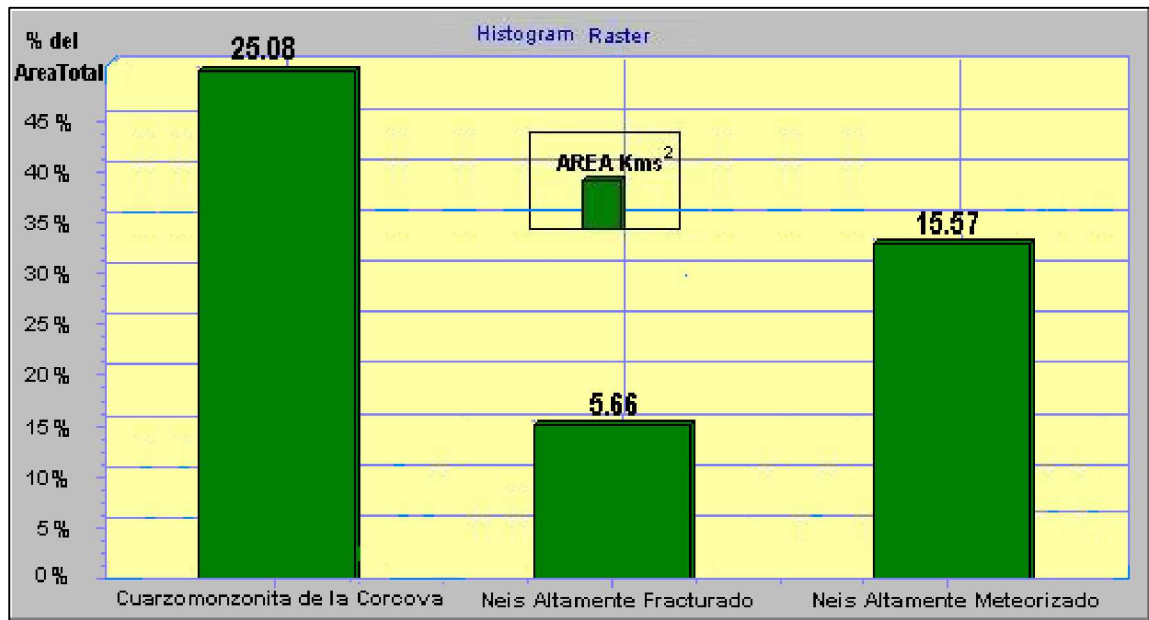
Las rocas metamórficas están agrupadas dentro de la Formación Gneiss de Bucaramanga (**pEb**), y se distribuye en la parte alta y media de Río Frío intruida por abundantes masas de Ortoneiss (**pDo**). Las rocas ígneas se encuentran distribuidas sobre la parte media alta de Río Frío y se encuentran representadas por la cuarzomonzonita de La Corcova (**JRcl**) de edad mesozoica (Triásico-Jurásico) que intruyen rocas metamórficas más antiguas (Gneisses). Las formaciones sedimentarias, se localizan fuera de la zona de estudio en la parte baja de Río Frío comprenden mayoritariamente rocas mesozoicas de origen continental (**Jg, Jj y Kita**) y de origen marino, estas últimas constituidas por la Formación Diamante (**PCd**) del Paleozoico.

En la figura 7 se muestra el mapa de Geología que contiene las formaciones presentes en la zona de estudio.



Ø **Fig. 7. Mapa geológico.**





Ø Fig. 8. Histograma de frecuencia. Unidades Geológicas

Se observa que la zona de estudio contiene un 50% de formaciones ígneas y el otro 50% dividido entre las formaciones metamórficas, las cuales son gneisses con dos tipos de características diferentes dadas las condiciones a las que se han sometido en la historia, dichas formaciones se describen a continuación.

Ø Tabla 5. Unidades Geológicas. Riofrío Alto.

Edad	Código	Formación
Precámbrico	p€bm	Gneiss de Bucaramanga altamente meteorizado.
	p€b	Gneiss de Bucaramanga altamente fracturado.
Mesozoico	JRcl	Cuarzomonzonita de la Corcova.

Fuente: C.D.M.B 2003



### 1.4.1.1 Precámbrico

#### ü **Gneiss de Bucaramanga – pCb**

Su nombre fue dado por Ward y Goldsmith, 1973 y consiste en rocas metasedimentarias de alto grado de metamorfismo comprendiendo principalmente Gneiss biotítico y anfibólico y en menor proporción Gneiss cuarzofeldespático y migmatitas. Su distribución dentro de la Parte alta Río Frío se divide en dos sectores, el primero (**pCb<sub>m</sub>**) en la parte alta correspondiente a la margen derecha de Río Frío en las veredas San Ignacio y Aguablanca del Municipio de Floridablanca; en este sector el Gneiss de Bucaramanga se encuentra intruido por abundantes masas de Ortoneiss y tiende a presentarse altamente meteorizado con suelos residuales limoarenosos espesos.

El segundo sector (**pCb**) se localiza en las veredas Vericute, Rosablanca, El Mortiño, Helechales, Casiano, Alsacia, Guayanas, Altos de Mantilla y Mensulí, sobre el borde oriental de la Falla de Bucaramanga, formando un cuerpo alargado de 1 a 5 Km. de ancho con dirección NW; en este sector el Gneiss tiende a encontrarse altamente fracturado y el desarrollo de suelos residuales es menor.

### 1.4.1.2 Mesozoico.

#### ü **Cuarzomonzonita de la Corcova (JRcl).**

Es una roca ígnea equigranular de grano fino a medio y de textura sacaroide con biotita uniformemente diseminada de color gris. Se asume una edad semejante con los batolitos principales del Macizo de Santander. La roca está compuesta de



30 a 35% de cuarzo, 25 a 45% de plagioclasa, 30 a 45% de feldespato potásico; un 3% de biotita y trazas hasta de 2% de moscovita (Ward et al, 1973).

Se localiza en la parte media alta de la zona de estudio, sobre las márgenes de Río Frío en las veredas San Ignacio, Aguablanca, La Judía y Alsacia, extendiéndose como una faja alargada de aproximadamente 4 Km. de ancho con dirección Norte-Sur, intruyendo al Gneiss de Bucaramanga.

### **1.4.2 Geología Estructural**

En el sector del Macizo de Santander donde se encuentra la zona de estudio, se presentan fallas regionales menores de tipo normal y lineamientos fotogeológicos, con dirección general hacia el Noreste. Se observa el control estructural en el cambio de curso repentino del Río Frío y en otros aspectos como la presencia de pendientes estructurales y sillas de falla en zona de escarpe.

En general, la tectónica de la región está determinada por una serie de fallas de gran longitud de tipo normal que muestran una dirección predominante NE- SW y NW-SE y que tienen asociadas fallas satélites en todas las direcciones al igual que una serie de lineamientos claramente apreciados y que se reflejan en el grado de fracturamiento de las rocas aflorantes.

#### **Ü Falla de Bucaramanga**

Es uno de los accidentes más representativos del nor-oriente colombiano, ya que se extiende desde el norte del Departamento de Boyacá hasta Santa Marta incluso penetrando la plataforma continental con una longitud estimada de 550 Kms. Es una falla de desplazamiento de rumbo lateral izquierdo y localmente inversa, que



forma la faja sur-oeste del Macizo de Santa Marta y el Macizo de Santander como lo indica Kellog J.N (1.984).

Este sistema de fallas con numerosas estructuras transversales y subparalelas, ha estado activa durante el pleistoceno, como lo constatan las evidencias de neotectónica sobre depósitos que han sido deformados, levantados y basculados, ubicados sobre diferentes sectores del área Metropolitana, hechos que corroboran la actividad posterior sobre la terraza de Bucaramanga, la cual es relativamente contemporánea con los depósitos que se encuentran en los valles de Guatiguará, Mensulí, Río de Oro y Quebrada Grande.

La actividad de la falla se hace manifiesta por la presencia de cerros alineados y lagos de origen estructural como es el caso de Pan de Azúcar, Morrórico, La Cumbre y los Lagos del Cacique. Morfológicamente, la Falla de Bucaramanga separa claramente el Macizo de Santander, la zona de mesas y cuevas y los valles intramontanos entre Piedecuesta y Floridablanca.

Sobre el flanco occidental del Macizo de Santander se observan fallas que corren subparalelas al trazo principal y que hacen parte del sistema, como en es caso de las Fallas de Umpalá, Río Lato, Sevilla, La Corcova y Río Perchiquez. Estas han desplazado localmente el trazo de la Falla de Bucaramanga en sentido lateral derecho por los esfuerzos tensionales ocurridos durante su activación.

Con respecto a la zona de estudio, esta estructura regional la atraviesa en una distancia aproximada de 10 Kms. al este de Floridablanca, sobre la zona de piedemonte del Macizo de Santander, desde la Quebrada Mensulí hasta el sector de Lagos del Cacique.



## Ü Falla Río Frío

Es una estructura normal, de más de 25 km. de longitud, que se desprende de la Falla de Bucaramanga al Este del Municipio de Floridablanca. Tiene dirección N40°E, sigue el curso del Río Frío en su parte media hasta los alrededores del corregimiento de La Corcova, donde se une a la Falla Río Lato y continúa con dirección N20°E hasta la Microcuenca del Río Charta, esta falla atraviesa rocas del Gneiss de Bucaramanga y de la Cuarzomonzonita de La Corcova.

## 1.5 GEOMORFOLOGÍA

Una de las variables importantes del presente estudio es la Geomorfología, la cual como su nombre lo indica, es la encargada de describir la forma del relieve. En este numeral se analizará la morfometría de la zona, los procesos morfodinámicos y lo más importante la caracterización que define las unidades geomorfológicas. Esta información fue extractada del documento del cual se ha venido haciendo mención en los numerales anteriores, la cual se halló en formato .dwg de Autocad.

### 1.5.1 Morfometría

La parte alta de Río Frío presenta predominantemente una topografía de pendientes empinadas, con divisorias de aguas agudas y fenómenos de erosión relativamente intensos.



### 1.5.2 Procesos Morfodinámicos

La presencia de suelos residuales en espesores que en ocasiones alcanzan los dos o tres metros de profundidad y las inadecuadas prácticas agrícolas, generan de manera localizada la ocurrencia de procesos de remoción en masa, que no afectan la estabilidad global de la zona, pero que sin embargo deben ser subsanados a fin de evitar su avance sobre el resto del área.

En la zona (Vereda Aguablanca), sobre las estribaciones del Cerro La Judía, se presenta una zona inestable aledaña a la Quebrada Aguablanca que ha generado desprendimientos de suelo y roca obstruyendo temporalmente el cauce de Río Frío.

### 1.5.3 Caracterización Geomorfológica

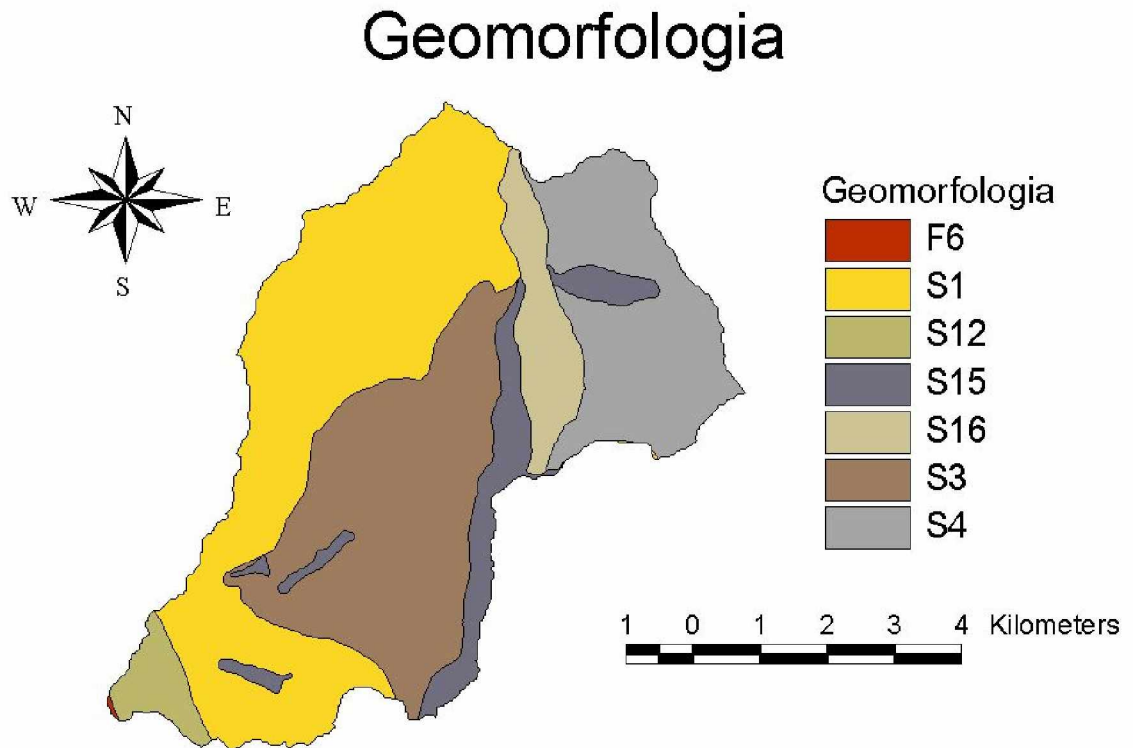
La determinación de las unidades geomorfológicas, se fundamentó en el sistema propuesto por el ITC de Holanda, el mismo empleado para la elaboración de la microzonificación sísmica en la ciudad de Bucaramanga por el Ingeominas y la CDMB, propuesto por H Verstappen R V Zuidam (1.992).

En cuanto a las unidades geomorfológicas presentes en la zona, debe indicarse que existen al igual que en el aspecto geológico la influencia de dos zonas bien diferenciadas por la Falla de Bucaramanga, la primera al oriente con la influencia de unidades estructurales denudacionales que ocupa casi toda la zona de estudio y la segunda al oeste representada por unidades de origen fluvial y denudacional, la cual ocupa aproximadamente poco menos del 1% del área de la zona de estudio como se observa en el histograma de la figura 10. Unidades de origen denudacional estructural afloran sobre la zona de estudio, representadas por escarpes de falla, pendientes escalonadas, filos rocosos y depresiones



estructurales y las zonas de vida que se encuentran son de bosque húmedo Premontano (bh-P) y bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB) , así como una zona de poca extensión al sur occidente que comprende la unidad de origen fluvial, las zonas de vida presentes son de bosque seco tropical (bs – T), bosque húmedo Premontano (bh – P) y bosque seco Premontano (bs – P), no presentando unidades de origen denudacional.

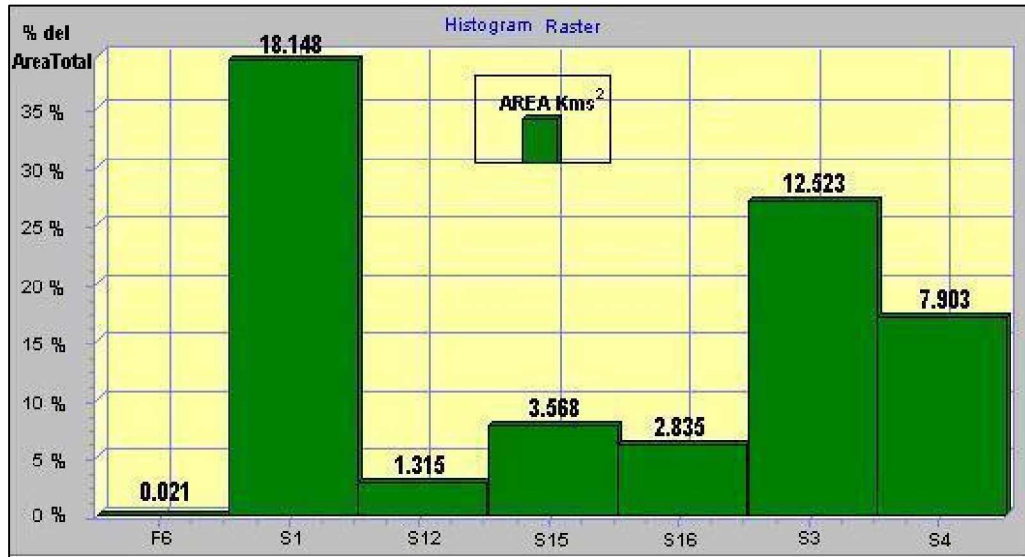
A continuación se encuentra el mapa de geomorfología (figura 9), y el histograma calculado que representa numéricamente la composición de la zona en cuanto a tipos de unidades de pendientes y tipo relieve.



∅ **Fig. 9. Mapa Geomorfológico.**



Las unidades con mayor presencia en la zona son las de pendientes entre moderadas y altas, lo cual indica que la zona podría tener una respuesta de drenaje superficial bastante rápida lo cual se observará en los resultados del modelamiento hidrológico.



Ø Fig.10. Histograma de frecuencia. Unidades Geomorfológicas.

Ø Tabla 6. Formas de Origen Estructural Denudacional Río Frío Alto.

Código	Unidad	Características Generales
S1	Topografía ondulante a rizada con sistemas de drenaje relacionados a fracturas, fallas o patrones de esquistosidad.	Pendientes suaves a moderadamente disectadas.
S3	Topografía rizada a colinada con sistema de drenajes predominantemente a fracturas, fallas o patrones de esquistosidad.	Pendientes moderadamente empinadas a empinadas. Moderadamente a severamente disectadas.
S4	Pendientes escalonadas.	Topografía con pendiente moderadamente empinada a muy empinada con patrón linear.
S12	Escarpes de falla y escarpes de línea de falla.	Pendientes moderadamente empinadas. Moderadamente a severamente disectadas.
S15	Filos rocosos	Formas sobresalientes estrechas y alargadas orientadas por el rumbo de las rocas y/o limitadas por fallas.
S16	Depresión estructural	Zonas afectadas por fallas y estratificación.

Fuente: C.D.M.B 2003



En las dos Tablas 6 y 7 se describe en forma detallada las unidades Geomorfológicas presentes en el área de estudio, agrupadas de acuerdo a sus formas de origen.

Ø **Tabla 7. Formas de Origen Fluvial. Río Frío Alto.**

Código	Unidad	Características generales
F6	Terrazas fluviales	Topografía con pendientes aproximadamente planas a suavemente empinadas. Ligeramente a moderadamente disectadas.

Fuente: C.D.M.B 2003

La información enumerada a lo largo del presente capítulo y que involucra desde un punto de vista global, la forma, la textura y en síntesis la caracterización física de la subcuenca, tiene lugar en la parametrización del modelo, donde dicha parametrización es el resultado de una serie de procesamientos de la información expuesta. Los pasos para el cálculo de los parámetros que alimentan el modelo hidrológico son explicados detalladamente en el capítulo 3 del presente informe.

## 1.6 PRECIPITACIÓN

En la zona de estudio el régimen de lluvias es de tipo bimodal debido a que la zona de convergencia intertropical la atraviesa dos veces por año, y por lo tanto existen dos temporadas lluviosas anualmente: la primera se extiende desde mediados de abril a mitad del mes de junio y la segunda de mitad de agosto hasta mediados de noviembre; durante el resto del año se observa dos períodos secos: el primero de diciembre a marzo y el segundo, menos severo entre junio a julio.



Las estaciones que aportan información diaria de precipitación al presente trabajo de grado encontradas dentro del área de estudio son: La Galvicia monitoreada por el IDEAM, la Mariana y la Esperanza monitoreada por la CDMB.

En la **Tablas 8 y 9**, y la **Figura 11** se presentan datos medios mensuales multianuales de precipitación correspondientes a las estaciones PM La Galvicia y PM La Mariana, para el periodo comprendido entre 1990 y 2000, con el fin de ilustrar el comportamiento bimodal de este fenómeno. Cabe anotar que esta información es solo ilustrativa y no se tiene en cuenta para el modelamiento ya que el modelo se alimenta de datos diarios de precipitación.

Ø **Tabla 8. Precipitación mensual Estación La Galvicia [mm] - Código 2319040 (1.779 msnm).**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	67,0	66,0	215,0	236,0	221,0	117,0	133,0	190,0	70,0	283,0	213,0	120,0	1931,0
1991	130,0	49,0	243,0	201,0	235,0	137,0	252,0	177,0	204,0	217,0	192,0	66,0	2103,0
1992	108,0	53,0	12,0	154,0	199,0	117,0	168,0	125,0	100,0	75,0	167,0	82,0	1360,0
1993	50,0	119,0	105,0	160,0	184,0	126,0	108,0	137,0	140,0	180,0	160,0	47,0	1516,0
1994	98,0	132,0	119,0	119,0	238,0	97,0	123,0	161,0	149,0	143,0	249,0	61,0	1689,0
1995	32,0	75,0	107,0	174,0	166,0	187,0	170,0	242,8	177,0	338,0	74,0	105,0	1847,8
1996	104,0	105,0	266,0	188,0	200,0	338,0	222,0	138,0	145,0	244,0	77,0	171,0	2198,0
1997	103,0	49,0	170,0	272,0	68,0	146,0	133,0	55,0	238,0	120,0	151,0	65,0	1570,0
1998	91,0	131,0	93,0	140,0	330,0	320,0	240,0	176,0	215,0	233,0	177,0	226,0	2372,0
1999	107,0	178,0	224,0	143,0	217,0	227,0	284,0	243,0	431,0	266,0	293,0	47,0	2660,0
2000	340,0	162,0	145,0	107,0	185,0	102,0	130,0	201,0	267,0	186,0	131,0	38,0	1994,0
2001	34,0	53,0	141,0	109,0	157,0	87,0							581,0
TOT.	1230,0	1119,0	1699,0	1894,0	2243,0	1914,0	1963,0	1845,8	2136,0	2285,0	1884,0	1028,0	
#	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
X	111,8	101,7	154,5	172,2	203,9	174,0	178,5	167,8	194,2	207,7	171,3	93,5	1931,0

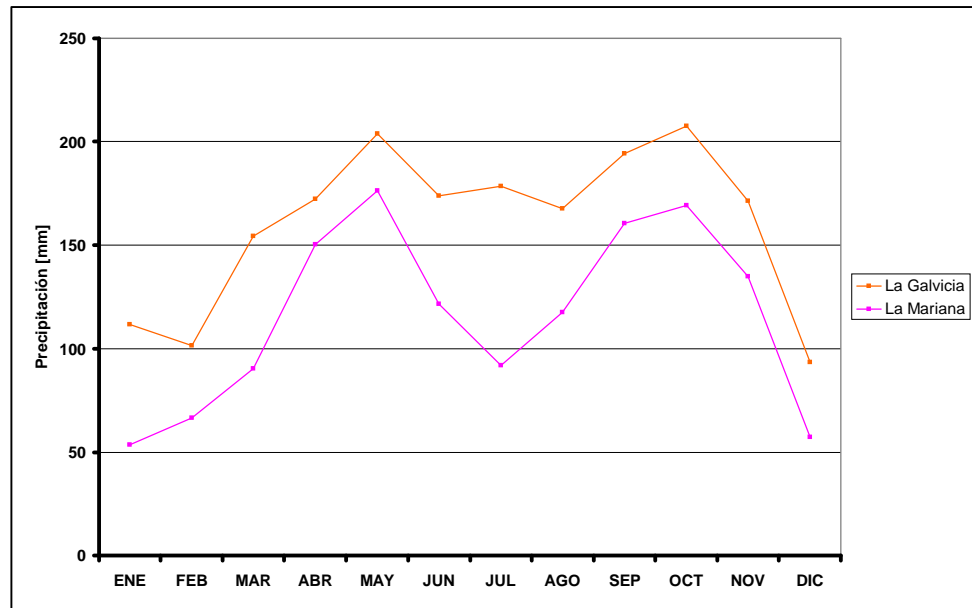
Fuente: C.D.M.B 2003



Ø **Tabla 9. Precipitación mensual Estación La Mariana [mm] - Código 2319074 (2.250 msnm).**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	4,9	41,8	62,9	157,2	87,2	54,6	58,3	77,7	85,8		79,4	40,3	750,1
1991	13,6	22,9	97,1	101,3	121,0	60,1	55,9	83,2	81,5		119,5	21,0	777,1
1992	46,6	20,0	29,5	108,0	189,3	104,3	71,7	56,7	55,5	42,4	106,5	117,5	948,0
1993	90,5	48,9	55,4	162,0	202,5	159,5	65,2	85,7	189,4	140,6	147,6	28,3	1375,6
1994	114,2	89,7	101,6	165,6	237,5	93,8	79,8	114,3	208,2	253,7	270,8	46,9	1776,1
1995	19,9	94,0	92,8	300,1	284,5	215,8	69,1	217,4	175,5	238,3	86,4	115,7	1909,5
1996	85,9	68,7	212,4	141,5	150,8	252,6	206,2	226,3	139,0	225,4	183,3	71,0	1963,1
1997	102,3		116,0		169,9		98,4		155,5		92,0		734,1
1998	32,7		82,0		239,1		105,9		229,9		102,9		792,5
1999	13,6	97,1	52,5	146,2	192,0	103,2	91,4	155,8	245,0	120,7	163,8	24,9	1406,2
2000	64,2	114,4	92,5	73,4	67,9	49,8	111,1	41,0	202,5	164,9	130,2	49,4	1161,3
TOT	588,4	597,5	994,7	1355,3	1941,7	1093,7	1013,0	1058,1	1767,8	1186,0	1482,4	515,0	
#	11	9	11	9	11	9	11	9	11	7	11	9	
X	53,5	66,4	90,4	150,6	176,5	121,5	92,1	117,6	160,7	169,4	134,8	57,2	1390,7

Fuente: C.D.M.B 2003



Ø **Fig.11. Precipitación Media Mensual Multianual. Río Frío Alto.**

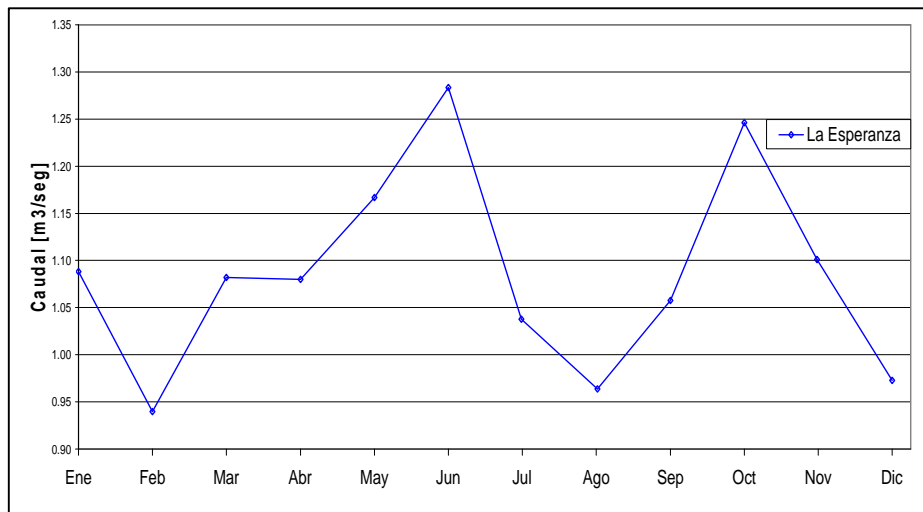


### 1.7 CAUDALES

Como se mencionó al inicio del presente capítulo, el punto de control de la zona de estudio es la estación limnimétrica La Esperanza, la cual es monitoreada por el IDEAM. Se calcularon los caudales medios mensuales multianuales de la estación con el fin de observar el régimen de los caudales, cabe anotar que los caudales mensuales de un año con respecto a otro dependen principalmente de la precipitación ocurrida, y que los datos calculados solo describen un valor esperado.

Ø **Tabla 10. Caudales mensuales, Estación La Esperanza [m<sup>3</sup>/seg].**

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1995	1.02	1.12	1.08	1.62	1.49	2.11	1.39	1.57	1.49	2.53	1.28	1.20	1.49
1996	1.25	1.14	2.24	1.68	1.52	2.23	1.53	1.32	1.47	1.87	1.70	1.33	1.61
1997	1.76	1.19	1.35		1.28	1.20	1.20	1.13	1.13	1.16	1.09	1.07	1.13
1998	1.23	1.04	0.94	0.93	1.43	1.21	0.96	0.87	0.86	0.99	0.95	1.29	1.06
1999	0.79	0.78	0.75	0.85	0.85	0.90	0.86	0.78	0.98	0.97	1.09	0.81	0.87
2000	1.02	0.95	0.90	0.74	0.97	0.73	0.76	0.67	1.00	0.83	1.04	0.73	0.86
2001	0.72	0.68	0.73	0.85	0.93	0.79	0.71	0.66	0.71	0.80	0.90	0.73	0.77
2002	0.91	0.61	0.67	0.93	0.86	1.10	0.89	0.71	0.83	0.83	0.76	0.63	0.81
X	1.09	0.94	1.08	1.09	1.17	1.28	1.04	0.96	1.06	1.25	1.10	0.97	1.07



Ø **Fig. 12 Caudal Medio Mensual Multianual.**



## CAPITULO 2

### MODELO HIDROLOGICO DISTRIBUIDO

La complejidad de los procesos hidrológicos en la naturaleza, ha llevado a plantear modelos que describan en forma aproximada dichos procesos. Este tipo de modelos pueden ser de base física, conceptual u orientada a los datos. Los primeros están basados en la representación de los procesos hidrológicos por medio de planteamientos físicos de tipo analítico o empírico, basados a su vez en el estudio de la hidráulica, la hidrología, la geología y otras ciencias. Los segundos por su parte, representan los procesos hidrológicos por medio de conceptos, los cuales se basan en las similitudes que pueden plantearse entre algunos procesos hidrológicos y el flujo en canales o conductos distribuidores, los terceros son mas de tipo estadístico utilizando ajustes o distribuciones y de acuerdo al comportamiento o tendencias de las variables a estudiar.

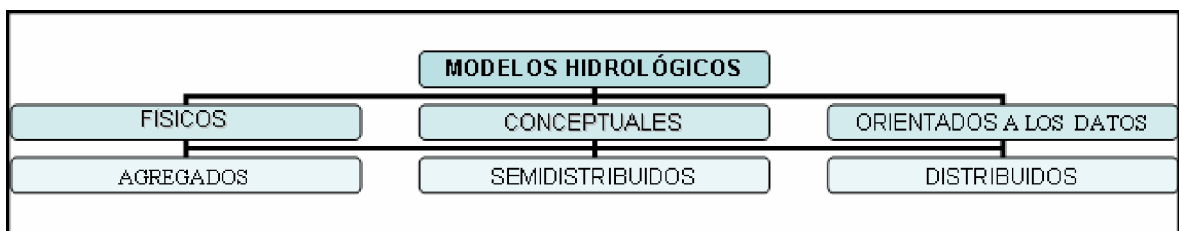
Los modelos de base física requieren de información completa y detallada de tipo topográfico, hidrológico, geológico, geomorfológico, entre otras, lo cual no es muy sencillo en nuestro medio, ya que existe gran cantidad de zonas que no son monitoreadas, o en algunas zonas que son monitoreadas esto no se hace adecuadamente y los datos resultan siendo errados o dudosos. Entre tanto, la información que requieren los modelos conceptuales suele ser menos difícil de conseguir, en muchos casos puede ser cualitativa, indirecta, o cuantitativa de precisión relativamente baja y se usa frecuentemente en estudios donde no se requiere mucha precisión en los resultados o que se desea dar un conocimiento global de la zona que se estudia para así tener noción de su comportamiento para estudios posteriores de mayor precisión.



A su vez, los modelos de base física, los modelos conceptuales y los modelos orientados a los datos se pueden caracterizar en modelos de tipo distribuido, semidistribuidos o de tipo agregado. La representación de tipo distribuida permite representar la variabilidad espacial de las características del suelo y subsuelo como elevaciones, cambios de pendientes, tipo de vegetación, tipo de suelo, geología, entre otras, y de las diferentes variables hidrológicas, como la precipitación, la evapotranspiración, la temperatura, humedad relativa, etc.

La representación de tipo semidistribuido también permite representar la variabilidad espacial de las características de la zona de estudio y además permite que algunas de las variables sean evaluadas como homogéneas a lo largo y ancho de la zona, este tipo de modelos es muy utilizado en nuestro medio ya que en ocasiones no se encuentra información completa y detallada siendo necesario llegar a una aproximación de las características no encontradas para poder evaluar el modelo sin llegar a ser errados en los resultados obtenidos.

La representación de tipo agregado por otra parte, toma la zona de estudio como un elemento con características hidrogeológicas homogéneas, donde se desprecia la variabilidad espacial de las componentes hidrológicas y las características del suelo y subsuelo de la zona.



Ø **Fig. 13. Esquema General Modelos Hidrológicos**



## 2.1 MODELOS DE PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

Hallar relaciones entre la precipitación y la escorrentía sobre el área de una cuenca, con el fin de calcular caudales en ríos y quebradas, es un problema fundamental para ingenieros e hidrólogos. En la mayoría de los países los registros de caudales no siempre están disponibles, siendo necesarios por ejemplo para el diseño de muchas obras civiles; esto ha obligado a desarrollar relaciones entre la precipitación y la escorrentía, por medio de las cuales se obtienen estimativos de caudales de diseño.

Los modelos precipitación – escorrentía son posiblemente los mas conocidos en el campo del modelamiento hidrológico ya que existe una gran cantidad de aplicaciones y formulas desarrolladas donde es posible simular los caudales y los niveles en los cauces ante distintos escenarios de precipitación, humedad antecedente o de intervención antrópica sobre la cuenca. Los caudales obtenidos y sus respectivos niveles se pueden utilizar para diversos fines: evaluación de riesgo, mapas de riesgo, formulación de estrategias y ejecución de planes para la mitigación de riesgo, diseño de obras de infraestructura, diseño de obras hidráulicas, evaluación del efecto de distintas actividades antrópicas en la cuenca, etc.

El presente estudio se fundamenta en representar los procesos hidrológicos de la cuenca y la interacción del agua en las distintas capas de suelo y subsuelo, por medio de un modelo precipitación–escorrentía conceptual distribuido. Este tipo de modelos utilizan la relación causal existente entre los eventos de lluvia y la producción de escorrentía, por medio de planteamientos matemáticos para obtener valores de caudal en un cauce a partir de información de precipitación en la zona.



## 2.2 MODELO SHIA (SIMULACIÓN HIDROLÓGICA ABIERTA)

El modelo hidrológico utilizado, denominado **SHIA** (Simulación Hidrológica Abierta) (Vélez, 2001), corresponde como esquema general a un modelo hidrológico conceptual distribuido que se apoya en la física de los procesos teniendo en cuenta las características morfológicas de la cuenca.

El modelo SHIA a diferencia de los métodos presentados en la literatura técnica, permite usar en la simulación diferentes esquemas conceptuales para modelar los procesos, según lo disponga el analista con base en sus criterios acerca de la cuenca y el propósito de la modelación. Por esta característica se le ha dado el nombre de simulación abierta.

Para su presentación, el modelo SHIA se ha dividido conceptualmente en dos submodelos, uno de producción de escorrentía y el otro de transferencia; el modelo considera que los procesos determinantes en la producción y transferencia de escorrentía en la totalidad de la columna de suelo (intercepción, detención, infiltración, evaporación y evapotranspiración, recarga del acuífero, escorrentía superficial y subsuperficial, retorno del flujo base y flujo en los cauces de la red de drenaje) se pueden representar por un sistema de cinco tanques o elementos de almacenamiento conectados entre sí, ubicados jerárquicamente en forma vertical (Figura 14), cuatro de ellos son elementos del submodelo de producción de escorrentía y el quinto tanque constituye el elemento del submodelo de transferencia.

Cada columna de tanques se ubica en una celda cuadrada en las que se divide la cuenca, donde cada una de las celdas representa una unidad de respuesta hidrológica (**HRU**), (Vélez, 2001), y cada una posee un conducto distribuidor el cual mediante ecuaciones elementales de transferencia de flujo descritas con



detenimiento en el presente capítulo define la cantidad de agua y la dirección de esta (vertical o hacia otro tanque), representando los procesos de producción de escorrentía por el flujo y almacenamiento de esta en los tanques en dirección de la pendiente o si es el caso a los cauces de la red de drenaje superficial.

Los aportes de las celdas se van trasladando por esta red de drenaje virtual en cada intervalo de tiempo de acuerdo con un modelo hidráulico simplificado basado en la ecuación de la onda cinemática y parametrizado con las características geomorfológicas de los cauces en la región.

Según la teoría de movimiento de ondas, en la onda cinemática los términos de aceleración y presión en la ecuación de momentum son despreciables, luego el movimiento de la onda se describe principalmente por la ecuación de continuidad, la línea de energía total es paralela al fondo del canal y el flujo es uniforme y permanente ( $S_o=S_f$ ) dentro de la longitud de un elemento diferencial.

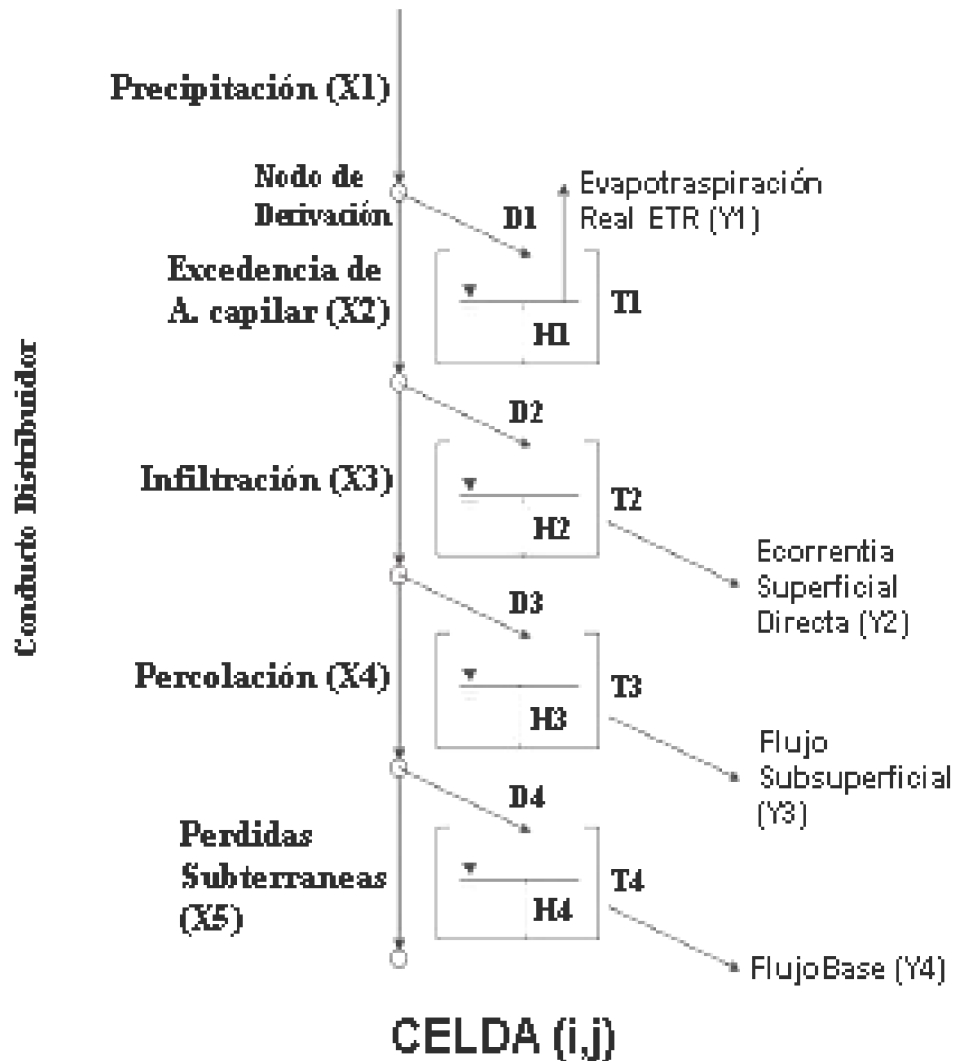
En el modelo los parámetros de los canales se obtienen a partir de las características geomorfológicas de los cauces de la región. Además considera que la incorporación de sedimentos, la rugosidad y la resistencia al flujo en el cauce dependen de la magnitud del flujo.

En base a los tres últimos párrafos, el modelo hidrológico maneja el modelo de la Onda Cinemática Geomorfológica (OCG) desarrollada y descrita por (Vélez, 2001), expresión en la que se tiene en cuenta que la forma del cauce depende del ambiente geomorfológico y climático, del trabajo que el flujo ha hecho sobre él y del nivel del flujo, y que, por lo tanto, se puede obtener una expresión de validez regional para la forma del cauce en función del área de la cuenca y del caudal de acuerdo a las expresiones presentadas como de la “Geometría Hidráulica Generalizada”, (Vélez, 2001), lo cual fue un aporte de esa tesis doctoral y no tenida



en cuenta antes por ningún otro modelo, los que utilizan canales prismáticos en la red de drenaje.

La representación de los tanques y su significado se hace de acuerdo a su ubicación de la siguiente manera:



Ø Fig. 14. Esquema de conexión de los elementos de la celda.

→ Primer tanque (T1): Representa el almacenamiento estático o capilar, es decir, el agua que se almacena en la capa superior del suelo por capacidad de campo y la que se almacena en la cobertura vegetal por efecto de interceptación, tiene influencia hasta la zona de raíces. De este elemento sólo es posible la salida del agua mediante la evapotranspiración.

→ Segundo tanque (T2): Representa el agua que luego de la lluvia no se infiltra y se aloja en la superficie mientras fluye sobre la ladera como escorrentía superficial a través de los surcos de la microtopografía de la zona hasta su ingreso a un cauce en la red de drenaje con el punto de control como destino final. De este elemento se deriva la componente de la escorrentía superficial directa sobre la ladera.

→ Tercer tanque (T3): Representa el agua gravitacional infiltrada que se almacena en la zona saturada de la capa superior del suelo mientras fluye como flujo subsuperficial.

→ Cuarto tanque (T4): Representa el agua gravitacional almacenada en la parte inferior del suelo que produce el flujo base, el agua que alcanza este tanque es estimada como el valor de la recarga para cada uno de los intervalos de tiempo simulados.

→ Quinto tanque (T5): Representa el almacenamiento de agua mientras fluye por un canal equivalente o representativo de los elementos de la red de drenaje en la celda.

Teniendo en cuenta el tipo de cobertura y las condiciones iniciales de humedad del suelo, el agua de precipitación puede pasar a incrementar la humedad del suelo o puede ser excedente para hacer parte de la escorrentía directa, fluir a



través del suelo en forma de flujo subsuperficial o percolar a los almacenamientos subterráneos de donde una fracción de ella puede hacer parte del flujo base.

Para interconectar los diferentes tanques, el modelo se vale de un conducto distribuidor al cual entra el agua de precipitación y se conduce por el conducto distribuidor que va saliendo hacia los tanques a través de los nodos de derivación; el primero es el encargado de representar las propiedades hidráulicas del suelo (conductividad, permeabilidad), regulando el flujo entre los tanques. Por su parte los nodos de derivación se ubican en la entrada de cada tanque y es allí donde se realiza el balance de agua, una parte de esta continua por el conducto distribuidor y sigue descendiendo, la otra ingresa al tanque y quedará allí almacenada.

Al empezar la simulación según sean las condiciones iniciales, una parte de la precipitación ingresa al primer tanque, en donde dependiendo del nivel de almacenamiento en el tanque, la capacidad de almacenamiento en este y de la evapotranspiración potencial, sale una parte del agua almacenada en forma de evapotranspiración real.

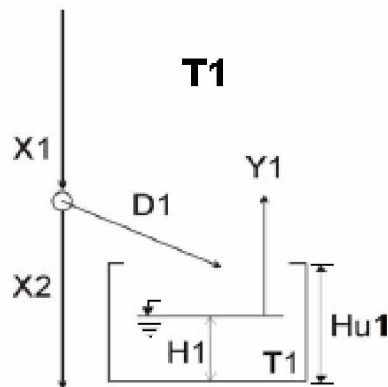
La parte de la precipitación que no entra al primer tanque sigue viajando por el conducto distribuidor hasta llegar al segundo nodo de derivación, donde dependiendo nuevamente de las condiciones iniciales de humedad y de las características del conducto distribuidor basado en las características hidrogeológicas de la cuenca, una parte del agua queda almacenada en el segundo tanque. De igual forma ocurre en el nodo de derivación tres y cuatro, aunque para el nodo cuatro no se evalúan las condiciones del conducto distribuidor ya que en el caso del presente estudio toda el agua que llega al nodo queda almacenada en el tanque que representa al acuífero y las pérdidas subterráneas se desprecian.



Para cada intervalo de tiempo el modelo va actualizando los niveles de almacenamiento en cada tanque y estimando según sea el tiempo de residencia en cada nivel la contribución a la escorrentía. Dependiendo del nivel en el que se encuentre la celda, el aporte de escorrentía lo puede hacer a otra celda aguas abajo o directamente a la red de drenaje. De esta forma actualiza la información de cada celda hasta llegar al punto de salida de la cuenca para luego iniciar el siguiente intervalo.

### 2.2.1 Almacenamiento capilar o capacidad de campo, interceptación de la cobertura vegetal y evapotranspiración. (Tanque 1).

Parámetros a definir presentes en T1:



Ø Fig. 15. Esquema de los parámetros del Tanque 1.

$X1_t$  : cantidad de lluvia en el intervalo  $\Delta t$  (mm).

$X2_t$  : cantidad de agua excedente del almacenamiento capilar (mm).

$D1_t$  : cantidad de agua que se deriva hacia T1 durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H1_t$  : cantidad de agua en T1 al final del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H1_{t-\Delta t}$  : cantidad de agua T1 al inicio del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).



Hu1 : capacidad máxima de almacenamiento en el tanque T1 (mm).

Y1<sub>t</sub> : evapotranspiración real del intervalo de tiempo (mm).

La cantidad de agua **X1** depende de la precipitación de las estaciones que se toman como referencia en el estudio, dando como resultado un valor de precipitación en el tiempo correspondiente al intervalo  $\Delta t$  por cada celda, es decir, distribuido en el espacio de acuerdo método del inverso de la distancia.

La cantidad de agua **D1** que en un intervalo de tiempo dado, pasa del primer nodo de derivación al almacenamiento capilar o **T1**, depende de las condiciones de almacenamiento del tanque (nivel de almacenamiento **H1** y capacidad máxima **Hu1**), las cuales representan los niveles de humedad del suelo y sus características, que además se encuentran relacionadas también con la facilidad con que el conducto distribuidor permita al paso del agua. Por último esta no puede ser mayor que de la cantidad de agua disponible en el nodo de derivación en el intervalo de tiempo dado.

La capacidad máxima **Hu1** representa la suma de dos factores que regulan la cantidad de agua que un momento dado se puede infiltrar en el suelo, por un lado se encuentra la capacidad de almacenamiento capilar del suelo, que no es otra cosa que el contenido de humedad que puede almacenar el suelo para pasar desde su punto de marchitez hasta alcanzar la capacidad de campo. El segundo factor se refiere a la capacidad que tiene la cobertura vegetal para almacenar agua, por interceptación y por succión radicular.

La cantidad de agua que se deriva D1 y entra al almacenamiento estático, corresponde (de una forma muy elemental) al mínimo entre el agua existente en el conducto distribuidor, el que se requiere para llenar el tanque de almacenamiento capilar, y el máximo que puede ingresar al suelo durante un intervalo de tiempo. Así, a menos que se llene el almacenamiento capilar, no se deja pasar nada a la



escorrentía. En la realidad puede haber escorrentía sin que necesariamente se haya llenado el almacenamiento capilar en el suelo. Entonces se utiliza un coeficiente  $\Phi$  para lograr que la cantidad de agua que se deje pasar corresponda a una fracción de la lluvia, que está relacionada con el estado del almacenamiento capilar tal que, cuando este almacenamiento esté muy lleno deje pasar mucho, y cuando está muy vacío deje pasar poco. En este caso  $D1$  corresponde a:

$$D1_t = \text{Min}\left\{\phi \times X1_t, Hu1 - H1_{t-\Delta t}\right\} \quad \phi = 1 - \left\{\frac{Hu1}{H1_{t-\Delta t}}\right\}$$

Este esquema ha sido utilizado por varios modelos conceptuales agregados. Es el caso del modelo HBV (Bergström, 1995) en el que  $a$  puede tomar valores entre 1 y 3 y es un parámetro que define el analista. Otro caso es el de los modelos GR-3J y GR-3H (Arnaud y Lavabre, 1996) en los que  $a$  es igual a 2.

La cantidad de agua  $Y1$  representa la evapotranspiración real (ETR) y se toma en función del agua disponible en el tanque  $H1$ , de la capacidad máxima de almacenamiento  $Hu1$  y de la evapotranspiración potencial (ETP). Así, cuando hay déficit de agua en el suelo la evapotranspiración real (ETR) es menor que la evapotranspiración potencial (ETP). Varios autores han utilizado una expresión en la que se obtiene un estimado de la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración potencial y de la relación entre la humedad del suelo y la capacidad de campo. En el modelo, la relación entre la humedad del suelo y la capacidad de campo equivale a la relación entre el agua que se encuentra en el almacenamiento estático y la capacidad máxima para ese almacenamiento, así:

$$Y1_t = ETP \left\{ \frac{H1_t}{Hu1} \right\}^b$$



En los modelos GR-2 y GR-3 del CEMAGREF (Michel, 1989) se utiliza una expresión muy similar a la anterior y el parámetro  $b$  tiene un valor de 0.5. Igualmente el modelo HBV (Bergström, 1995) utiliza una expresión equivalente cuando  $b = 1$ . Singh y Dickinson (1975) obtienen buenos resultados con  $b$  igual a 0.7.

Además, en el modelo se tiene en cuenta que el valor de la evapotranspiración real no puede ser mayor que el agua disponible para evaporación en este almacenamiento estático ya que no es razonable y el tanque quedaría debiéndole agua al balance, luego el modelo toma una relación entre la menor de dos razones, una de almacenamiento existente y la otra del valor de evapotranspiración en el intervalo de tiempo de la siguiente forma:

$$Y_{1_t} = \text{Min} \left\{ ETP \left\{ \frac{H_{1_t}}{H_{u1}} \right\}^b, H_{1_t} \right\}$$

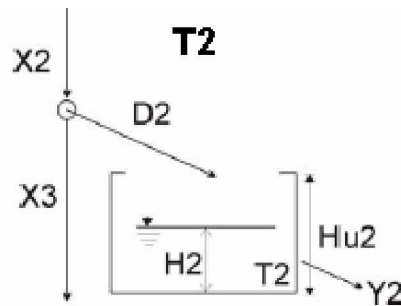
De acuerdo con lo propuesto en el modelo, el agua que no ingresa al almacenamiento estático T1, sigue su camino por la zona capilar del suelo hacia abajo.

$$X_{2_t} = X_{1_t} - D_{1_t}$$

### 2.2.2 Almacenamiento superficial, zona de encharcamiento y escorrentía superficial. (Tanque 2).

Para la representación del tanque T2 (Figura 16) se consideran los siguientes parámetros:





Ø Fig. 16. Esquema de los parámetros del Tanque 2.

$X2_t$  : cantidad de agua excedente del almacenamiento capilar (mm).

$X3_t$  : cantidad de agua excedente del almacenamiento superficial (mm).

$D2_t$  : cantidad de agua que se deriva hacia T2 en el intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H2_t$  : cantidad de agua en T2 al final del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H2_{t-\Delta t}$  : cantidad de agua en T2 al inicio del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$Hu2$  : capacidad máxima de almacenamiento en T2(mm).

$Y2_t$  : cantidad de agua que sale por escorrentía superficial (mm).

La capacidad para dejar pasar agua gravitacional se puede asociar a la conductividad hidráulica en la capa superior del suelo en condiciones de saturación. En este caso nos referimos a una conductividad en la que se tiene en cuenta tanto la macroporosidad como la microporosidad.

Se supone que la capa superior del suelo a la escala de la celda tiene una conductividad hidráulica  $K_s$  (mm/día) representativa o característica y que se asocia al tipo de suelo y a su estructura, lo cual está relacionado con la posición de la celda en la ladera, la cobertura vegetal y el uso y manejo del suelo. Por lo tanto, la cantidad de agua que entra al almacenamiento T2, está relacionada con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior  $K_s$  en el intervalo de tiempo y con el flujo excedente del almacenamiento capilar  $X2$  según la siguiente relación:



$$X3_t = \text{Min}\{X2_t, Ks\Delta t\}$$

$$D2_t = X2_t - X3_t$$

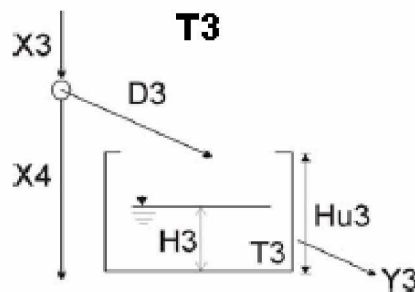
Para el flujo superficial en la cuenca, suponiendo velocidad constante y aplicando la ecuación de continuidad, la escorrentía directa se puede representar mediante un embalse lineal, en donde el coeficiente de descarga  $\alpha$  es función del tiempo de residencia del agua en el interior del suelo.

$$Y2_t = \alpha * H2_t$$

$$\alpha = \frac{1}{\text{tiempoderesidencia}}$$

### 2.2.3 Almacenamiento y escorrentía subsuperficial.(Tanque 3).

El modelo considera que el almacenamiento gravitacional en el suelo se puede dividir en dos partes: una capa superior donde por lo general se tiene una mayor permeabilidad y una capa inferior donde se tienen permeabilidades más bajas y la respuesta es más lenta. En la capa superior representada por T3 es donde se da la respuesta rápida y se produce la escorrentía subsuperficial.



Ø Fig. 17. Esquema de los parámetros del Tanque 3.



$X_{3t}$  : cantidad de agua excedente del almacenamiento superficial e ingresa al suelo como agua gravitacional (mm).

$X_{4t}$  : cantidad de agua que puede percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo (mm).

$D_{3t}$  : cantidad de agua que se deriva hacia T3 en el intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H_{3t}$  : cantidad de agua en T3 al final del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H_{3t-\Delta t}$  : cantidad de agua en T3 al inicio del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H_{u3}$  : capacidad máxima de almacenamiento en T3 (mm).

$Y_{3t}$  : cantidad de agua que sale por escorrentía subsuperficial (mm).

De acuerdo el modelo, durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , se tiene una cantidad de agua gravitacional  $X_3$  que se mueve verticalmente hacia el interior del suelo. De esta cantidad, una parte  $X_4$  podrá percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, mientras que el resto del agua se deriva al almacenamiento superior del suelo donde se convertirá en flujo subsuperficial.

Se supone que la capa inferior del suelo análogamente a la capa superior de suelo tiene una capacidad de percolación  $k_p$  (mm/día) representativa que se asocia al tipo de subsuelo y su estructura, la cual está estrechamente relacionado con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. En algunos casos la capacidad de percolación y su variabilidad espacial se pueden inferir por características del relieve, algunos rasgos morfológicos, el desarrollo de la vegetación, el uso y manejo del suelo y la producción de flujo base aguas abajo. Al igual que lo supuesto para la capa superior, esta capacidad de percolación incluye tanto la porosidad primaria como la secundaria.

$$X_{4t} = \text{Min} \{X_{3t}, K_p \Delta t\}$$

$$D_{3t} = X_{3t} - X_{4t}$$

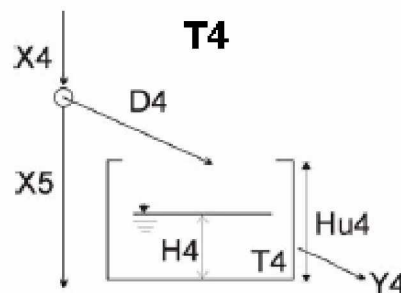


Para la producción de escorrentía subsuperficial en la ladera se hace una formulación análoga a la presentada en el almacenamiento T2 para obtener la siguiente relación lineal:

$$Y_{3t} = \alpha * H_{3t} \qquad \alpha = \frac{1}{\text{tiempoderesidencia}}$$

#### 2.2.4 Almacenamiento y escorrentía subterránea. (Tanque 4).

Éste último almacenamiento T4 representa el agua gravitacional mientras fluye por la capa inferior del suelo ó por el acuífero, hasta alcanzar la red de drenaje y convertirse en flujo base. Los parámetros que se utilizan para representar el tanque 4 son las siguientes:



Ø Fig. 18. Esquema de los parámetros del Tanque 4.

$X_{4t}$  : cantidad de agua considerada como recarga de las reservas subterráneas, que proviene del excedente del almacenamiento Subsuperficial (mm).

$X_{5t}$  : cantidad de agua que entra a formar parte de las pérdidas subterráneas (mm).

$D_{4t}$  : cantidad de agua que se deriva hacia T4 durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).



$H_{4t}$  : cantidad de agua en T4 al final del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H_{4t-\Delta t}$  : cantidad de agua T4 al inicio del intervalo de tiempo  $\Delta t$  (mm).

$H_{u4}$  : capacidad máxima de almacenamiento en el tanque T4 (mm).

$Y_{4t}$  : cantidad de agua que sale como flujo base (mm).

La cantidad de agua que se deriva del conducto distribuidor para el flujo subterráneo depende de la cantidad de agua que ha percolado y de la cantidad que pasa a las pérdidas, así:

$$D_{4t} = X_{4t} - X_{5t}$$

En la mayoría de las cuencas naturales, las pérdidas por percolación profunda ( $X_5$ ) son una parte muy pequeña del agua que circula a través de la cuenca y, por lo tanto, se pueden asumir como nulas, es decir, la totalidad de agua que proviene del tanque 3 ( $X_4$ ) representa el valor de la recarga (mm/día) estimada para cada uno de los intervalos de tiempo analizados. Estos resultados diarios de recarga son manipulados para calcular la recarga media anual y compararla con el valor de la precipitación media anual, observando así el porcentaje de la precipitación de la zona que se convierte en recarga de las reservas subterráneas.

También algunas veces se tienen condiciones geológicas y/o antrópicas en la cuenca, en las que la magnitud de volúmenes de flujo que llegan o salen de esta es importante y, por lo tanto, para esos casos se debe tener en cuenta en el modelamiento un valor estimativo ya sea de aporte (positivo) o de salida (negativo) en la cuenca.

Para la representación del flujo a través del almacenamiento subterráneo, se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada:



$$Y_{4t} = \alpha * H_{4t} \qquad \alpha = \frac{1}{\text{tiempoderesidencia}}$$

La importancia de la representación del flujo subterráneo está en reproducir adecuadamente las recesiones del flujo en los cauces y que esto sea coherente con el volumen de agua que ha ingresado al almacenamiento subterráneo.

Finalmente el caudal en la celda para cada intervalo de tiempo ( $Q_{ct}$ ) es la suma del flujo producido en cada tanque.

$$Q_{ct} = (Y_{2t} + Y_{3t} + Y_{4t})$$

Y el caudal total a la salida de la cuenca para cada intervalo de tiempo ( $QT_t$ ) es la suma del caudal producido en cada una de las celdas ( $n$ ).

$$QT_t = \sum_{i=1}^n Q_{c_i}$$



## CAPITULO 3

### ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO SHIA EN LA SUBCUENCA

En el presente capítulo se explica la forma como se procesó la información tanto física como Hidrológica de la Subcuenca que alimentó el modelo SHIA. La información física data de la topografía y de los aspectos generales enunciados en el primer capítulo. La información Hidrológica esta conformada por los datos de evapotranspiración y precipitación. A partir de la información existente sobre los Aspectos generales de la subcuenca se generó otra información que esta estrechamente relacionada con el ciclo Hidrológico y más precisamente con la generación de escorrentía, como es el almacenamiento capilar y la conductividad hidráulica en la capa superior e inferior del suelo.

#### 3.1 DATOS DE ENTRADA.

Como se señaló en el capítulo dos, la presente investigación se fundamenta en un modelo hidrológico distribuido de precipitación-escorrentía denominado SHIA. Una de las variables importantes que requiere el modelo es la topografía de la subcuenca, de donde se derivan características muy importantes como las direcciones de flujo, red de drenaje y pendientes máximas; estos resultados representan la dirección, el movimiento, y rapidez del agua en el área de estudio. Esta representación se realiza mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE) en formato Raster y se obtienen las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

Como se había mencionado también en el capítulo anterior, cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU) (Vélez. 2001) esta representada por una Celda



cuadrada o Píxel, en este caso de dimensiones de treinta metros (30.0 m) de lado, donde se idealizan los diferentes procesos hidrológicos (intercepción, detención, Infiltración, evaporación y evapotranspiración, recarga de acuíferos y escorrentía superficial y subsuperficial, retorno del flujo base y flujo en los cauces de la red de drenaje) por medio del sistema de tanques. Cada celda en las laderas representa un sistema de cuatro tanques interconectados entre si y cuya conexión presenta características hidráulicas particulares que simulan la conductividad hidráulica desde la superficie del suelo hasta su interior. Estas características se refieren a la Capacidad Máxima de Almacenamiento Capilar del Suelo ( $Hu_1$ ), la Conductividad Hidráulica de la Capa Superior del Suelo ( $K_s$ ) y de la capa inferior ( $K_p$ ), parámetros que se estiman a partir de la información adquirida, generando para cada una de las variables anteriormente mencionadas un Modelo Digital de Terreno (MDT), con el mismo formato del MDE (Raster). El procedimiento para la consecución de cada MDT, se explicará en forma detallada en la sección 3.2.

Para finalizar, en la estructuración del modelo es necesario introducir la variación climatológica para el periodo de modelamiento; representada con valores de precipitación por cada intervalo de tiempo de simulación, la cual se debe encontrar bien distribuida en la zona de estudio y además con un único valor de evapotranspiración potencial (ETP), característico de la zona, calculando finalmente la evapotranspiración Real distribuida espacialmente como lo muestran las ecuaciones planteadas en el modelo (Cáp. 2), de acuerdo con la humedad presente y la máxima capacidad de almacenamiento del suelo en cada uno de los píxeles analizados, repitiéndose iterativamente este procedimiento para cada tiempo  $\Delta t$  que se simula.

Una vez teniendo toda la información disponible, se emplea el programa SIMDIS3 el cual fue desarrollado por *la Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de*



*Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.*, donde se encuentra programadas las diferentes opciones del modelo. Toda la información tanto de características hidráulicas del suelo (MDT's) como de información derivada del MDE son introducidas al programa mediante archivos independientes generados para cada característica o parámetro anteriormente mencionados y que son reconocidos automáticamente en la ejecución del programa. Todos estos archivos se describen en los Anexos de este Documento.

Ahora bien, con la información cargada al programa SIMDIS3 se procede a ejecutarlo, y se comparan los datos de caudal estimados con los observados en la estación de aforo, procediendo iterativamente a correr el programa cambiando las condiciones iniciales hasta conseguir una buena aproximación de los caudales estimados en relación a los observados, y calculando así lo que es de interés en la investigación, la Recarga Mensual, lo cual se explica con detalle en el cuarto capítulo.

A continuación se describe en forma como se procesó la información con que se alimentó el modelo; de igual forma se explica las diferentes consideraciones que se tuvieron en cuenta para representar de la mejor manera las condiciones reales de la Subcuenca.

### **3.1.1 Modelo digital de elevación Río Frío Alto y su procesamiento.**

Para la obtención de modelo digital de elevación, se partió de una base topográfica 1:10.000 que se encontraba en formato digital de Autocad, producto de procesos de digitalización manual en tableros, de planchas preliminares del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Se optó por esta escala ya que el área de estudio es reducida lo que obliga a tener una mejor resolución y ésta a su vez es la razón fundamental por la que se escogieron celdas de 30m x 30m. En estudios anteriores de las mismas características que el presente, por ejemplo Isaza



(2004), se trabajó con celdas de 50.0 m de lado en una base topográfica 1:25000 en un área de estudio de 581.92 Km<sup>2</sup> obteniendo una buena representación de la cuenca y un volumen manejable de datos.

La elaboración del MDE inicia con la revisión de la base topográfica que se utilizó para el presente estudio, corrigiendo algunos errores que se producen en la digitalización. Posteriormente con el archivo topográfico en formato con extensión (.DXF) y con el programa Dxf2xyz se crea el archivo con extensión (.XYZ). Este archivo contiene la información en coordenadas cartesianas con la respectiva elevación de todos los puntos que conforman las curvas de nivel, y el cual es reconocible por el software Surfer 8, que es donde se realiza la interpolación y elaboración del Modelo Digital de Elevación (MDE) (Raster). El número total de puntos procesados contenidos en el archivo DXF, fueron 104266 en coordenadas xyz.

Surfer 8 ofrece múltiples métodos de interpolación, basados en modelos matemáticos y estadísticos; a continuación se muestra la escogencia del método de interpolación que generó el mejor MDE que representa mejor la topografía del área de estudio.

### **3.1.1.1 Métodos de interpolación Analizados**

Como se había mencionado, el Software Surfer 8 proporciona múltiples métodos de interpolación entre los que se encuentran el Inverso a la Distancia Elevado a una Potencia, Kriging, Mínima curvatura, Shepard Modificado, Vecino Natural, el Vecino más Cercano, Regresión Polinomial, Función Base Radial entre otros. De estos métodos, Kriging es un método Geoestadístico que se vera en detalle a continuación y los restantes son métodos que ajustan la variación de los puntos observados a modelos matemáticos preestablecidos.



En la elaboración del MDE se utilizaron varios métodos de interpolación, de los cuales se debe optar por uno de ellos para el modelamiento, siendo necesario evaluar la correlación de cada MDE creado por medio de un error. Una medida del error en la correlación sería el error medio, que relaciona los puntos iniciales tomados como reales con los puntos interpolados. Sin embargo, como las desviaciones pueden ser aleatoriamente positivas o negativas se anularían, por lo tanto el EM no es una medida válida de la calidad del MDE.

Lo más habitual es utilizar el error medio cuadrático, EMC, ya que tiene en cuenta todas las desviaciones como una sumatoria de valores del mismo signo, se calcula de la siguiente forma:

$$EMC = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_{Z_i}^2}$$

Al final el MDE que se elige para modelar es el de menor error medio cuadrático ya que ese es el que posee el mejor ajuste y representa mejor la topografía de la zona de estudio

Los métodos que presentaron mejores ajustes fueron Kriging y Función Base Radial y por consiguiente se mostrarán los modelos matemáticos en que están fundamentados, con los respectivos EMC evaluados para una muestra aleatoria de 50000 puntos. Los demás métodos presentaron resultados a simple vista, erróneos, y por ende no se tuvieron en cuenta para su descripción.



### Ü Kriging.

Este método realiza una estimación del valor en el punto problema mediante una media ponderada en función de la distancia.

$$\hat{z}_{x,y} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot z_i$$

Donde se usa un conjunto de k datos situados en el entorno del punto problema y  $\lambda_i$  representa los pesos asignados a cada uno de ellos (Felicísimo 1999). Matemáticamente se obtienen excelentes resultados, si se cumplen algunas propiedades que minimizan el error, es decir cuando es insesgado y la suma de los cuadrados de las desviaciones es mínima. Esta es la fundamentación matemática del método.

La formulación básica del Kriging asume que la variación espacial de la variable a representar puede ser expresada como la suma de tres componentes. El primero es un componente que puede tener un valor medio constante o asociarse a una superficie de tendencia y que, en el caso lineal, podría ser modelado mediante una expresión como

$$\hat{z}_{x,y} = a_{00} + a_{10} \cdot X + a_{01} \cdot Y$$

Siendo el segundo termino la componente que representa las desviaciones o residuos y son considerados como una variable cuya distribución puede ser explicada en términos de correlación espacial. El tercero representa un error no aleatorio no correlacionado. El método hace énfasis en el tratamiento de la segunda componente mediante el análisis de correlación espacial entre los datos, asumiendo que su valor es dependiente de la distancia entre los mismos



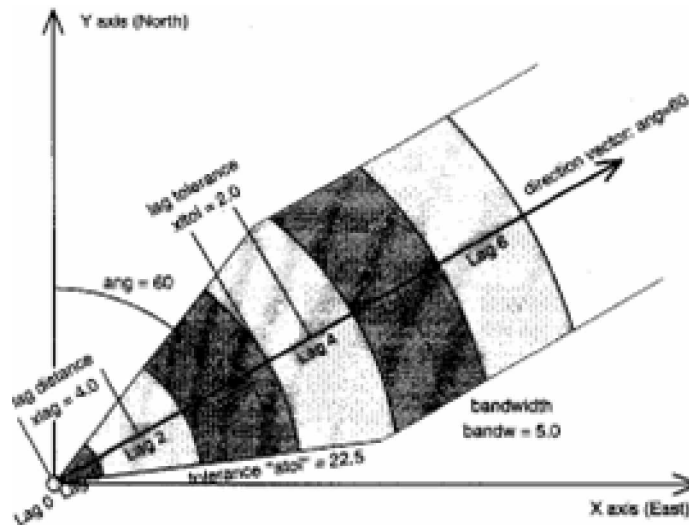
(Felicísimo). El Kriging estima esta dependencia en función de la distancia mediante la medida de la covarianza entre los datos separados por distancias diferentes. Para ello utiliza la semivarianza de las diferencias cuyo valor se calcula mediante la expresión:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2 \cdot n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{p_i} - z_{p_i+h})^2$$

Donde  $n_h$  es el número de pares de valores separados por una distancia  $h$ .

$z_p$  el valor de la variable en un punto  $p$  y  $z_{p+h}$ , el valor en un punto situado a una distancia  $h$  del anterior.

Con la anterior expresión se construye el variograma experimental, y si es el caso en dos direcciones donde haya sospechas de anisotropía, se puede elaborar en diferentes orientaciones.



Ø Fig. 19. Esquema de muestreo para construcción de variograma experimental en el espacio para una variable que presenta anisotropía. (Vanderlinden, 2003).

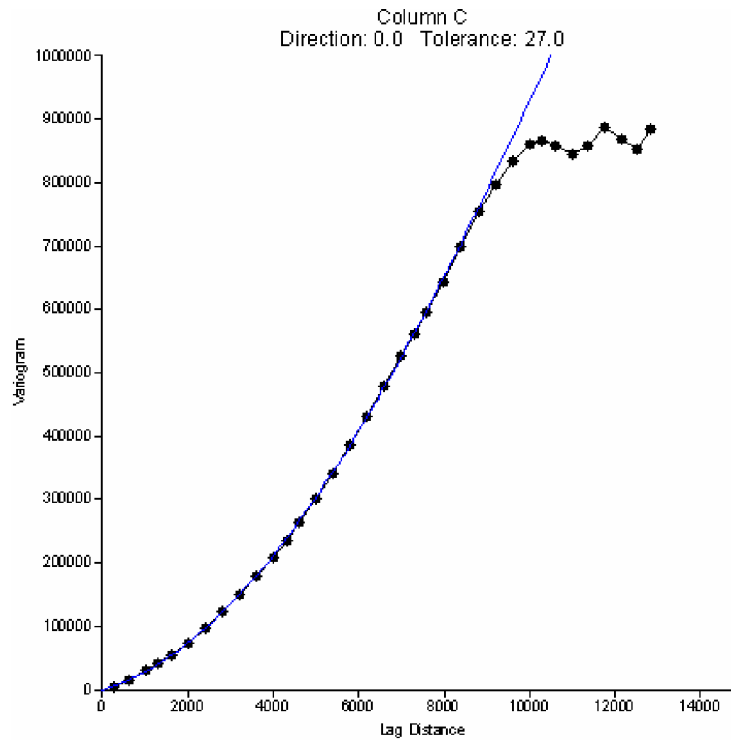
La figura 19 muestra la forma como se elabora un Semivariograma Experimental para la optimización de la interpolación en la aplicación del método geoestadístico Kriging. Una vez determinado el semivariograma, se procede a ajustarlo de acuerdo a funciones preestablecidas por el Software Surfer 8, las que se pueden combinar para obtener un mejor ajuste; la tabla que se muestra a continuación presenta los mejores resultados de EMC con sus respectivas combinaciones de ajustes. Cabe anotar que al mencionar semivariograma  $2\gamma$  se debe tener en cuenta que es dos veces el variograma  $\gamma$  ya que se deduce de la misma forma.

Ø **Tabla 11. Ajustes de variogramas según Surfer 8 y valores de EMC.**

Variograma	Componentes	Anisotropy		EMC
		Ratio	Angle	
1	Wave (Hole Effect)	1	0	4.126
	Linear	1	0	
2	Wave (Hole Effect)	1	0	4.258
	Linear	1	0	
	Gaussian	1	0	
3	Wave (Hole Effect)	1	0	4.082
	Exponential	1	0	

Como se menciona anteriormente, los análisis de EMC se evaluaron para 50.000 puntos escogidos aleatoriamente. En la figura 20 se observa la forma grafica de cómo se representa un variograma.





Ø **Fig. 20 Representación grafica de variograma experimental.**

Ü **Función Base Radial.**

El método de interpolación de la Función Base Radial contiene un grupo diverso de métodos de interpolación de datos. El método Multicuadrático es considerado por muchos como el mejor en términos de capacidad de ajuste de datos y producir superficies suaves, aunque todos los métodos son buenos y muy exactos.

La Función Base Radial trabaja análogamente al variograma en Kriging, pero la Base Radial define el conjunto de pesos a aplicar a los puntos de datos cuando interpola un punto de la malla. Los diferentes métodos aplicados por la Función Base Radial en Surfer 8 son los siguientes (Surfer Help Tutorial):



Inverso Multicuadrático:	$B(h) = \frac{1}{\sqrt{h^2 + R^2}}$
Multilog:	$B(h) = \log(h^2 + R^2)$
Multicuadrática:	$B(h) = \sqrt{h^2 + R^2}$
Natural Cubic Spline:	$B(h) = (h^2 + R^2)^{3/2}$
Thin Plate Spline:	$B(h) = (h^2 + R^2) \log(h^2 + R^2)$

Donde:

h: Es la distancia relativa entre el punto de análisis y el nodo a interpolar

R<sup>2</sup>: Es el factor suavizador especificado por el usuario.

El valor por defecto para R<sup>2</sup> es calculado de la siguiente forma:

(Longitud de la diagonal del alcance de los datos)\*2/(25\*numero de puntos)

De acuerdo con la Función Base Radial preestablecida por Surfer 8, se obtuvieron los EMC para cada uno de los modelos que plantea dicha función explicados anteriormente, los errores y su respectiva función se aprecian en la Tabla 12.

∅ **Tabla 12. Modelos de la función base radial y valores de EMC.**

Método	Función Básica	Anisotropy		R <sup>2</sup>	EMC
		Ratio	Angle		
Función Base Radial	Multicuadratic	1	0	140	3.68
	Inv. multicuadratic	1	0	140	8.50
	Multilogaritmic	1	0	140	4.45
	Natural Cubic Spline	1	0	140	4.58
	Thin Plate Spline	1	0	140	3.60

Los valores de EMC mostrados en la tabla anterior fueron calculados con una muestra de 50.000 puntos que fueron seleccionados aleatoriamente.



### 3.1.1.2 Selección y procesamiento del MDE

Para la selección del MDE se tuvieron en cuenta dos parámetros muy importantes; el primero es del que se ha venido haciendo alusión, el Error Medio Cuadrático (EMC), el cual define la desviación media de los valores de la variable entre los puntos observados y los calculados. Observando los valores de EMC calculados y descritos con anterioridad para cada uno de los modelos, se hizo la preselección de los que presentaron menor EMC con el fin de proseguir con el análisis del segundo parámetro. El segundo parámetro para la selección del MDE es el análisis de sumideros (Pits), ya que son uno de los problemas en la asignación de direcciones de flujo. Un sumidero consiste en una celda o grupo de celdas con una cota determinada en el MDE, que están rodeadas por celdas de cota mayor (Modelo D8). Es claro que en estos casos no se tiene ninguna dirección de pendiente hacia abajo en ninguna de las celdas y por lo tanto la asignación de una dirección de drenaje no puede hacerse directamente.

La siguiente tabla describe los resultados de los parámetros anteriormente mencionados para cada uno de los modelos preseleccionados.

∅ **Tabla 13. Comparación de los modelos de interpolación preseleccionados.**

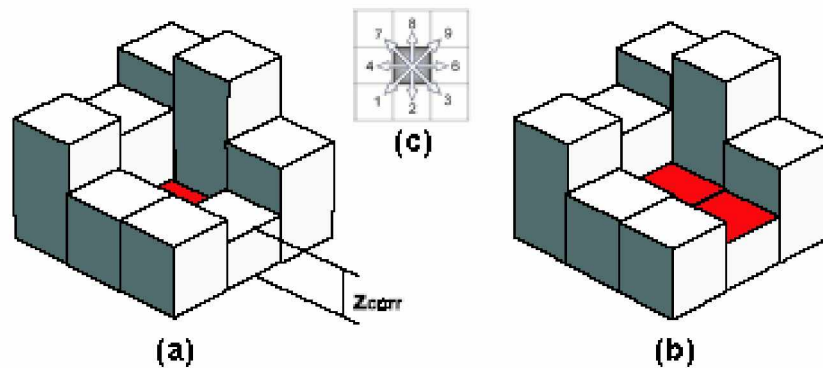
Modelo	EMC	PITS
Multicuadratic	3,68	1725
Thin Plate Spline	3,60	1098
Kriging	4,08	1105

De acuerdo a los valores de EMC y cantidad de sumideros presentados en la tabla anterior para cada uno de los modelos, se determinó que el MDE que mejor se



ajusto a la topografía de la zona de estudio fue el construido a partir de la Función Base radial con el ajuste de Thin Plate Spline.

Para la corrección de los sumideros encontrados en el MDE se empleó el software Spell Map (Guzmán, 2002), el cual por medio del modelo D8, iguala en primera instancia la cota de la celda problema con la cota de la celda de menor valor a su alrededor y adiciona una fracción de 1/10000 en las respectivas unidades de altura del MDE a la celda en cuestión, para así garantizar el drenaje.



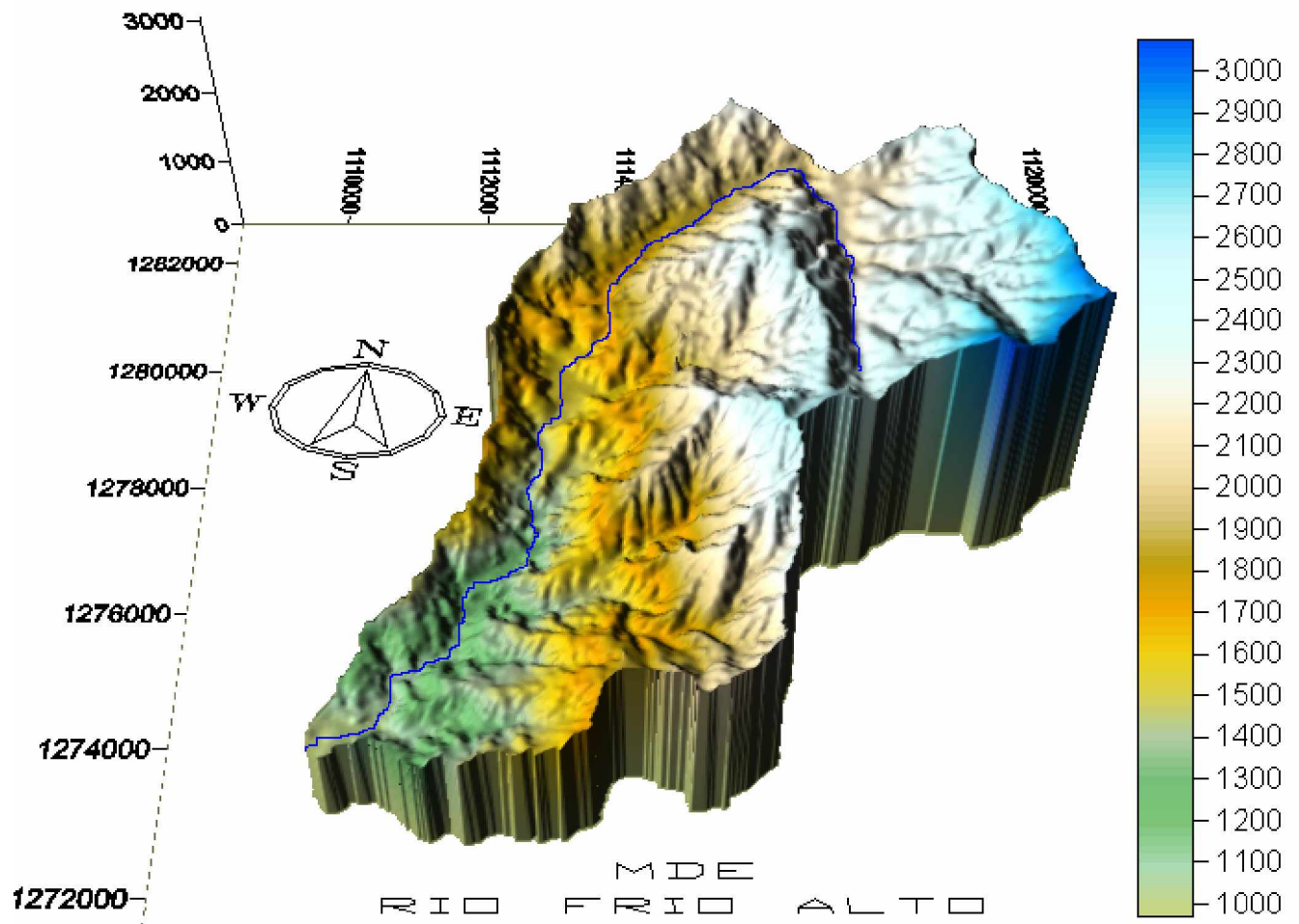
Ø **Fig. 21. (a) Esquema de sumidero. (b) Corrección de sumidero. (c) Esquema modelo D8.**

Teniendo en cuenta que el programa donde se realiza la simulación (SIMDIS3) se alimenta con información en formato GRASS, se hace la conversión de la información contenida en formato SURFER 8 del MDE seleccionado, mediante la ayuda del programa IDRISI 32, el cual reconoce información de un buen número de programas y permite hacer el cambio de formato entre estos.

Con la información del MDE en formato GRASS, se procede a ejecutar las rutinas iniciales del programa SIMDIS 3 (ver Anexo). Inicialmente se ejecuta la subrutina *1dtmcuenca1000*, la cual revisa que no se presenten sumideros en el modelo,

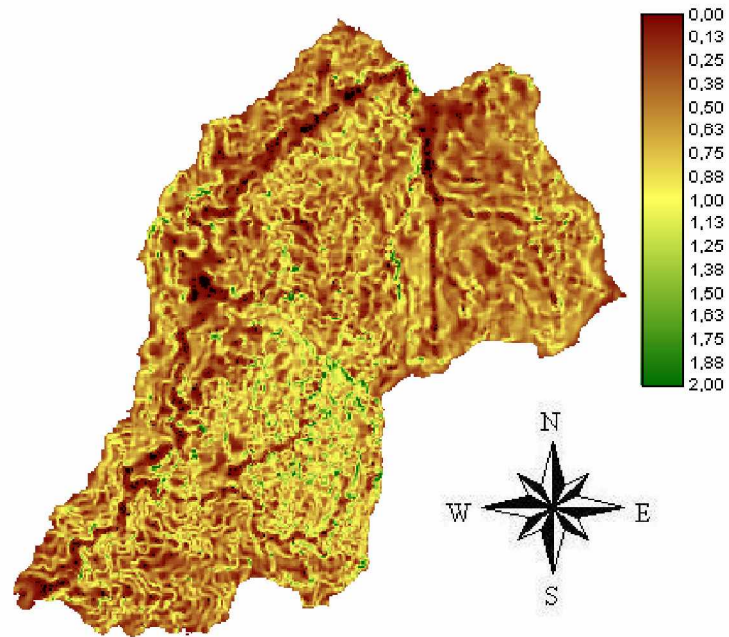


luego genera los mapas de direcciones de flujo, pendientes del terreno, red de drenaje y finalmente, introduciendo la columna y fila de la celda que corresponden con las coordenadas del punto de control a la salida de la microcuenca, genera la mascara de la divisoria de aguas.

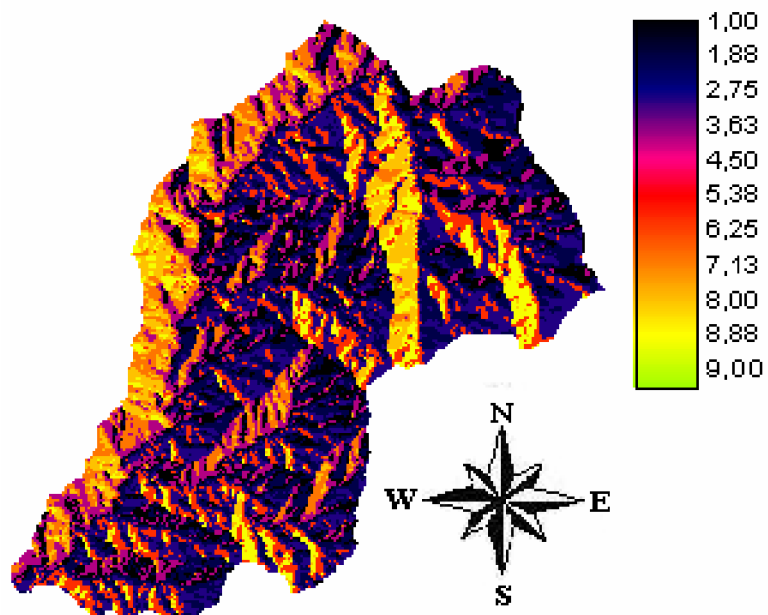


Ø Fig. 22 MDE 3D, mascara Cuenca de Río Frío Alto.



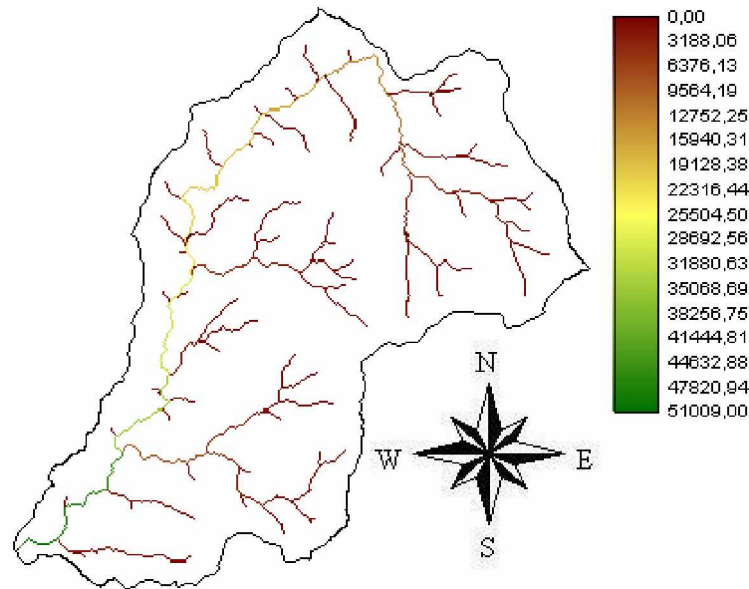


Ø Fig. 23 Mapa de pendientes Rió Frío Alto.



Ø Fig. 24 Mapa de direcciones de flujo Rió Frío Alto.





Ø **Fig. 25 Mapa de Red de Drenaje y sus celdas acumuladas.**

Los mapas mostrados anteriormente fueron los obtenidos después de ejecutar la primera subrutina *dtmcuenca1000*, de los que se utilizaran el mapa de direcciones de flujo y el de red de drenaje para la ejecución de la segunda subrutina.

Seguidamente se ejecutó la segunda subrutina, denominada *prepa3*, la cual es la encargada de generar el archivo de topología de la cuenca; este archivo contiene la información de las direcciones de flujo con el numero de celdas tributarias para cada una de las celdas que se van recorriendo en cada una de las direcciones hasta llegar al punto de salida de la cuenca.

El punto de control en el presente estudio, como se mencionó en el primer capitulo, se hizo sobre la estación limnimetrica La Esperanza que se encuentra a cargo del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).



### 3.2 PARAMETROS DEL MODELAMIENTO.

Luego de haber definido las características topográficas y morfológicas de cada una de las unidades de respuesta hidrológica de la zona, se procede a hacer un análisis detallado de cada una de las capas de suelo que se tendrán en cuenta para el modelamiento y las proporciones de las propiedades hidráulicas que las componen.

El modelo como tal, toma en cuenta las capas de suelo de la forma más simple posible, sin dejar representar de forma distribuida en profundidad los estados del suelo más importantes como: la zona de raíces, la zona no saturada, y la zona saturada. Para dicha descripción se necesitan datos de entrada los cuales deben ser analizados y procesados para obtener una buena representación de la zona, y posteriormente alcanzar resultados confiables y representativos.

En el capítulo 2, se explicó que el modelo SHIA representa a cada Unidad de Respuesta Hidrológica (celda 30x30m) por medio de cuatro tanques interconectados entre si por medio de un conducto distribuidor con características especiales de conductividad hidráulica en cada una de las capas de suelo. Dichas características se toman como parámetros de calibración del modelo y están relacionados con las condiciones reales de la zona de estudio, como son el Uso del Suelo, La Geomorfología, La Geología y Tipo de Suelo. Esta información está consignada en el Capítulo 1 de este documento, siendo extraída del Plan de Ordenamiento Ambiental la microcuenca del Río Frío, adelantado por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (C.D.M.B., 2003). Dicha información se encontró en mapas de formato .dwg de Autocad, para cada una de las características anteriormente mencionadas.

En este punto de la investigación, el interés se centró en generar los mapas de las características hidráulicas en cada una de las capas de suelo. En el capítulo 2 se



mencionó tres parámetros importantes que alimentan el modelo, Almacenamiento Capilar y cobertura Superficial, Conductividad hidráulica de la capa superior del suelo y por último la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo o subsuelo. Estos mapas son generados a partir de la información existente, teniendo en cuenta que tipo de información esta relacionada con el parámetro de interés. Cada mapa generado es conformado por zonas donde el parámetro de interés presenta características similares. Los mapas resultantes son conocidos como Modelos Digitales de Terreno (MDT), que representan la distribución de una variable en el espacio

### 3.2.1 Modelos Digitales de Terreno

Los modelos digitales de terrenos son mapas que representan la distribución de una variable en el espacio. En este caso, las variables a determinar y representar en un MDT son el Almacenamiento capilar y de cobertura superficial del suelo, la conductividad hidráulica saturada de la capa superior del suelo ( $k_s$ ) y La Conductividad Hidráulica De La Capa Inferior Del Suelo ( $k_p$ ), respectivamente.

Para la construcción de los MDT's, se procedió de tomar la información existente en formato .dwg de Autocad y exportarlo a ArcView donde se procesó con la calculadora de mapas a fin de generar zonas cuyo almacenamiento capilar y conductividad saturada fueran similares. A continuación se hará una descripción de los parámetros que se tuvieron en cuenta para la construcción de los MDT's.

#### ü Almacenamiento Capilar y Cobertura superficial del Suelo

Este parámetro, tiene en cuenta la cantidad de almacenamiento de agua en la parte superior del suelo por efecto de interceptación en la vegetación y



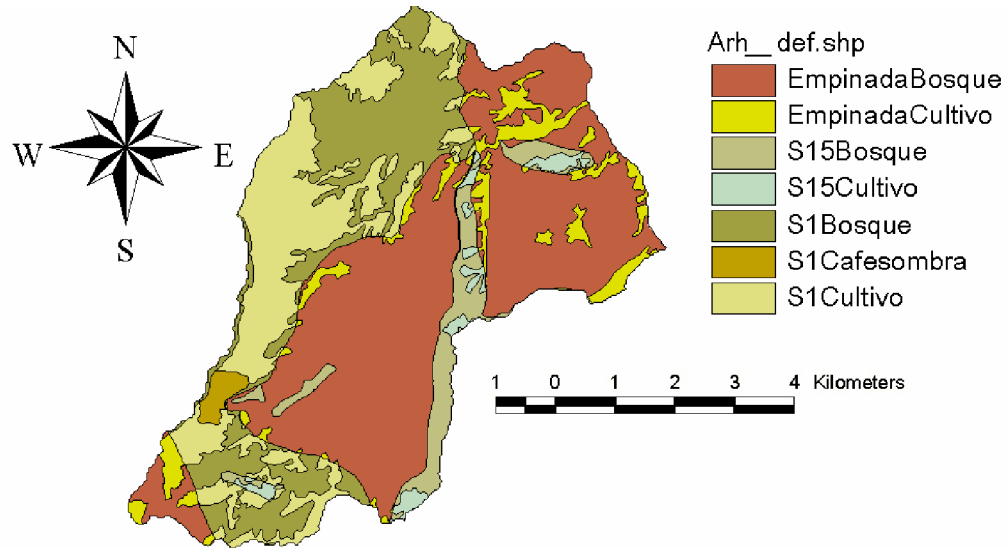
acumulación de agua en la superficie por causa de encharcamiento. De acuerdo con lo anterior, se analizó que el parámetro en cuestión está estrechamente relacionado con el Uso de Suelo y la Geomorfología de la zona. Con la primera, debido a que describe el tipo de vegetación existente, lo que permite clasificar y agrupar las zonas donde se producen interceptaciones similares, por ejemplo las zonas de árboles, las zonas de arbustos y las zonas de pastos; y la segunda como su nombre lo indica, clasifica la zona de acuerdo a la forma del relieve, ya sea de alta, moderada o baja pendiente, siendo este parámetro de gran importancia en la infiltración del agua. Así por ejemplo en lugares donde exista una alta pendiente, el agua escurrirá con más rapidez que en zonas de pendiente baja, y a su vez, la tasa de infiltración se verá afectada por dicho fenómeno. En otros términos, a mayor velocidad del agua en la superficie del suelo menor infiltración y viceversa.

Una vez procesada la información de cada una de las variables, se tendrán dos mapas como resultado parcial de dichas variables y teniendo en cuenta que se desea construir un modelo digital de terreno que mejor represente el parámetro de estudio, se superponen los mapas para generar el MDT necesario para el modelamiento. La construcción de este MDT se realizó con la calculadora de mapas de Arcview, el cual facilita la ejecución de la unión de las variables y su manipulación en la tabla de atributos a la hora de agrupar cobertura y relieve. Luego de construido el MDT se convierte el archivo a formato GRASS el cual es requerido por el modelo.

A continuación se muestra el mapa resultante del parámetro Arh con sus respectivas subzonas de Almacenamiento Capilar-Intercepción. Cabe aclarar que la nomenclatura S1 indica que el tipo de vegetación se ubica en una zona de pendientes suaves, la Empinada indica que el tipo de vegetación se ubica en una zona de pendientes medias a altas, y la S15 indica que la vegetación se ubica sobre zonas de filos rocosos.



**ALMACENAMIENTO CAPILAR CAPA SUPERIOR DE SUELO**



Ø **Fig. 26** *Mapa de divisiones de almacenamiento capa superior de suelo parámetro (Arh).*

Para el modelamiento cada una de las zonas del mapa anterior representa un valor de almacenamiento de agua, el cual se ajusta en el archivo de calibración arpar.txt que se describirá con detalle en los anexos.

**Ü Conductividad hidráulica en la capa superior de suelo.**

La conductividad hidráulica es una propiedad intrínseca del suelo, que define la cantidad de agua que puede pasar de la parte superior de suelo hacia la zona inferior y por consiguiente la cantidad de esorrentía superficial producida, teniendo en cuenta la disponibilidad de agua. Esta propiedad o parámetro esta directamente relacionado con el tipo de suelo encontrado en la superficie, siendo uno de los factores mas importantes y definitivos a la hora de hacer un balance



hidrológico, ya que regula la cantidad de agua que se infiltra y que puede llegar a la zona de reservas subterráneas convirtiéndose en recarga.

Para la elaboración del modelo digital de terreno se analizó el mapa de suelos y se determinó que las subzonas que lo componían eran representativas para el parámetro en estudio, en otras palabras cada tipo de suelo presenta características particulares de conductividad hidráulica y como se menciono se le darán valores en el modelamiento de acuerdo a cada una de las características de suelo encontradas en la zona por medio del archivo de calibración Arpar.txt. Luego de construido el MDT se convierte el archivo a formato GRASS el cual es requerido por el modelo. El mapa físico del parámetro se encuentra en el primer capítulo de este documento con su descripción detallada (Ver suelos superficiales).

#### Ü **Conductividad hidráulica en la capa inferior de suelo.**

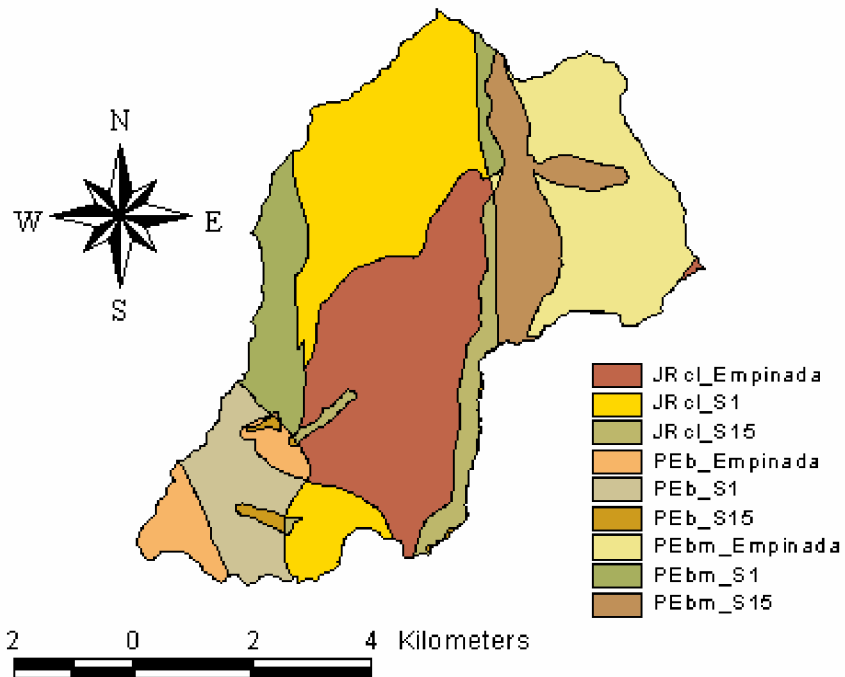
La conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo define el paso del agua desde la zona de infiltración en la capa superior de suelo hacia el acuífero; este fenómeno es también conocido como percolación de recarga, el agua luego de percolarse se convierte en flujo subterráneo el cual puede llegar a convertirse en aporte al flujo base metros mas adelante. Este parámetro esta estrechamente relacionado con la geología y geomorfología de la zona, ya que de acuerdo con las formaciones encontradas y las características del relieve, se tendrá conocimiento de los valores aproximados de conductividad hidráulica profunda para el modelamiento en el inicio de la calibración del modelo en el archivo Arpar.txt.

Para la construcción del MDT fue necesario utilizar el mapa de geología y geomorfología y al igual que el MDT de almacenamiento capilar y cobertura



superficial del suelo, se generó a partir de la superposición de los mapas nombrados inicialmente. Luego de construido se convierte el archivo a formato GRASS el cual es requerido por el modelo. Los mapas físicos que conforman el parámetro se encuentra en el primer capítulo de este documento con su descripción detallada.

**CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA CAPA INFERIOR DE SUELO**



Ø **Fig. 27** *Mapa de divisiones de conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (Arkp).*

**3.4 INFORMACION HIDROLOGICA Y CLIMATOLOGICA**

La información hidrológica se encuentra demarcada por estaciones pluviométricas encontradas sobre el área de estudio, donde es suministrada en forma diaria. Debido a su ubicación sobre el Macizo de Santander con una altura promedio de



1967.57 msnm y alcanzando una elevación máxima de 3075 msnm, la zona de estudio se caracteriza por presentar un clima de frío a muy frío con alta humedad en la totalidad de su área, lo que representa una gran influencia en las variables del ciclo hidrológico, como la evapotranspiración que se ve afectada directamente por estas bajas temperaturas y altas humedades. Así mismo la variación de la precipitación se ve altamente influenciada por el cambio en la elevación, especialmente en la zona de estudio que se encuentra ubicada en una región montañosa, generándose muchos de estos fenómenos de carácter orográfico.

### 3.4.1 Precipitación

A lo largo del presente capítulo se ha citado la información que alimenta el modelo SHIA, pero es quizás la precipitación uno de los elementos más importantes del modelamiento. La escorrentía superficial se produce en respuesta a la precipitación, lo que implica hacer una buena selección de los datos en el tiempo de dichos fenómenos. Para la escogencia de los datos, se debe verificar, esencialmente que estén completos y que los eventos de lluvias correspondan en un tiempo  $\Delta t$  a una fluctuación en el hidrograma de caudales.

Como se menciona en el primer capítulo, las estaciones de precipitación utilizadas para alimentación del modelo con datos diarios fueron:

La estación pluviométrica La Galvicia de Código 2319040, monitoreada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, se encuentra localizada a la altura de 1779msnm con coordenadas 1°279.150 Norte y 1°112.600 Este, instalada el 01/01/1969 y con la que se cuenta con datos diarios desde 01/01/69 hasta 31/05/04. Presenta una precipitación media multianual de 1997.44 mm/año. Esta estación presenta 471 datos faltantes en 35 años y 5 meses para un total de 4.0%.



La estación Climatológica Ordinaria La Esperanza de Código 2319521, monitoreada por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, se encuentra localizada a la altura de 1020msnm con coordenadas 1°273.581,36 Norte y 1°111.228,60 Este, instalada el 01/01/1979 y con la que se cuenta con datos diarios desde 19/09/79 hasta 30/04/01. Presenta una precipitación media multianual de 1435.95 mm/año. Esta estación presenta 11 datos faltantes en 21 años y 7 meses para un total de 0.2%.

La estación pluviométrica La Mariana de Código 2319074, monitoreada por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, se encuentra localizada a la altura de 2250msnm con coordenadas 1°280.310,18 Norte y 1°117.627,48 Este, instalada el 01/06/1981 y con la que se cuenta con datos diarios desde 01/06/81 hasta 16/08/04. Presenta una precipitación media multianual de 1319.64 mm. Esta estación no presenta datos faltantes en los 23 años y 2 meses de información obtenida.

En resumen las estaciones con las que se alimenta el modelo presentan las siguientes precipitaciones medias multianuales.

Ø **Tabla 14. Precipitación Media Multianual de las estaciones.**

ESTACION	ELEVACION	Pmed multianual mm/año	TIPO	ENTIDAD
La Galvicia	1779	1997.44	PM	IDEAM
La Esperanza	1020	1435.95	CO	CDMB
La Mariana	2250	1319.64	PM	CDMB

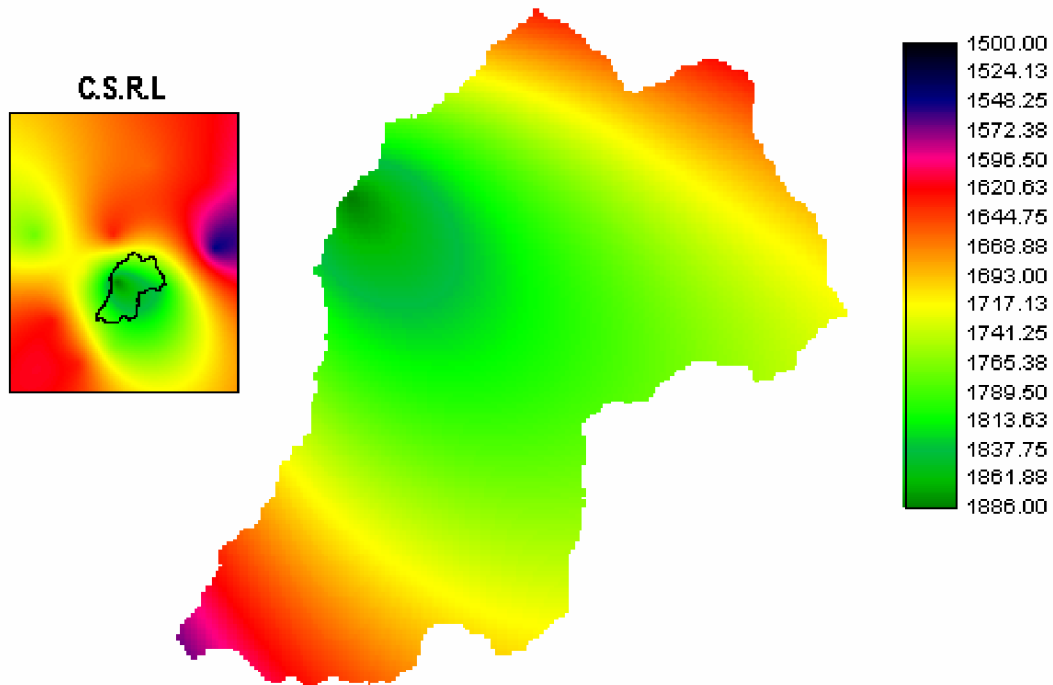
Fuente: Maradei y Rojas (2002).

Las precipitaciones medias multianuales nombradas anteriormente basadas en el estudio de Maradei y Rojas (2002), son representativas individualmente para cada



una de las estaciones. Para llegar a hacer un análisis de esta con la precipitación anual de simulación se debe contar con la distribución espacial de la precipitación media multianual en la zona, calculándola a partir del MDT realizado por Arenas y Rojas (2005) en la Cuenca Superior del Río Lebrija, con 13 estaciones ubicadas en esta cuenca para mas de 30 años de información de precipitación.

La figura 28 muestra la distribución espacial de la precipitación media multianual para la parte alta de la cuenca de Río Frío; el valor medio del conjunto de celdas que conforman el MDT es de 1750.55 mm/año.

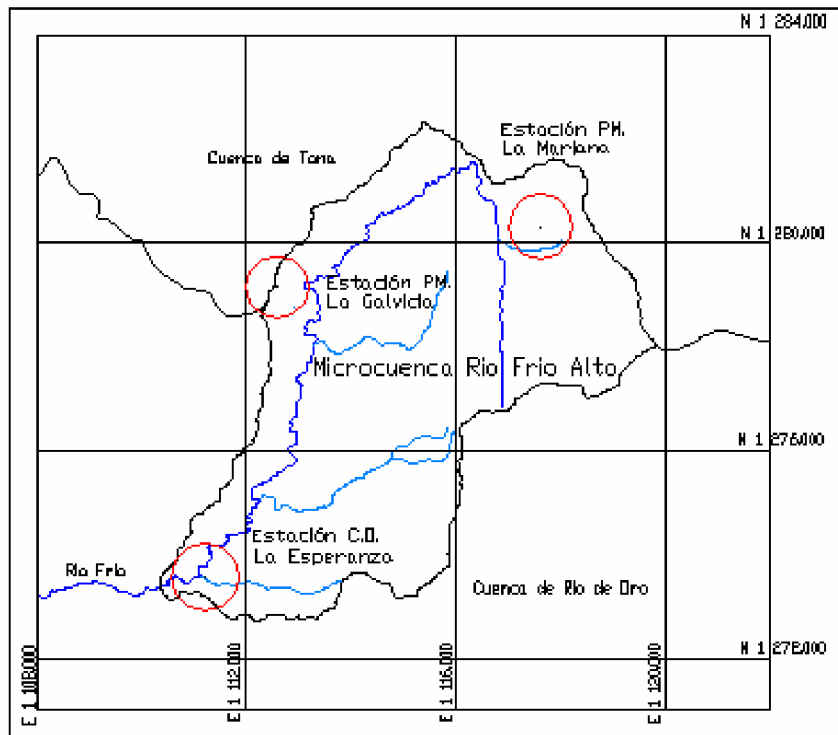


Ø **Fig. 28 Distribución espacial de precipitación media multianual. Subcuenca Río Frío Alto. Fuente: Arenas y Ruiz (2005).**

Para una mejor idea de la localización de las estaciones sobre la zona de estudio se presenta el mapa de la subcuenca y las estaciones ubicadas cada una con sus respectivas coordenadas (ver fig. 29).



En la simulación el modelo toma los datos de precipitación de cada estación en sus respectivas coordenadas para cada  $\Delta t$  y genera la distribución espacial de los datos por medio del método de interpolación conocido como el inverso de la distancia.



Ø **Fig. 29** Localización de las estaciones de Precipitación utilizadas.

### 3.4.2 Evapotranspiración (ET).

La evapotranspiración es una variable del ciclo hidrológico que se produce básicamente por el aumento de la energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie del suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor, donde el agua en estado líquido se evapora o que de estado sólido como nieve o hielo se sublima, y se convierte en vapor de agua que pasa a la atmósfera;



adicionalmente a este valor se agrega el vapor de agua producido por las plantas en el proceso de transpiración de las hojas que se lleva a cabo en la fotosíntesis. Esta variable se encuentra dividida básicamente en dos términos que se describen en este numeral y que se manejan desde el punto de vista de capacidad y desde el punto de vista de disponibilidad, estos términos son la Evapotranspiración Potencial (ETP) y la Evapotranspiración Real (ETR), también se describe la temperatura de la zona ya que esta determinantemente ligada a la Evapotranspiración y se ve afectada directamente por su variación.

### Ü **Temperatura.**

La temperatura es una variable determinante en el comportamiento de la evapotranspiración, por tanto tiene una incidencia relevante sobre la distribución de la oferta hídrica sobre la Subcuenca. Esta variable depende directamente de la elevación, viéndose afectada por la variación de la altura.

La Subcuenca de Río Frío Alto posee alturas que van desde los 949 msnm hasta los 3075 msnm, lo cual hace que en la Subcuenca haya una variación bastante significativa en la distribución espacial de la temperatura. En el estudio realizado por Maradei y Rojas (2002), donde se realizó un balance hídrico anual para la cuenca superior del río Lebrija se correlaciono la variación de la temperatura con la altitud y se obtuvo la siguiente curva de calibración para toda la cuenca:

$$Temperatura = 30.052 - 0.0066H$$

Donde H es la altura en msnm. De acuerdo a esta ecuación la zona de estudio presenta temperaturas que van desde los 23.80 °C en la parte mas baja cerca de



la falla de Bucaramanga, hasta los 9.75 °C en la parte mas alta en cercanías al picacho, con una temperatura media de 17.1 °C de acuerdo con la altura media de la Subcuenca.

### Ü **Evapotranspiración Potencial (ETP).**

La Evapotranspiración Potencial representa la cantidad máxima de agua que puede ser perdida por las plantas y el suelo superficial en condiciones de saturación y cantidad ilimitada de agua en la zona. Esta información fue tomada de “Un estudio de Oferta Hídrica en la Cuenca Superior del Río Lebrija” (Mendoza y Sandoval, 2002), en el que se registran valores de evapotranspiración potencial para la estación La Esperanza calculados a partir de diferentes formulas encontradas en la literatura. El valor inicial incluido en el modelo fue de 2.96 mm/día estimado por dicho estudio a partir de la formula de Penman la cual presentó un mejor ajuste a la realidad.

Este valor es incluido en la simulación pero por lo general no es utilizado en los balances debido a que el suelo presenta unas condiciones específicas que varían en el tiempo, siendo necesario calcular la Evapotranspiración Real que se describe a continuación.

### Ü **Evapotranspiración Real (ETR).**

La evapotranspiración real representa el vapor de agua que realmente esta pasando a la atmósfera teniendo en cuenta la disponibilidad de agua que se encuentra almacenada la zona de plantas y suelo superficial.



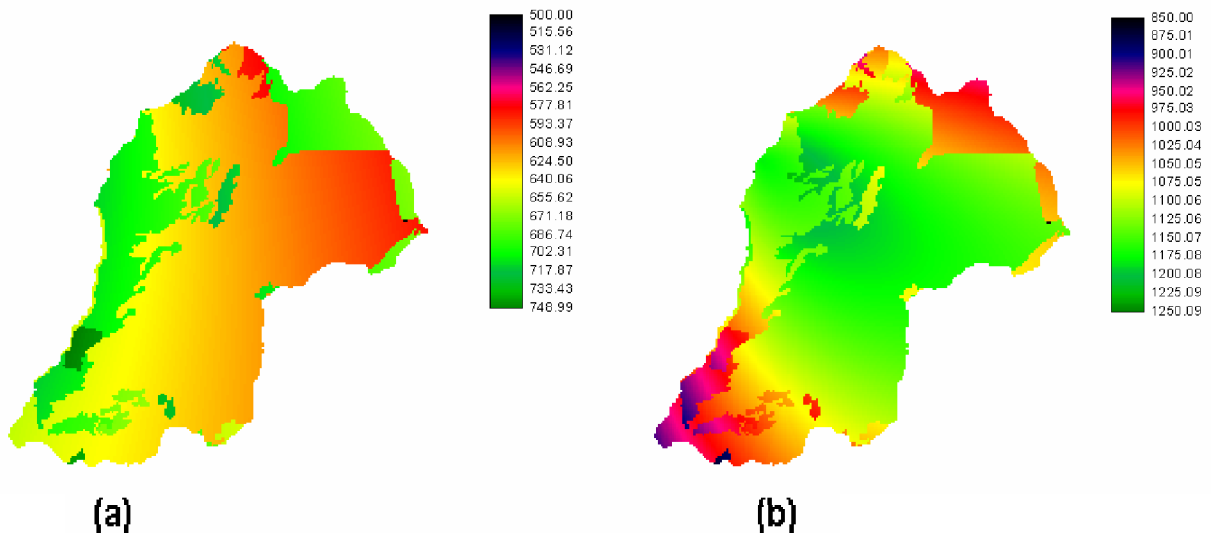
Tal como se determinó en el estudio realizado por Maradei y Rojas (2002), donde se realizó un balance hídrico anual para la cuenca superior del río Lebrija, la ETR estimada para cada una de las estaciones se presentan en la siguiente tabla basada en los resultados de dicho estudio.

Ø **Tabla 15. Evapotranspiración media multianual de las estaciones.**

ESTACION	ELEVACION	ETR multianual mm/año	TIPO	ENTIDAD
La Galvicia	1779	717.14	PM	IDEAM
La Esperanza	1020	834.08	CO	CDMB
La Mariana	2250	585.12	PM	CDMB

Fuente: Maradei y Rojas (2002).

García y Otero (2005), calcularon la distribución espacial de la Evapotranspiración Real y Oferta Hídrica multianual sobre la Cuenca Superior del Río Lebrija, donde se extrajo al igual que en la precipitación, la distribución para la parte alta de la Subcuenca de Río Frío y se estimó que el valor medio del conjunto de celdas del MDT de la ETR multianual es 643.17 mm/año y de la Oferta Hidrica Multianual 1108.53 mm/año.



Ø **Fig. 30 (a). ETR Multianual. (b). Oferta Hídrica Multianual.**

Fuente: García y Otero (2005).



#### **3.4.2.1 La Evapotranspiración en el modelo.**

El modelo utiliza un valor constante de Evapotranspiración Potencial en mm/día sobre cada una de las celdas del área de estudio, se introduce a la simulación por medio del archivo de calibración arpar.txt (ver anexo); el modelo toma este valor y lo convierte en Evapotranspiración Real dependiendo de la capacidad máxima de almacenamiento capilar estático y de la cantidad de agua almacenada de cada celda, calculándose para cada una de estas en cada uno de los tiempos  $\Delta t$  de la simulación tal como se explicó en el segundo capítulo de este documento.



## CAPITULO 4

### CALIBRACION Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO

Debido a la particularidad de cada cuenca y a la escasa información real de los parámetros que intervienen en los procesos hidrológicos, en la mayoría de este tipo de estudios se opta por alimentar inicialmente el modelo con valores representativos encontrados en estudios o ensayos previos acerca de las variables climatológicas e hidrológicas hechas para la zona o para zonas con características similares, y posteriormente ajustando estas a las condiciones reales en el proceso conocido como la calibración del modelo. La calibración es el proceso iterativo mediante el cual se ajustan las variables que influyen en el ciclo hidrológico como la evapotranspiración, el tiempo de residencia, los parámetros de almacenamiento y conductividad hidráulica en los diferentes estratos del suelo y las condiciones iniciales del acuífero, por medio de la correlación de los resultados del modelo e información real de la cuenca en estudio tal como niveles piezométricos en las laderas, permeabilidades de suelo calculadas en laboratorio y/o caudales aforados en el punto de control de la cuenca, etc.

La validación del modelo es el proceso en el que se prueban los datos obtenidos en la calibración, modelando para otra serie de tiempo. Se debe tener en cuenta que los valores de tiempos de residencia (Superficial, Subsuperficial y Subterráneo) dependen de la oferta hídrica, y la evapotranspiración potencial depende de las condiciones climatológicas de la zona, por lo que en la validación éstos son los únicos parámetros a variar. Los demás parámetros como almacenamiento y conductividades hidráulicas en las capas del suelo obtenidos en el proceso de calibración son inmodificables, dado que representan las características hidráulicas de la zona.



En el presente estudio se calibrará el modelo hidrológico con caudales aforados de la estación limnimétrica La Esperanza que es monitoreada por el IDEAM, el cual como se explicó en el primer capítulo, representa el punto de Control de la subcuenca Río Frío Alto.

Cabe anotar que inicialmente la información de las variables del ciclo hidrológico que alimentan el modelo, debe ser revisada previamente al modelamiento, teniendo en cuenta la confiabilidad que se tenga de dicha información. Esto es importante ya que se tiene un conocimiento del valor aproximado de algunas variables con el cual se puede iniciar la calibración.

#### **4.1 INFORMACIÓN DE CAUDALES.**

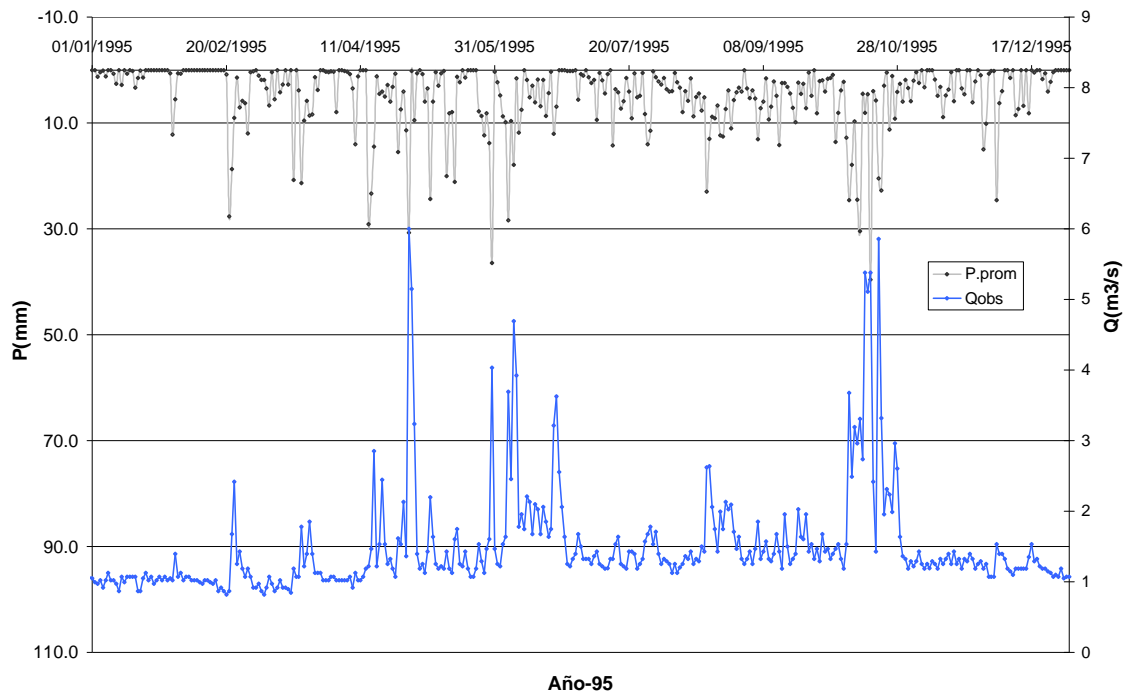
Los datos de caudales con los que se realizó el modelamiento, fueron proporcionados por la estación limnimétrica La Esperanza de Código 2319746, monitoreada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM; se encuentra localizada a la altura de 1050 msnm con coordenadas 1°27'3.005,09 Norte y 1°11'10.222,27 Este, sobre la parte alta de la cabecera del municipio de Floridablanca., instalada el 01/01/1977 y con la que se cuenta con datos diarios desde Enero de 1978 hasta Diciembre de 2003; esta estación presenta 839 datos faltantes en 20 años para un total de 9.0%.

En la elección de la serie de tiempo para realizar la calibración, se hizo el análisis de la información completa de caudales diarios, donde en primera instancia se observó que estos datos presentan cambios en el régimen de los caudales a lo largo de la serie completa, presentando así cambios en la media y la varianza en distintas series de tiempo analizadas. Por tal motivo se escogió un solo año para la calibración.



De esta serie se eligió para la calibración el año 1995, ya que en este año no presenta datos faltantes, siendo este otro inconveniente encontrado en la serie completa que presenta un alto porcentaje de días que no poseen datos. Alterna a esta elección se observaron las series de las estaciones de precipitación y se les hizo un análisis similar.

Otro factor importante que se tiene en cuenta en la elección de las series de tiempo tanto de caudal o esorrentía como de precipitación, es la interacción que existe entre dichos fenómenos, ya que presentándose un evento de lluvia, se presentará una fluctuación en el hidrograma de caudal en respuesta al evento. La siguiente figura muestra los datos de caudales y precipitación representando aproximadamente esta respuesta.



Ø **Fig. 31 Representación de los caudales vs. Precipitación promedio.**



## 4.2 PARAMETROS DE CALIBRACION

Los parámetros de calibración, son aquellos elementos del ciclo hidrológico que están incluidos en el modelo y los cuales se pretenden ajustar comparando la respuesta del modelo con los datos reales de caudal. Recordemos que de algunos de estos elementos se consultaron valores con los que se inició la calibración; sin embargo, estos datos fueron la minoría, ya que dentro de la bibliografía consultada no se tenía referencia del resto de variables que componen el ciclo hidrológico.

Los parámetros a calibrar, como se mencionó en el inicio del presente capítulo, son: la evapotranspiración, el tiempo de residencia, los parámetros de almacenamiento y conductividad hidráulica en los diferentes estratos del suelo y las condiciones iniciales del acuífero. De estos parámetros se contó con información de evapotranspiración, Almacenamiento capilar (Arh) y algunas características hidráulicas de los suelos (Arks). La primera información se obtuvo a partir de estudios realizados con anterioridad y las dos últimas se extrajeron de un estudio hecho por la Soil Conservation Service a suelos que presentan texturas similares a los expuestos en la presente investigación (Tabla 16), citado en el estudio *“Propuesta de un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la caracterización física de la Subcuenca del Río Pamplinita –Énfasis áreas de Cúcuta y Villa del Rosario- Departamento Norte de Santander”* (Ramírez, 1999).

Para la calibración en los suelos superficiales arcillo arenosos se utilizó inicialmente una permeabilidad de 0.15cm/h, para los suelos Franco arcillosos de 0.5cm/h, para los suelos Franco arcilloso arenoso gravilloso de 0.75cm/h, este último valor se basa en el valor de permeabilidad del suelo Franco arenoso arcilloso y se adiciona un pequeño porcentaje por su contenido de grava. A los



datos con los que no se contaba información se les dio un valor inicial arbitrario en el modelo, para dar comienzo a la calibración.

Ø **Tabla 16. Relación de la textura con algunas propiedades del suelo.**

TEXTURA	PERMEABILIDAD cm/h	LIMITE LIQUIDO	INDICE DE PLASTICIDAD	CAPACIDAD DE ALMACENA MIENTO cm/cm de suelo
Arcillo – areno limoso	0.15 – 0.5	40 - 45	10 --20	0.14 – 0.16
Franco arcillo limoso	0.5 – 1.0	40 - 50	10 -- 20	0.18 – 0.2
Franco Arcilloso	0.5 – 1.6	30 – 40	15 -- 20	0.18 – 0.20
Franco	1.6 – 5.0	25 - 35	5 -- 10	0.14 – 0.18
Franco limoso	1.6 – 5.0	30 – 40	5 -- 10	0.15 – 0.2
Arcillo Arenoso	0.15 – 0.5	25 - 40	5 -- 20	0.12 - 0.16
Franco Arcillo arenoso	0.5 – 1.6	25 - 35	5 -- 15	0.10 – 0.16
Franco arenoso muy fino	1.6 – 5.0	25 – 30	5 -- 10	0.16 – 0.18
Franco arenoso	5 – 16	-	-	0.11 – 0.13
Areno francoso	16 – 50	-	-	0.08 – 0.10
Arena	50 -	-	-	0.06 – 0.08

Estos rasgos pueden asumirse cuando no exista la información proveniente de las terminaciones respectivas. Fuente: Publicaciones del Soil Conservation Service, USDA., en especial el "Soil Survey. Ventura Area, California"

El proceso de calibración consiste en ejecutar el modelo repetidamente, comparando en cada ciclo los valores de caudal observado y simulado y modificando alternamente los parámetros para obtener un mejor ajuste en la siguiente simulación. La correlación es realizada con el coeficiente de Nash, del cual se hablara en detalle a continuación.



## Ü Control de la Calibración.

Con el fin de evaluar la correlación de los caudales simulados y observados en el proceso de calibración, se utilizó el coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970), citado por Chu (2003), el cual se encuentra representado en la siguiente expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Donde:

**Q<sub>obs<sub>t</sub></sub>**: representa cada uno de los datos de caudales medidos en la estación de aforo en el tiempo t.

**Q<sub>sim<sub>t</sub></sub>**: representa cada uno de los datos de caudales calculados por el modelo para cada tiempo t.

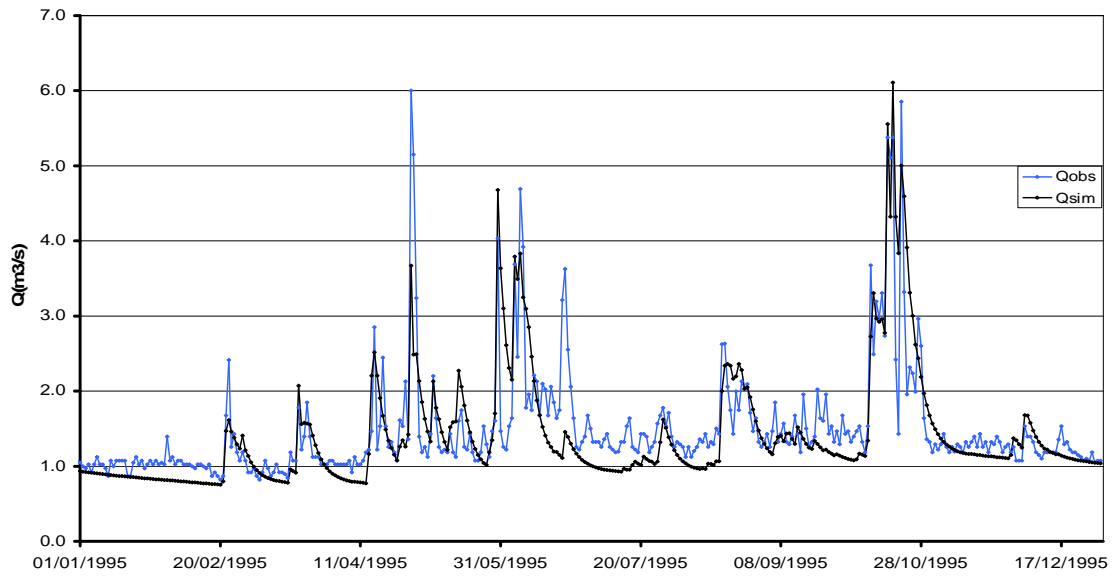
**$\overline{Q_{obs}}$** : representa la media de los caudales medidos en la estación de aforo.

**R<sup>2</sup>**: representa el coeficiente de correlación. Este coeficiente se aproxima a 1 cuando se presenta un buen ajuste de los datos.

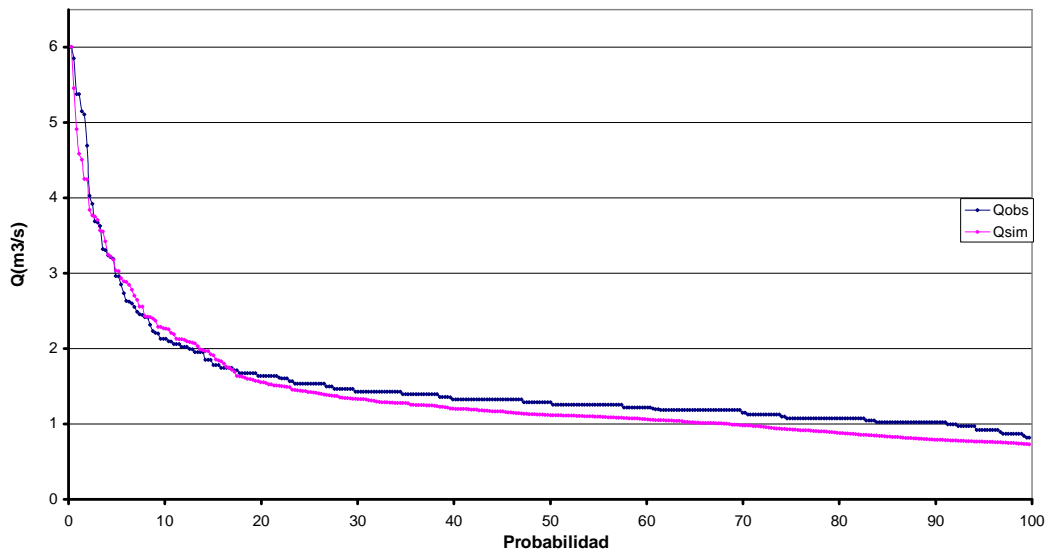
El valor final del coeficiente de Nash para el año 1995 que se obtuvo en la iteración de los parámetros y variables del ciclo hidrológico fue 0.57, lo cual es una medida aceptable dadas las características geomorfológicas de la subcuenca y la resolución de los datos hidrológicos con los que se contaba.

En la siguiente figura se muestran los hidrogramas de los caudales simulados y medidos para el año de calibración del modelo, en donde se observa una buena representación de los caudales simulados a las fluctuaciones del hidrograma de los caudales medidos.





Ø **Fig. 32 Hidrogramas de caudales simulados y observados, año 1995.**



Ø **Fig. 33 Representación de los caudales y sus probabilidades de excedencia, año 1995.**

También para esta serie de tiempo se analizó la probabilidad de excedencia de los caudales simulados y observados, y se compararon resultando una buena aproximación de los caudales de probabilidad de excedencia.

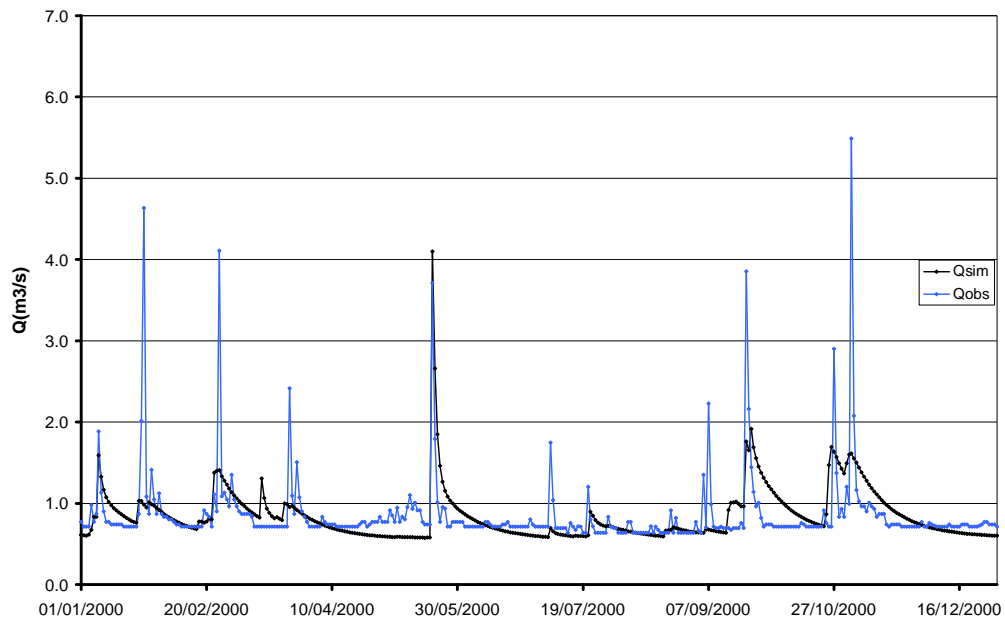


### 4.3 VALIDACION DEL MODELO HIDROLOGICO.

Como se indico en el inicio del capitulo, la validación del modelo tiene en cuenta los valores resultantes de las características particulares de la zona, ajustadas en la calibración. Para hacer efectiva la validación se eligió dos periodos de tiempo, el año 2000 y la serie comprendida entre el año 1987 y 1991.

El año 2000 presenta una precipitación media anual de 1440.18 mm/año: este valor se encuentra aproximadamente 300 mm por debajo de la precipitación media multianual de la zona (1750.55mm/año) debido a que en este año se presento el fenómeno del niño, representando así un periodo seco, motivo por el cual se escogió para la validación.

En la siguiente figura se muestra los hidrogramas de caudales simulados y caudales observados para el año 2000, los cuales presentan un coeficiente de Nash de 0.25.

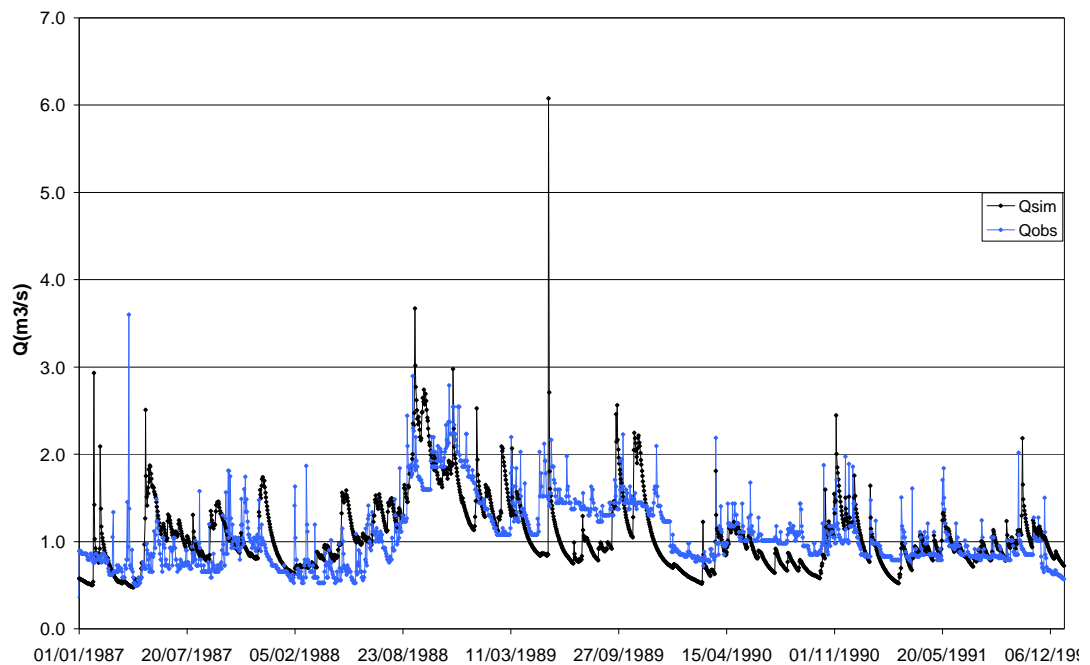


Ø **Fig. 34 Hidrogramas de caudales simulados y observados, año 2000.**



El periodo entre los años 1987 y 1991 se validó con el fin de analizar la recarga de la subcuenca de Río Frío parte alta y comparar estos resultados con lo obtenidos en el estudio hecho por Isaza (2004) para el mismo periodo de tiempo en la Cuenca del Río de Oro. Con estos resultados se determinada el aporte de la recarga de la subcuenca en estudio a la Cuenca de Río de Oro. Esta serie presenta una precipitación media multianual de 1463.87mm/año.

En la siguiente figura se muestra los hidrogramas de caudales simulados y caudales observados para esta serie, los cuales presentan un coeficiente de Nash de 0.45.



Ø **Fig. 35 Hidrogramas de caudales simulados y observados, serie 1987 a 1991.**

Los resultados de la calibración y validación serán descritos en el capítulo 5 de análisis de resultados.



## CAPITULO 5

### ANALISIS DE RESULTADOS

Luego de encontrar un ajuste aceptable de los caudales en el proceso de calibración, se procede a extraer del archivo de calibración los valores de las variables del ciclo hidrológico ajustadas por el modelo a las características específicas de la zona en estudio. Estos resultados comprenden los mapas finales de distribución espacial de almacenamiento capilar estático y conductividad hidráulica saturada en la capa superior e inferior de suelo; los tiempos de residencia de los flujos superficial, subsuperficial y subterráneo respectivamente, y la evapotranspiración potencial. Además, se examina el archivo de resultados creado por el modelo en la simulación, observando y analizando el comportamiento de la evapotranspiración real; de las componentes de producción y transferencia de escorrentía, y finalmente de la recarga que es el objetivo principal del presente estudio.

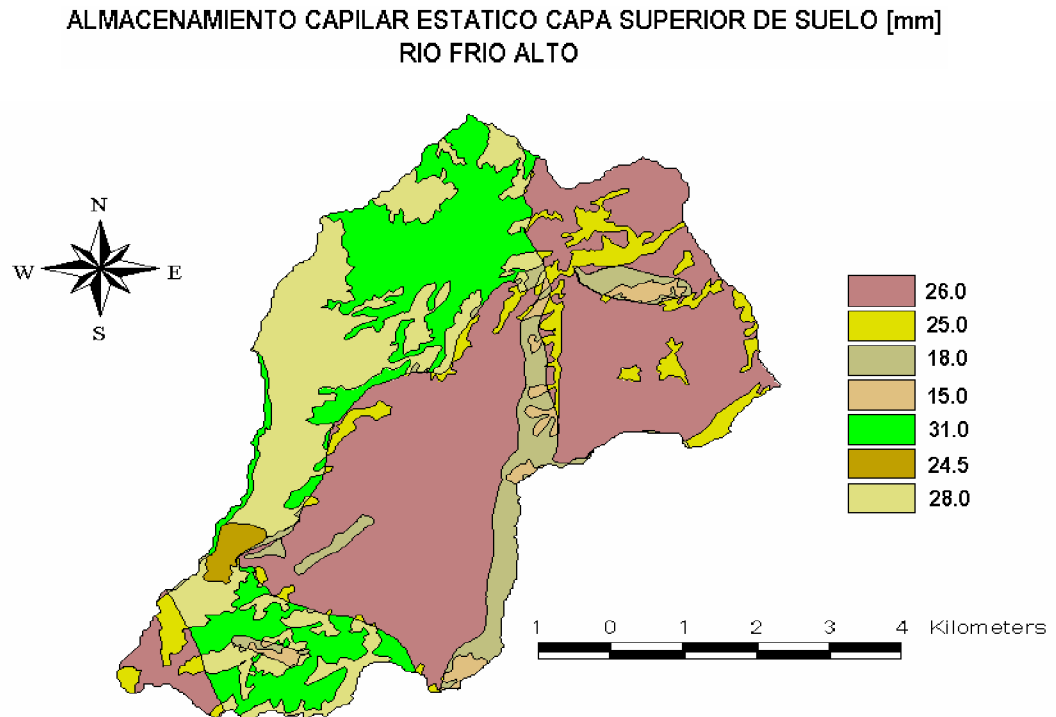
#### 5.1 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.

##### 5.1.1 MDT's de características hidráulicas de suelo.

Una vez finalizado el proceso de calibración manual, se obtuvieron los valores de almacenamiento capilar estático y conductividad hidráulica superior e inferior de suelo, los cuales se encuentran distribuidos espacialmente en la subcuenca. Las figuras 36 ,37 y 38 representan la distribución espacial de los parámetros mencionados en el párrafo anterior, junto con los respectivos valores en las



unidades correspondientes de almacenamiento (mm) y permeabilidad (mm/día). Cabe agregar que estos valores fueron extraídos del archivo Arpar.txt del modelo, sobre el cual se realiza la calibración y que se mostrará en los anexos de este documento.

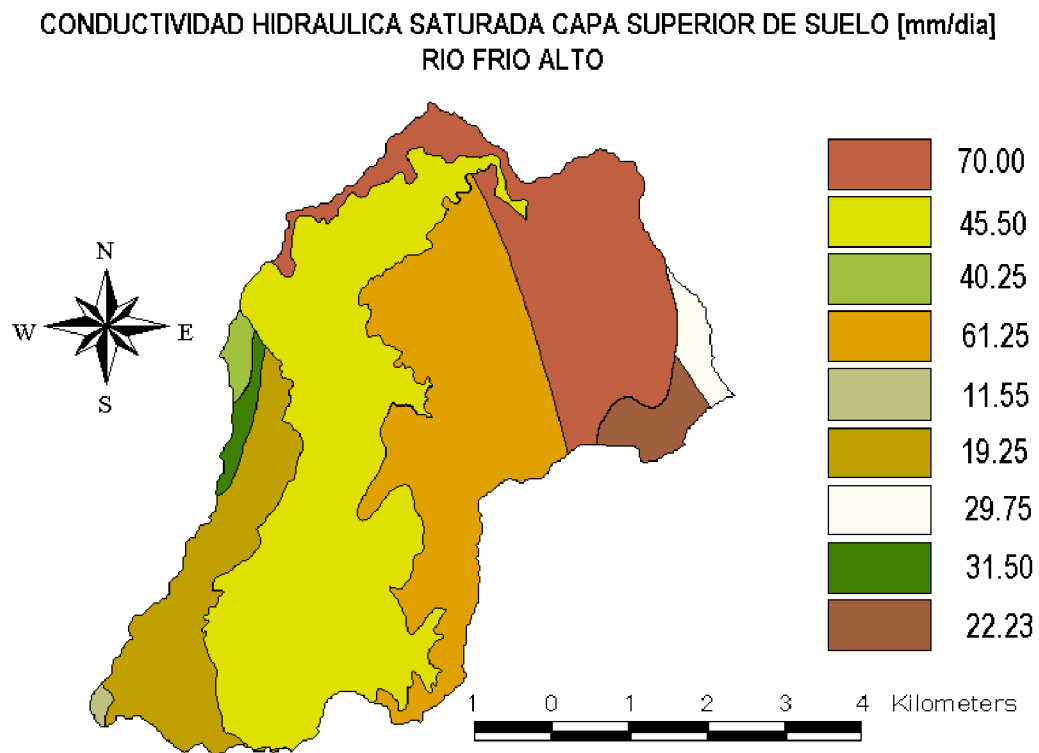


Ø **Fig. 36** *Valores de almacenamiento capilar de suelo. [mm].*

Ø **Tabla 17** *Almacenamiento capilar para cada subzona.*

	<b>Subzona</b>	<b>Almacenamiento [mm]</b>
	EmpinadaBosque	26.0
	EmpinadaCultivo	25.0
	S15Bosque	18.0
	S15Cultivo	15.0
	S1Bosque	31.0
	S1CaféSombra	24.5
	S1Cutivo	28.0

De acuerdo con los resultados anteriores se presentó un mayor almacenamiento para los Bosques. Este resultado es acorde al planteamiento del modelo que toma este parámetro como la suma de la capacidad de campo y la interceptación de la vegetación, siendo esta última un aporte elevado teniendo en cuenta la interceptación de las hojas de los árboles. Particularmente la zona de mayor interceptación es S1Bosque, ya que esta zona boscosa se encuentra ubicada sobre pendientes suaves donde el escurrimiento es menor, lo que permite un mayor almacenamiento en la zona de raíces. El menor almacenamiento se presentó en la zona de cultivos ubicada en el filo rocoso (S15cultivo), debido a la baja interceptación y la alta pendiente donde se encuentran ubicados.



Ø **Fig. 37** *Valores de conductividad hidráulica saturada capa superior de suelo. [mm/día].*



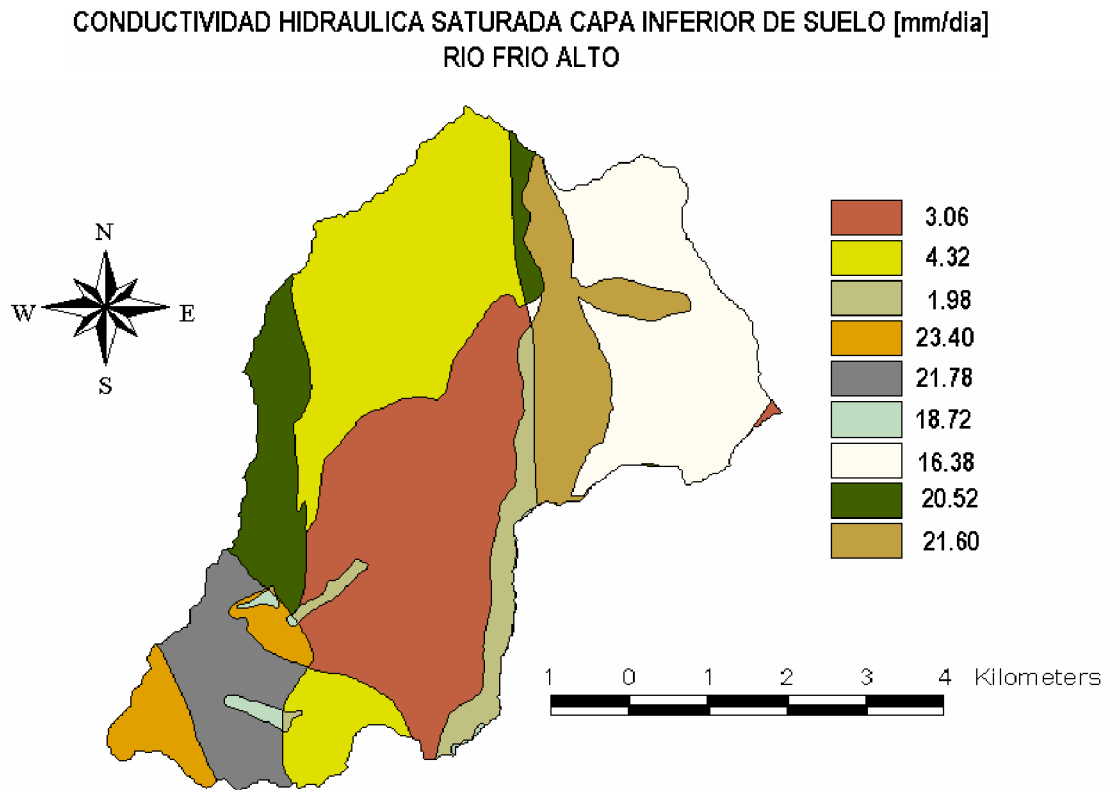
Ø **Tabla 18. Conductividad hidráulica superior para cada subzona.**

	<b>Subzona</b>	<b>Conductividad Hidraulica superior[mm/dia]</b>
	Meseta	11.55
	MRg1	19.25
	FRg	70.00
	MRf	45.50
	LRg	61.25
	SRg	22.23
	PRg	29.75
	RRg1	31.50
	HRg1	40.25

La conductividad hidráulica en la capa superior de suelo, es influenciada directamente por los suelos superficiales (Cuaternario) producidos por la meteorización, producción de suelos residuales, y material suelto de los estratos más bajos como las formaciones geológicas

Los resultados de conductividad luego de la calibración fueron satisfactorios, teniendo en cuenta la aproximación entre estos y los valores iniciales propuestos. Por ejemplo el valor de FRg que es un suelo Franco arcilloso arenoso sobre gravilloso resultó de 70mm/dia y el valor inicial fue de 180 mm/dia y los HRg1, RRg1 que son suelos de igual composición resultaron de 40.25 y 31.50 mm/dia respectivamente, la disminución del valor inicial en estos suelos pueden ser atribuidos al grado de erosión ligera que presentan. El resto de suelos presentaron también disminución del valor inicial tal como se esperaba debido a las altas pendientes de las zonas donde se encuentran.





∅ **Fig. 38** *Valores de conductividad hidráulica saturada capa inferior de suelo. [mm/dia]*

∅ **Tabla 19.** *Conductividad hidráulica inferior para cada subzona.*

	<b>Subzona</b>	<b>Conductividad Hidraulica inferior [mm/dia]</b>
	JRcl-Empinada	3.06
	JRcl-S1	4.32
	JRcl-S15	1.98
	Peb-Empinada	23.40
	Peb-S1	21.78
	Peb-S15	18.72
	Pebr-Empinada	16.38
	Pebr-S1	20.52
	Pebr-S15	21.60

La conductividad hidráulica en la capa inferior de suelo que resulto en el presente estudio, fue menor para formación ígnea Cuarzomonzonita de la Corcova con conductividades que van desde 1.98 hasta 4.32mm/día, siendo este un valor aceptable debido a la estructura equigranular de grano fino y su composición interna descrita en el capítulo 1.

La formación metamórfica presenta conductividades hidráulicas altas, debido a los procesos estructurales y de meteorización a los que se encuentran sometidos. El Gneiss ubicado en la zona oriental se presenta altamente meteorizado con suelos residuales limoarenosos espesos, registrando conductividades que van desde 16.38 a 21.60mm/día. Así mismo el Gneiss ubicado en la zona occidental se encuentra altamente fracturado debido a la influencia de la falla de Bucaramanga, descrita en detalle en el capítulo 1, presentando así conductividades que van desde 18.72 a 23.40mm/día.

### **5.1.2 Precipitación.**

El valor de la precipitación anual en la cuenca Río Frío Alto parte alta, para el periodo de calibración fue de 1751.30 mm/año, presentando un comportamiento medio de la precipitación, dada la similitud entre esta y la media multianual (1750.55 mm/año).

### **5.1.3 Evapotranspiración Potencial (ETP) y Real (ETR).**

En todos los procesos que comprenden el ciclo hidrológico, es la evapotranspiración el fenómeno que condiciona la oferta Hídrica, definiendo la oferta hídrica como la disponibilidad de agua existente en el límite superior de la capa de suelo para que ocurra infiltración y escorrentía superficial, condicionando



así la cantidad de agua para la producción de las diferentes componentes de escorrentía.

El resultado optimizado de la evapotranspiración potencial utilizada por el modelo en la calibración fue de 2.55mm/día, resultado que se aproxima al valor con el que se inició la calibración (2.96mm/día), estimado por Mendoza y Sandoval (2002), para la estación CO la Esperanza. Esta diferencia puede ser atribuida a que el modelo utiliza un valor medio de la evapotranspiración para el área de análisis, dada la diferencia de elevaciones que van desde los 1050 msnm hasta los 3075 msnm en la cuenca; mientras que el valor obtenido por Mendoza y Sandoval se remite a datos obtenidos por la estación CO La Esperanza, que se encuentra a 1020 msnm.

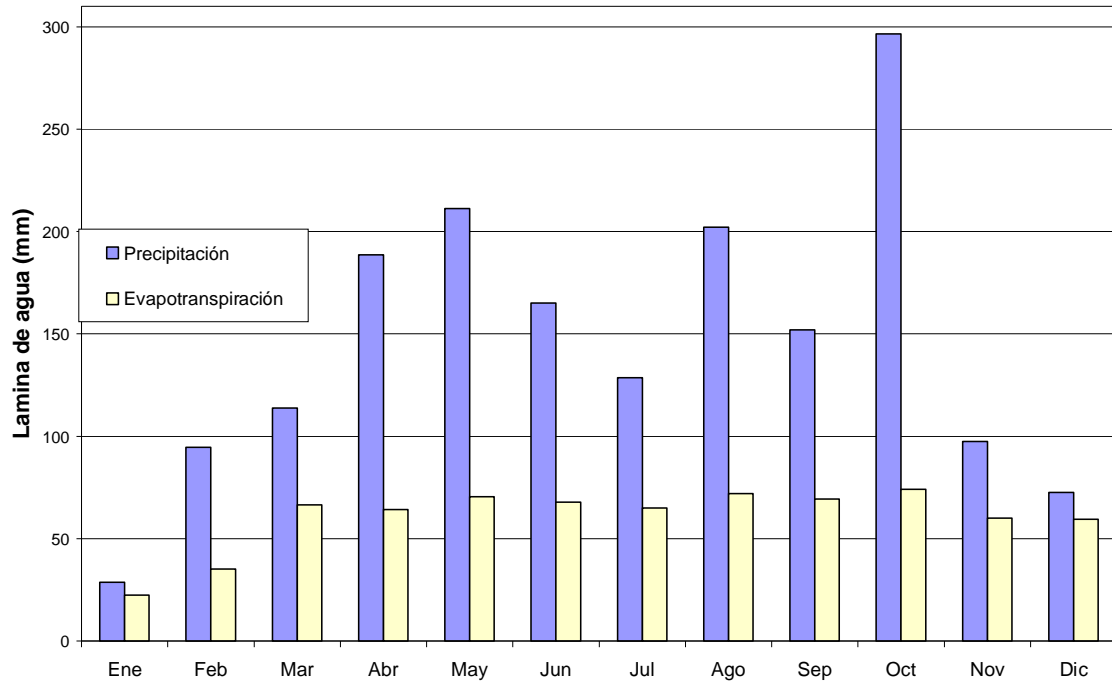
El valor anual de la evapotranspiración real estimado a partir del modelamiento fue de 726.48 mm/año, que en comparación con 643.17mm/año que es el promedio de los valores anuales estimados por García y Otero (2005) resulta ser aceptable, representando así el 41.5% de la precipitación anual.

Una de las ventajas importantes del modelo es permitir obtener los valores calculados de cada una de las variables de acuerdo al intervalo con que son incluidos los datos de precipitación, en este caso se realizan balances diarios. En base a estos resultados fueron calculados los valores mensuales de la precipitación y de la Evapotranspiración Real para la zona de estudio, presentados a continuación.

En la representación de los valores mensuales de precipitación y evapotranspiración de la figura 39 se analiza el comportamiento bimodal de la primera, presentándose dos temporadas lluviosas. Con respecto a la evapotranspiración se analiza que se ve severamente afectada en periodos secos alcanzando valores muy cercanos a la precipitación, dado que depende



principalmente de la humedad del suelo; en periodos lluviosos se acerca sustancialmente al valor de la evapotranspiración potencial, debido a la alta pluviosidad.



Ø **Fig. 39 Evapotranspiración Real media mensual en la zona de estudio y precipitación como referencia. Año 1995.**

Ø **Tabla 20. Valores de Evapotranspiración y precipitación mensual (mm). Año 1995.**

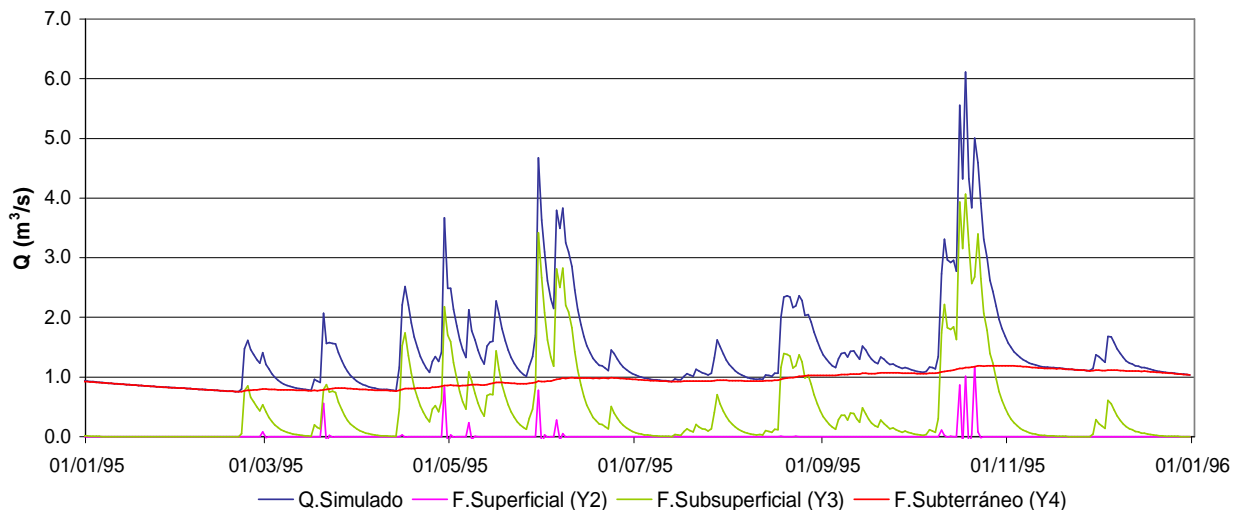
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>ETR med mensual</b>	22.45	35.08	66.48	64.12	70.49	67.88	65.04	72.04	69.30	74.08	60.07	59.45	726.48
<b>Pmed mensual</b>	28.60	94.67	113.79	188.64	211.26	165.09	128.65	202.05	152.05	296.51	97.51	72.48	1751.30
<b>% (ETR/P)</b>	78.5%	37.1%	58.4%	34.0%	33.4%	41.1%	50.6%	35.7%	45.6%	25.0%	61.6%	82.0%	41.48%



### 5.1.4 Componentes de la Escorrentía.

La producción de escorrentía en el modelo se presenta en tres fases tal como se explicó en el capítulo 2, estas fases son: El flujo superficial, El flujo subsuperficial, y el flujo base o subterráneo.

Como se puede observar en la Figura 40, la componente de flujo subterráneo (Y4) controla las recesiones y los caudales mínimos en los periodos secos; la componente subsuperficial (Y3) es importante en la simulación de caudales medios y máximos, en respuesta de las precipitaciones que exceden el almacenamiento capilar en cada unidad de respuesta hidrológica de la zona; y la componente superficial (Y2), que debido a la alta infiltración de la zona solo se manifiesta en eventos extremos de lluvia.

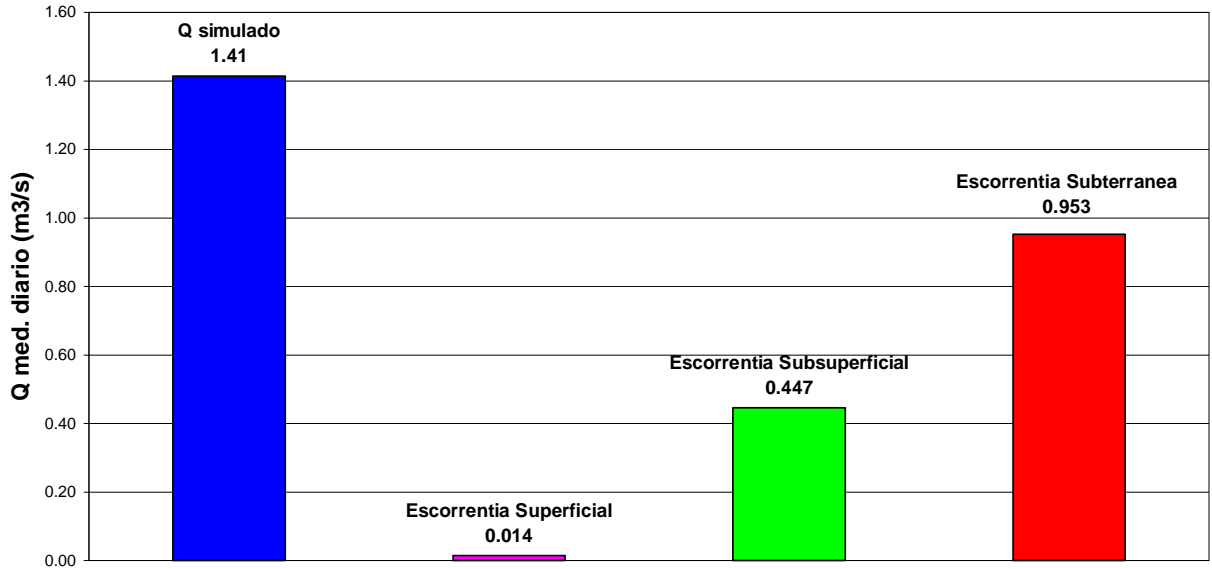


Ø **Fig. 40 Representación de las componentes de escorrentía. Año 1995.**

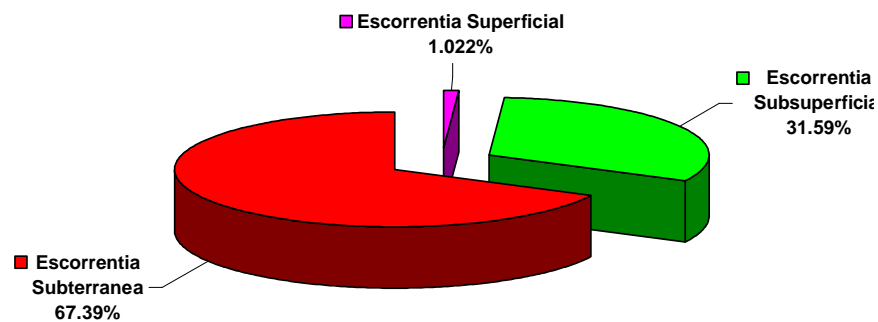
Las Figuras 41 y 42, se observan los valores de cada una de las componentes de la escorrentía que aportan al caudal del río que fluye por la red hídrica con un caudal medio diario de  $1.41 \text{ m}^3/\text{s}$  y su porcentaje con respecto a este caudal simulado. De acuerdo con estos valores, el mayor aporte al caudal total del río



proviene del flujo subterráneo (67.39%), en menor proporción del flujo subsuperficial (31.59%) y superficial (1.02%).



Ø Fig. 41 Aporte de los caudales promedios simulados de las componentes de escorrentía al caudal del río. Año 1995.



Ø Fig. 42 Porcentaje del aporte de las componentes de la escorrentía al caudal del río. Año 1995.



Para cada una de las componentes de la escorrentía se ajustaron los tiempos de residencia, obteniendo para el flujo superficial un tiempo de 20 horas, lo cual refleja la respuesta relativamente rápida de la subcuenca, el flujo subsuperficial registró un tiempo de 4.5 días y para el flujo subterráneo 244 días.

### **5.1.5 Recarga.**

La recarga puede definirse como el volumen de agua que penetra en un cierto período de tiempo en las reservas subterráneas o como el flujo unitario que alcanza el nivel freático (Custodio, 1997).

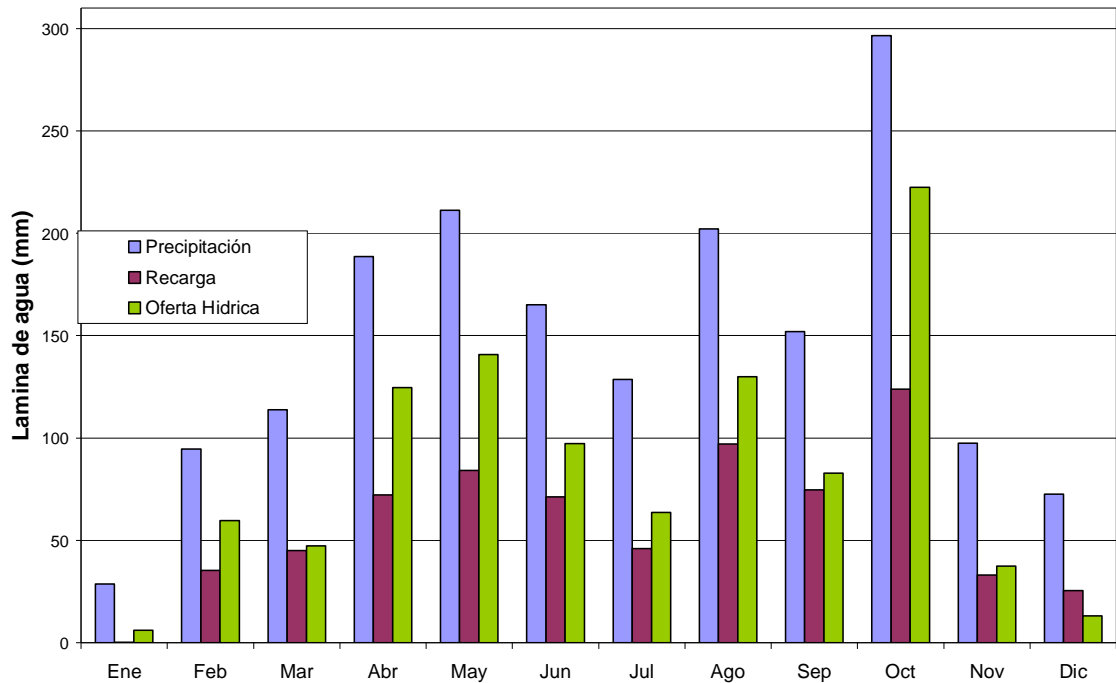
El valor de la recarga anual para el periodo de simulación fue de 707.95mm/año, representando el 70% de la oferta hídrica anual y el 40.0% de la precipitación anual del periodo (1751.30mm/año), es decir, el 40.0% de la precipitación anual pasa a ser parte del almacenamiento de aguas subterráneas. En la Tabla 21 se comparan los valores mensuales de recarga con los eventos de lluvia.

El mayor valor de la recarga alcanzado fue el de Octubre con 123.81mm de lamina de agua, y el menor valor de la recarga presentado fue el de Enero con 0.10mm de lamina de agua. Esta gran diferencia se debe a que en los meses de diciembre y enero se presenta una época de estiaje, donde la evapotranspiración y la precipitación alcanzan valores similares, ocasionando una alta disminución en el escurrimiento por excedencia capilar. Caso contrario se presenta en el mes de octubre donde el valor de la oferta hídrica es elevado y ocasiona un alto porcentaje de escurrimiento hacia las capas inferiores del suelo, que finalmente puede llegar a formar parte de las reservas subterráneas.



Ø **Tabla 21. Valores de Recarga media mensual y su porcentaje respecto a la Precipitación media mensual (mm). Año 1995.**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agost	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>Recarga med mensual</b>	0.10	35.29	45.01	72.22	84.19	71.33	45.94	96.99	74.59	123.81	32.96	25.52	707.95
<b>Pmed mensual</b>	28.60	94.67	113.79	188.64	211.26	165.09	128.65	202.05	152.05	296.51	97.51	72.48	1751.30
<b>O-H</b>	6.15	59.59	47.31	124.52	140.77	97.21	63.60	130.01	82.75	222.43	37.44	13.03	1024.82
<b>%(R/P)</b>	0.3%	37.3%	39.6%	38.3%	39.8%	43.2%	35.7%	48.0%	49.1%	41.8%	33.8%	35.2%	40.4%



Ø **Fig. 43 Recarga, Oferta Hídrica y Precipitación media mensual. Año 1995.**



## 5.2 RESULTADOS DE LA VALIDACION.

### 5.2.1 Precipitación.

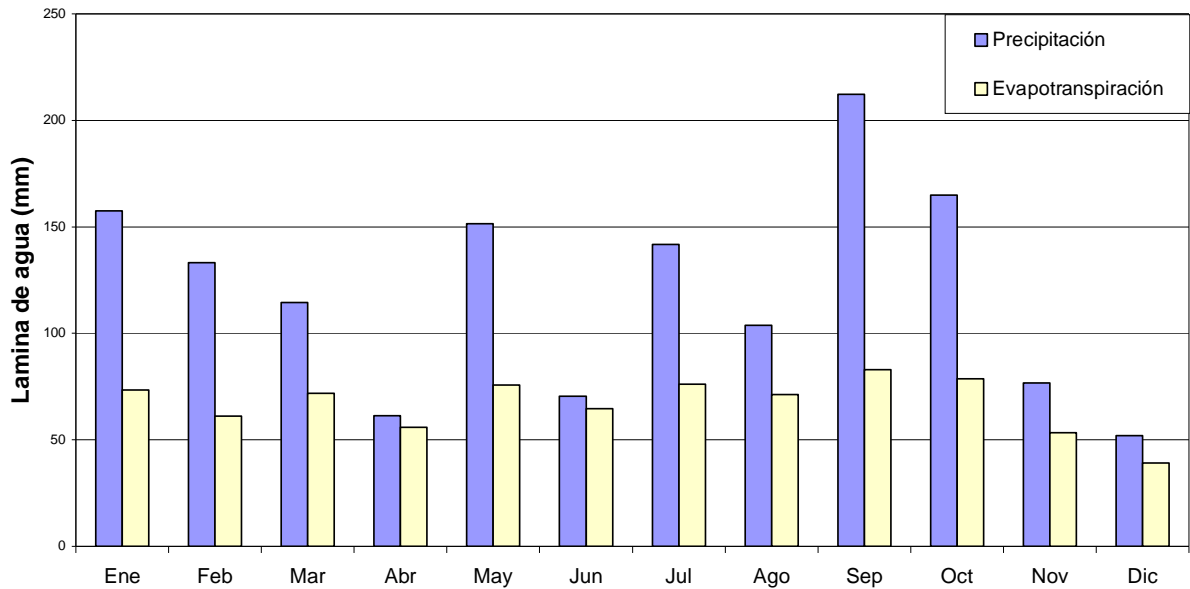
Como se menciona en el capítulo 4, se eligió un periodo de precipitación anual baja para realizar la validación y analizar la respuesta de la subcuenca a periodos de estiaje. El año 2000 registra una precipitación anual de 1440.18mm/año, este valor presenta una disminución del 18% en la precipitación respecto a la precipitación anual del año 1995.

### 5.2.2 Evapotranspiración Potencial (ETP) y Real (ETR).

Para este periodo el resultado optimizado de la evapotranspiración potencial utilizada por el modelo fue de 3.05mm/día, resultado que es coherente con el valor con el que se inició la calibración (2.96mm/día), estimado por Mendoza y Sandoval (2002), para la estación CO la Esperanza.

El valor anual de la evapotranspiración real estimado a partir del modelamiento fue de 804.23mm/año, que en comparación con la media multianual 643.17mm/año, representa el 56.0% de la precipitación anual. Este hecho puede ser atribuido a las condiciones climáticas que se presentaron en ese periodo de estiaje, tales como: altas temperaturas, alto brillo solar, etc.





Ø **Fig. 44 Evapotranspiración Real media mensual en la zona de estudio y precipitación como referencia. Año 2000.**

Ø **Tabla 22. Valores de Evapotranspiración y precipitación mensual (mm). Año 2000.**

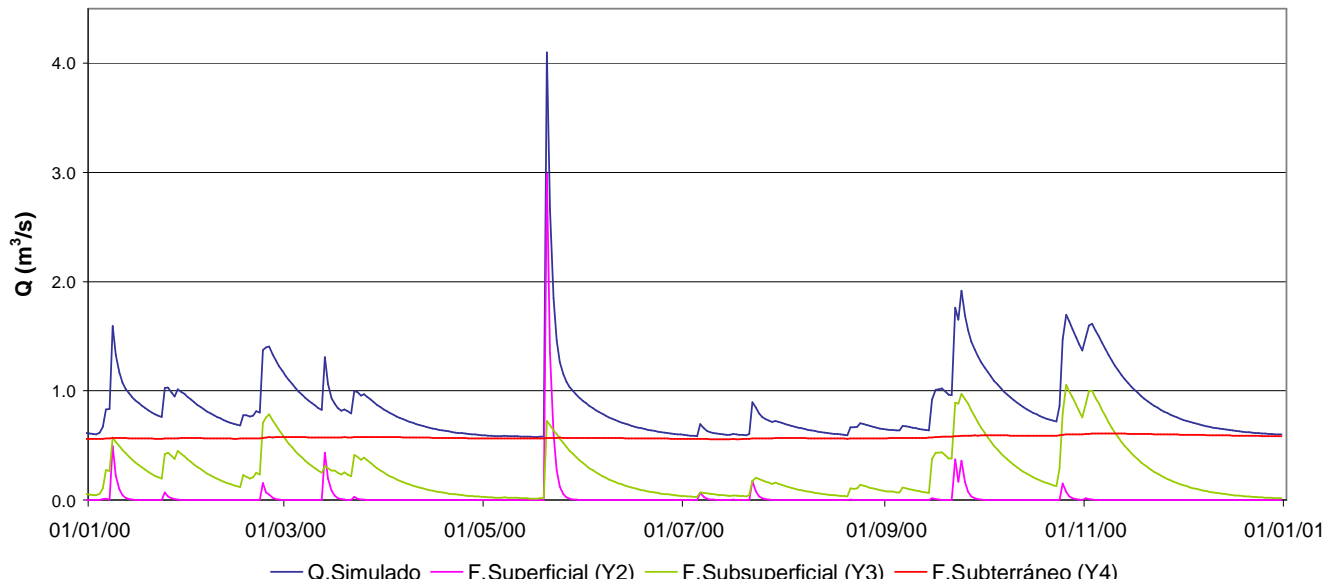
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agost	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>ETR med mensual</b>	73.44	61.15	71.86	55.81	75.80	64.63	76.06	71.29	82.88	78.71	53.42	29.21	794.24
<b>Pmed mensual</b>	157.51	133.24	114.49	61.42	151.41	70.56	141.77	103.82	212.30	164.90	76.81	75.85	1464.08
<b>% (ETR/P)</b>	46.6%	45.9%	62.8%	90.9%	50.1%	91.6%	53.6%	68.7%	39.0%	47.7%	69.5%	38.5%	54.2%

### 5.2.3 Componentes de la Escorrentía.

Este periodo de validación registró un caudal medio diario de 0.85m<sup>3</sup>/s, un 40.0% menos que el caudal medio diario del 95, se analizó que las proporciones para



cada una de las componentes de la escorrentía que aportan al caudal del río que fluye por la red hídrica con un caudal medio diario de  $0.85\text{m}^3/\text{s}$ . El mayor aporte al caudal total del río proviene del flujo subterráneo con un caudal medio diario de  $0.58\text{m}^3/\text{s}$  (67.39%), del flujo subsuperficial un caudal medio diario de  $0.25\text{m}^3/\text{s}$  (29.05%) y del flujo superficial un caudal medio diario de  $0.3\text{m}^3/\text{s}$  (3.11%).



Ø **Fig. 45 Representación de las componentes de escorrentía. Año 2000.**

Los tiempos de residencia obtenidos para el periodo de validación fueron: El flujo superficial 2 días, para el flujo subsuperficial 14 días y para el flujo subterráneo presentó un tiempo de residencia de 1136 días. Los tiempos de residencia para este periodo resultaron ser mucho mayores que los encontrados en el periodo de calibración, dado que el suelo en general presenta comportamientos hidráulicos diferentes a distintas condiciones de saturación condiciones de saturación



### 5.2.4 Recarga.

En el periodo de validación el valor de la recarga anual fue de 450.91mm/año, representando el 31.0% de la precipitación anual (1440.18mm/año) y el 70% de la oferta hídrica del periodo, es decir, el 70% de la oferta hídrica anual y el 31.0% de la precipitación anual es aprovechada por la subcuenca y pasa a ser parte del almacenamiento de aguas subterráneas.

El comportamiento de aprovechamiento del 70% de la oferta hídrica anual en la subcuenca del anterior modelamiento se corrobora para el presente periodo, dando así un resultado muy importante en el presente estudio, donde se puede dar una primera aproximación de la capacidad que tiene esta subcuenca para aprovechar el agua que se encuentra disponible en la superficie para interactuar con el suelo y el acuífero. Esta hipótesis se puede ver reflejada en el caudal base del río, el cual se mantiene aproximadamente uniforme gracias al aporte del flujo subterráneo en la transferencia de escorrentía.

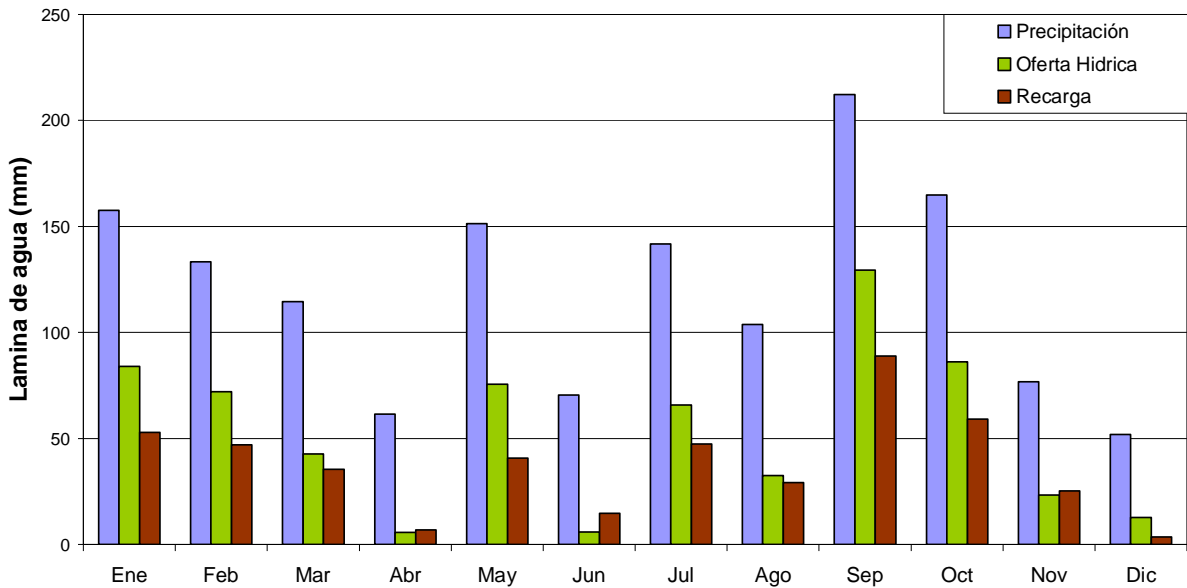
En la Tabla 23 y la figura 46 se comparan los valores mensuales de recarga con la oferta hídrica y los eventos de lluvia para este periodo.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agost	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>Recarga med mensual</b>	52.77	47.01	35.50	6.89	40.80	14.65	47.45	29.12	88.82	59.06	25.32	3.52	450.91
<b>Pmed mensual</b>	157.51	133.24	114.49	61.42	151.41	70.56	141.77	103.82	212.30	164.90	76.81	51.96	1440.18
<b>O-H</b>	84.07	72.09	42.64	5.61	75.61	5.93	65.71	32.53	129.42	86.19	23.39	12.75	635.95
<b>%(R/P)</b>	33.5%	35.3%	31.0%	11.2%	26.9%	20.8%	33.5%	28.1%	41.8%	35.8%	33.0%	6.8%	31.3%

O-H Oferta Hídrica.

Ø **Tabla 23. Valores de Recarga media mensual Oferta Hídrica y su porcentaje respecto a la Precipitación media mensual (mm). Año 2000.**





Ø **Fig.46 Recarga, Oferta Hídrica y Precipitación media mensual. Año 2000.**

El valor de la recarga anual de 450.91mm/año para este periodo de precipitación baja, es coherente con el calculado por Garzón y Niño (2003), quienes calcularon un valor de 495.0mm de lamina de agua por el método de curvas de recesión en la estación Limnimétrica La Esperanza para años pertenecientes a periodos secos. Para este periodo se comprueba lo dicho en ese estudio, donde se afirma que la subcuenca almacena un gran porcentaje de aguas subterráneas.

También se observa de nuevo que la recarga mensual es mayor para los meses que presentan mayor intensidad de precipitación, menor en los de poca precipitación mensual.



**5.3 APOORTE DE LA SUBCUENCA DE RIO FRIO A LA RECARGA TOTAL MENSUAL Y ANUAL DE LA CUENCA DE RIO DE ORO PARA EL PERIODO ENTRE 1987-1991.**

Como se mencionó en el capítulo 4, se hizo el modelamiento para el periodo de tiempo comprendido entre los años 1987-1991, con el fin de comparar los resultados obtenidos en el estudio hecho por Isaza (2004) para la cuenca de Río de Oro. Los resultados de recarga media mensual multianual y recarga media multianual para ese periodo obtenidos en el presente estudio y los resultados del estudio de la Cuenca de Río de Oro son presentados en la Tabla 24.

Area1=46.32Km2 Area2=581.92Km2	Mensual												Media Multianual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Recarga R-Frio	20.21	23.82	40.90	43.76	63.57	36.30	47.48	41.23	75.44	59.95	51.17	20.58	524.41
Recarga R-Oro	4.09	4.65	10.98	12.61	12.79	11.13	11.56	12.29	12.47	14.90	10.70	6.20	124.37
% [R-Frio*Area1]/ [R-Oro*Area2]	39.3%	40.8%	29.6%	27.6%	39.6%	26.0%	32.7%	26.7%	48.2%	32.0%	38.1%	26.4%	33.6%

**∅ Tabla 24. Aporte de la recarga mensual y anual de la Subcuenca de Río Frío Parte Alta a la Cuenca de Río de Oro [mm].**

La subcuenca de Río Frío Parte Alta hace parte del grupo de microcuencas que conforman La Cuenca del Río de Oro (capítulo 1), ocupando un 8.0% del área total de esta última. Esta relación se toma en cuenta para cuantificar el aporte volumétrico real de la Subcuenca al volumen total de la recarga de la Cuenca de Río de Oro mensual y anualmente.

La Subcuenca aporta aproximadamente la tercera parte de la recarga anual de la Cuenca de Río de Oro, ocupando tan solo el 8.0% del área total de esta última, hecho que refleja la gran infiltración y percolación de la Subcuenca, comprobando



y validando la hipótesis de que en esta zona se encuentra la principal fuente de recarga de las reservas subterráneas de la cuenca de Río de Oro.

De igual forma el aporte mensual varía entre el 26.0% y el 48.0% de la recarga total mensual para Río de Oro, variación que depende de la precipitación media mensual presentada.



## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Se aplicó el Modelo SHIA distribuido a la subcuenca del Río Frío a partir de la información hidrológica como datos de precipitación y caudales con el fin de obtener valores de recarga a acuíferos. La calibración se realiza para el año 1995, debido a que este contaba con información representativa y se logró un coeficiente de Nash de 0.56. Se realizaron otros modelamientos para validación del modelo y el coeficiente de Nash varió entre 0.3 y 0.45. Los valores bajos del coeficiente se debe a la regular calidad de datos de caudales, Sin embargo, se consideran que el modelo permite obtener valores representativos o relativos de recarga.
- La recarga de la subcuenca de Río Frío, parte alta, para los distintos periodos de modelamiento se encuentra entre el 31 y 40% de la precipitación Anual distribuida de la subcuenca. La subcuenca de Río Frío aporta el 34% del volumen total de la recarga de la cuenca de Río de Oro, siendo su área de apenas el 8% de la anterior.
- Las rocas que conforman la subcuenca, Cuarzomonzonita y Gneiss en un 50% cada una, presentan condiciones de altamente meteorizado a altamente fracturado, generadas por las falla de Río Frío y la falla de Bucaramanga entre otras, que pueden generar alta permeabilidad secundaria que ayuda a la infiltración y al flujo subterráneo. Además, las condiciones de almacenamiento



de humedad y zonas de alta precipitación hacen que esta subcuenca presenten condiciones de recarga alta evaluada cuantitativamente en este trabajo.

- El valor estimado de la recarga mensual fluctuó entre 0.10mm en enero y 123.81mm en octubre de lamina de agua. Estas grandes diferencias se deben al comportamiento bimodal de la precipitación que comprende periodos muy secos y periodos muy lluviosos en un mismo año de análisis, ocasionando una alta disminución en el escurrimiento por excedencia capilar en periodos secos y cambiando para periodos lluviosos.
- El total del caudal de la red hídrica proviene la producción de esorrentía de la subcuenca, de las que el mayor aporte lo hace el flujo subterráneo con un 67.39% del caudal total del río. Este valor refleja el almacenamiento y los altos niveles del flujo subterráneo, que no permite que el río reduzca su cauce. El flujo subsuperficial aporta un porcentaje de 29.05% del caudal medio diario y del flujo superficial un porcentaje del caudal medio diario de 3.11% para el periodo de validación, comportándose de forma muy similar para el periodo lluvioso.
- El valor de la recarga anual para el periodo de calibración fue de 707.95mm/año, representando el 70% de la oferta hídrica anual y el 40.0% de la precipitación anual del periodo (1751.30mm/año), es decir, el 40.0% de la precipitación anual pasa a ser parte del almacenamiento de aguas subterráneas. Este valor de recarga es el valor esperado de recarga de la zona, debido a que la precipitación en este periodo es similar a la precipitación media multianual y los valores de oferta hídrica y evapotranspiración se comportan de igual forma.



## 6.2 RECOMENDACIONES

- La parte alta de de la subcuenca de Río Frío es la zona que genera el mayor aporte de la recarga a la cuenca del Río de Oro manteniendo los volúmenes almacenados de agua, por lo que es importante hacer de esta zona una reserva natural.
- Una de las principales falencias de los proyectos hidrológicos es la deficiencia en la calidad de los datos. Se recomienda hacer especial énfasis en la creación de una cultura alrededor de este problema, que permita mejorar en eventuales estudios la calidad de los resultados, promoviendo la capacitación del personal técnico a cargo de las estaciones.
- El coeficiente de Nash es muy sensible cuando se correlacionan series cortas de tiempo, obteniéndose así mejores ajustes en la calibración. Por tal motivo se recomienda calibrar con serie de tiempo cortas que presenten un régimen similar.



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

**ARENAS J. y RUIZ J., 2005.** Estudio de la variación del régimen de lluvias de la Cuenca Superior del Río Lebrija. . Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.

**CHU, M., 2003.** Assessment of the long – term rainfall relation of the Geul catchment, IHE, DELFT.

**CHU, M., y GUZMÁN J., 2002.** Spell – stat v. 1.6.1.00, Time series analysis, Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

**CORPORACION AUTONOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA, CDMB. 2003.** Plan de Ordenamiento Territorial y Ambiental de la cuenca del río de Oro. Bucaramanga.

**FELICÍSIMO, A.M., 1994.** Modelos Digitales del Terreno-Introducción y aplicaciones en las Ciencias Ambientales. [Online] Asturias(España), , p.12-90. Disponible en Internet <URL: <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/> >.

**GARCÍA S. y OTERO J., 2005.** Estimación de la evapotranspiración real en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.



**GARZÓN, L., y NIÑO, E., 2003.** Estudio de curvas de recesión en la cuenca superior del río Lebrija. Tesis de grado. Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.

**ISAZA, O.M., 2004.** Estimación de la recarga mensual en la cuenca del río de oro por medio de un modelo hidrológico distribuido. Tesis de Grado. Grupo de predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.

**MARADEI, Z. y ROJAS, J., 2002** Distribución espacial de las variables hidrológicas en la cuenca superior del río Lebrija utilizando geoestadística. Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.

**MENDOZA, C.A., Y SANDOVAL, R., 2002.** Un estudio de oferta hídrica en la cuenca superior del río Lebrija, Tesis de grado. Grupo de predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

**VÉLEZ, J.I., 2001.** Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.



# ANEXOS



**ANEXO 01. ARCHIVO DE PARÁMETROS DE MODELACIÓN**  
**( arpar.txt )**

```

vh(l)   vks(l)   vkp(l) } Adimensionales (>0)
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1
      1       1       1

r(l)   ir(l)
      100      2 } Capacidad de almacenamiento capilar
      3.2      2 } Evapotranspiración potencial
      15       2 } Infiltración
      1        1 } Escorrentía superficial (1/tiempo de residencia)
      5        2 } Percolación
      0.2      1 } Flujo subsuperficial (1/tiempo de residencia)
      0.0      2 } Pérdidas subterráneas
      0.0125 1 } Flujo base (1/tiempo de residencia)
      1        1 } Flujo en canales

      d(l)   e(l)
      1     .6000 .7500
      2     1.0000 .1670
      3     3.2600 .5000 Coeficientes y exponentes clásicos en las
      4     1.0000 .2000 ecuaciones de geometría hidráulica
      5     20.0000 1.0000
      6     .0417 .1670

naf
      1 } N° de aforos

ceaf(l) cnaf(l)
      289 87 } Columna y fila del sitio de aforos

deficit acuifi acuifi2 } Condiciones iniciales.
50.0 0.25 125.00 deficit: lo que falta para completar el
                        almacenamiento capilar máximo
                        acuifi: cantidad de agua acumulada en la parte superior del suelo
                        acuifi2: cantidad de agua acumulada en la parte inferior del suelo

```



