

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MENSUAL EN LA
CUENCA DEL RÍO DE ORO POR MEDIO DE UN
MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO

OSCAR MAURICIO ISAZA MEJIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS.
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2004

ESTUDIO DE ESTIMACIÓN DE LA RECARGA
MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO DE ORO POR
MEDIO DE UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO

OSCAR MAURICIO ISAZA MEJIA

Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil.

DIRIGIDO POR:

ING. SULLY GOMEZ ISIDRO

Ing. Civil, M.Sc., Ph.D.

ING. JORGE A. GUZMAN

Ing. Civil, M.Sc.

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

2004

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	xi
1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	1
1.1. LOCALIZACIÓN.....	1
1.2. ASPECTOS GENERALES DE LA CUENCA.....	3
1.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	5
1.3.1 GEOLOGÍA.....	5
1.3.2. GEOMORFOLOGÍA	9
1.4. PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	11
2. REPRESENTACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS	14
2.1. GENERALIDADES.....	14
2.2. MODELO SHIA.....	16
2.2.1. ALMACENAMIENTO CAPILAR EN EL SUELO.....	19
2.2.2. ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL.....	22
2.2.3. ALMACENAMIENTO SUBSUPERFICIAL.....	23

2.2.4.	ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO.....	26
3.	PARAMETRIZACION Y ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO.....	28
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	28
3.2.	REPRESENTACIÓN TOPOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	29
3.2.1.	MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ANALIZADOS.....	30
3.2.2.	ESTIMACIÓN DE ERROR Y ELECCIÓN DEL M.D.E.....	33
3.2.3.	INFORMACIÓN GENERADA.....	35
3.3.	INFORMACIÓN DEL SUELO Y SU COBERTURA.....	38
3.3.1.	MAPA DIGITAL DEL TERRENO.....	39
3.4.	INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y CLIMATOLOGÍA.....	46
3.4.1.	LA PRECIPITACIÓN.....	46
3.4.2.	ESCORRENTÍA.....	49
3.4.3.	EFFECTO DEL C.A.M.B. DE BUCARAMANGA.....	50
3.4.4.	EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL.....	53
4.	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	55
4.1	INTRODUCCIÓN.....	55
4.2	PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN.....	56
4.3	PUNTO DE CONTROL DEL MODELO.....	58
4.4	CONTROLES DE LA CALIBRACIÓN.....	62
5.	RESULTADOS.....	65
5.1	INTRODUCCIÓN.....	65
5.2	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO ENCONTRADAS.....	65
5.3	COMPONENTES DE LA ESCORRENTÍA.....	70
5.4	EVAPOTRANPIRACIÓN REAL.....	72
5.5	LA RECARGA.....	74

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
6.1	CONCLUSIONES.....	77
6.2	RECOMENDACIONES.....	78
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca del Río de Oro. Localización General.....	1
Figura 2. Cuenca del Río de Oro. División en Subcuencas.....	2
Figura 3. Cuenca del Río de Oro. Modelo Digital de Elevación.....	4
Figura 4. Cuenca del Río de Oro. Mapa Geológico Simplificado.....	6
Figura 5. Cuenca del Río de Oro. Sistema de Falla Bucaramanga - Santa Marta....	9
Figura 6. Distribución especial de la precipitación media en la cuenca.....	12
Figura 7. Precipitación media multianual en la cuenca del río de Oro.....	13
Figura 8. Esquema de la conexión de la celda (i,j).....	17
Figura 9. Esquema del almacenamiento capilar.....	19
Figura 10. Esquema del almacenamiento superficial.....	21
Figura 11. Esquema del almacenamiento Subsuperficial.....	24
Figura 12. Esquema del almacenamiento subterráneo.....	26
Figura 13. Semivariogramas generados por el Kriging 1 y 2.....	32
Figura 14. Cuenca del Río de Oro. Modelo Digital de Elevación.....	36
Figura 15. Cuenca del Río de Oro. Mapa de pendientes.....	37
Figura 16. Cuenca del Río de Oro. Mapa de celdas acumuladas.....	37
Figura 17. Cuenca del Río de Oro. Proyección 3D del MDE.....	38
Figura 18. Cuenca del Río de Oro. Mapa de usos del suelo simplificado.....	41
Figura 19. Cuenca del Río de Oro. Mapa de macro zonas de con almacenamiento capilar similar.....	41

Figura 20. Cuenca del Río de Oro. Mapa de macro zonas de con condiciones hidráulicas similares en la capa superior del suelo.....	43
Figura 21. Cuenca del Río de Oro. Mapa geológico simplificado.....	44
Figura 22. Cuenca del Río de Oro. Mapa geomorfológico simplificado.....	44
Figura 23. Cuenca del Río de Oro. Mapa de macro zonas de con condiciones hidráulicas similares en la capa inferior del suelo.....	46
Figura 24. Cuenca del Río de Oro. Localización de las estaciones de registro.....	49
Figura 25. Hidrograma de la estación Puente Nariño el periodo de calibración del modelo.....	50
Figura 26. Punto de captación de CAMB.....	52
Figura 27. Hidrograma utilizado en la calibración del modelo.....	52
Figura 28. Variación de los valores de ETP contra el error medio cuadrático.....	57
Figura 29. Variación de los valores de conductividad hidráulica en la capa superior del suelo contra el error medio cuadrático.....	57
Figura 30. Correlograma de los caudales diarios de 1987 en la estación Puente Nariño.....	59
Figura 31. Correlograma de los niveles diarios de 2001 y 2002 en la estación Puente Nariño.....	60
Figura 32. Correlograma caudales diarios de 1987 en la estación Café Madrid.....	61
Figura 33. Hidrograma de respuesta de la cuenca del río de Oro para el periodo de simulación.....	64
Figura 34. Curva de duración entre los caudales simulados y los caudales observados.....	64
Figura 35. Esquema del modelo de tanques.....	67
Figura 36. Valores de almacenamiento capilar del suelo (mm), en la cuenca del río de Oro.....	67

Figura 37. Valores de conductividad hidráulica de la capa superior del suelo (mm/día), en la cuenca del río de Oro.....	68
Figura 38. Valores de conductividad hidráulica de la capa inferior del suelo (mm/día), en la cuenca del río de Oro.....	69
Figura 39. Aporte de las diferentes componentes de la escorrentía al caudal total simulado.....	71
Figura 40. Aporte (m ³ /s) de las diferentes componentes de la escorrentía al caudal total simulado.....	71
Figura 41. Aporte (%) de las diferentes componentes de la escorrentía.....	72
Figura 42. Precipitación y ETR media mensual en la cuenca del río de Oro.....	73
Figura 43. Variación de la ETR media mensual para el periodo de estudio.....	73
Figura 44. Variación de la recarga media mensual multianual en la cuenca del río de Oro para el periodo de estudio.....	75
Figura 45. Variación de la recarga media mensual en la cuenca del río de Oro para el periodo de estudio.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro resumen de las características morfométricas de la cuenca utilizando HydroSig-Java.....	4
Tabla 2 Leyenda mapa geológico.....	7
Tabla 3 Valores del error medio cuadrático para los diferentes MDE analizados.....	34
Tabla 4 Número de sumideros generados por cada uno de los métodos de interpolación analizados.....	35
Tabla 5 Clasificación de los diferentes usos del suelo en la cuenca del río de Oro.....	42
Tabla 6 División de la zona de estudio en macro zonas de similar comportamiento hidráulico en la capa superior del suelo.....	42
Tabla 7 División de la zona de estudio en macro zonas de similar comportamiento hidráulico en la capa inferior del suelo.....	43
Tabla 8 Leyenda mapas geológico y geomorfológico de la cuenca del río de Oro.....	45
Tabla 9 Estaciones hidrológicas monitoreadas por la C.D.M.B.....	47
Tabla 10 Estaciones hidrológicas monitoreadas por la IDEAM.....	47
Tabla 11 Datos faltantes por estación utilizada.....	48
Tabla 12 Sistema actual de abastecimiento del CAMB.....	51
Tabla 13 Información general de las estaciones utilizadas para el calculo de la ETP.....	54
Tabla 14 Datos de lecturas de mira diarios, faltantes en la estación Puente Nariño para el periodo de estudio.....	58
Tabla 15 Valores característicos del suelo obtenidos en el estudio.....	69
Tabla 16 ETR media mensual multianual (mm) en la cuenca del río de Oro para el periodo de estudio.....	76
Tabla 17 Recarga media mensual (mm) en la cuenca del río de Oro para el periodo de estudio.....	76

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar debo agradecer a los Ingenieros Sully Gómez y Jorge Guzmán, directores de éste trabajo por su acertada orientación y dedicación durante el desarrollo de éste estudio.

Al Grupo de Investigación en Predicción y Modelamiento Hidroclimatico (GPH), por su invaluable apoyo logístico y en especial al ingeniero Ángel Anaya por su valiosa asesoría técnica durante el desarrollo del presente trabajo.

Al Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; especialmente al Ingeniero Jaime Ignacio Vélez y a la Geóloga Marcela Jaramillo por su orientación y apoyo.

A mis Padres y Familiares por su apoyo en la realización de éste proyecto.

A los docentes, compañeros de la Escuela de Ingeniería Civil y en general a todos los que de una u otra forma colaboraron en la construcción de este trabajo.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO DE ORO POR MEDIO DE UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO. *

AUTOR: ISAZA MEJIA OSCAR MAURICIO **.

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 cuenca del río de Oro la cual hace parte de la cuenca superior del río Lebrija. La cuenca del Río de Oro tiene un área aproximada de 580 km² abarcando zona rural y una extensa zona urbana (el área metropolitana de Bucaramanga). 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 10 % de la precipitación media multianual y los mayores valores se encuentran al final de los periodos húmedos en la cuenca. 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.)

ABSTRACT

TITLE: MONTHLY RECHARGE ESTIMATION IN RIO DE ORO BASIN USING A CONCEPTUAL DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL. *

AUTHOR: ISAZA MEJIA OSCAR MAURICIO * * .

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 Rio de Oro basin which is part of the upper Lebrija basin. The Rio de Oro basin has an approximate area of 580 km² covering both rural and urban (Bucaramanga) zones. 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 season per year) just like the precipitation in the catchment. The magnitude of the recharge was estimated to be 10% 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

Para el manejo adecuado del recurso agua, en lo que tiene que ver con su explotación y protección, es necesario contar con ciertas herramientas que sirvan de orientación en la toma de decisiones. Un elemento importante para tal objetivo es el estudio de los procesos hidrológicos que se desarrollan en la cuenca.

Al considerar el agua subterránea como una fuente de abastecimiento para los acueductos, es necesario conocer la forma como se comporta este recurso con el fin de estimar los caudales máximos que se pueden explotar (la recarga del acuífero) sin deteriorar los acuíferos. En este proyecto se pretende estudiar la forma como se desarrollan los procesos hidrogeológicos a partir de la interacción de las diferentes variables hidrológicas como la precipitación, la evapotranspiración y las diferentes componentes de la escorrentía, para estimar valores de recarga de acuíferos.

Para entender esto, se empleó el método denominado SHIA (Simulación Hidrológica Abierta) que corresponde a un modelo hidrológico conceptual distribuido donde la cuenca se divide en celdas cuadradas y los procesos determinantes de la producción y transferencia de escorrentía se representan por un sistema de cinco tanques o elementos de almacenamiento conectados entre sí y con los de otras celdas.

El modelo se aplicó en la cuenca del río de Oro, ubicada al oriente del departamento de Santander, la cual hace parte de la cuenca superior del río Lebrija. Para el estudio se utilizaron los registros de precipitación de 12 estaciones hidrológicas ubicadas en el área de la cuenca y se calibró con caudales medidos en la estación Puente Nariño en la parte baja de la cuenca.

Este modelo distribuido presenta una gran ventaja sobre el agregado al permitir simular la producción y transferencia de la escorrentía bien sea de una forma lineal

o no lineal. En el caso particular que se presenta en este trabajo, no se contaba con información suficiente por lo que no fue posible implementar las no lineales. Este paso importante se deja como inquietud para trabajos futuros.

A continuación se presenta la estructura general de este trabajo que fue realizado:

En el capítulo uno se realiza una descripción del área de estudio, considerando las diferentes características tanto morfológicas, geológica, y climatológicas, que fueron necesarias para estructurar el modelo hidrológico de la cuenca.

En el capítulo dos se describe el marco conceptual del modelo distribuido utilizado en el estudio, donde se describe cada una de las variables que intervienen y las diferentes relaciones funcionales que se utilizan para la simulación de la producción de escorrentía.

En el capítulo tres se realiza una descripción del manejo que se le debe dar a la información primaria, con el fin de estructurar y parametrizar el modelo hidrológico de la cuenca. Además de las consideraciones y simplificaciones que se hicieron.

En el capítulo cuatro se describe como se realizó el proceso calibración del modelo, teniendo en cuenta el comportamiento del río de Oro, para el periodo de estudio.

En el capítulo cinco se presenta el análisis de resultados, los cuales se dividieron en características del suelo, componentes de la escorrentía y por último los resultados hidrológicos donde se analizó el comportamiento de la Evapotranspiración real y la Recarga en la zona.

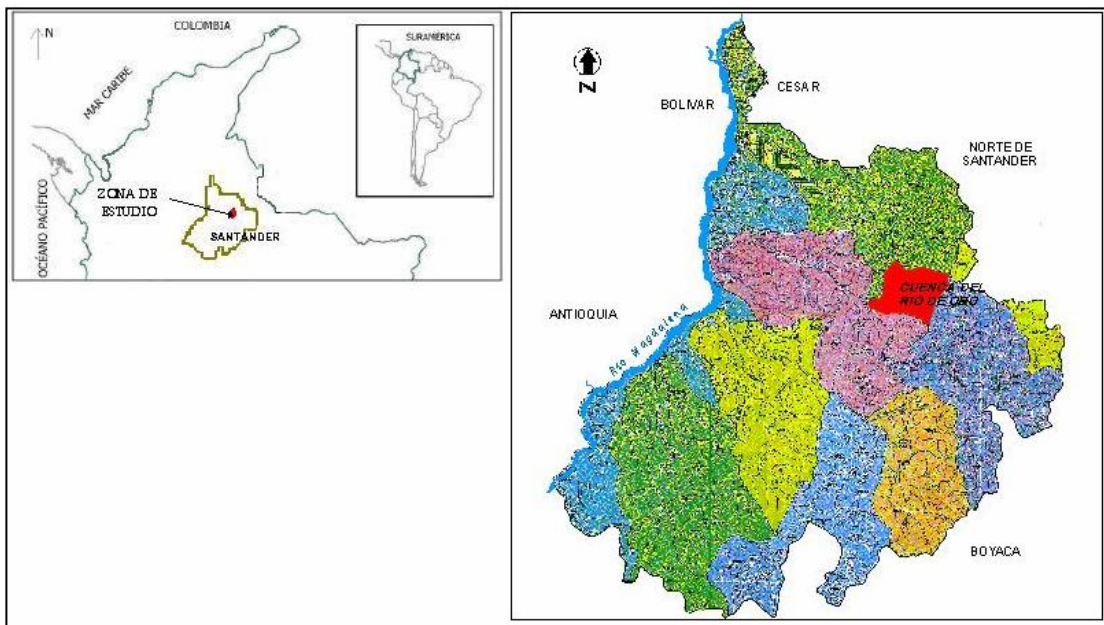
Finalmente, en el capítulo seis se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.2 LOCALIZACIÓN

La cuenca del Río de Oro pertenece al sistema de subcuencas que conforman la Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.), la cual se encuentra ubicada en la parte Nororiental del departamento de Santander. Las coordenadas que limitan la subcuenca son: 1°095.000 a 1°125.000 Este y 1°255.500 a 1°284.000 Norte, con origen en Bogotá (Figura 1); posee alturas sobre el nivel del mar que van desde los 3600 msnm en el Alto El Picacho, hasta los 600 msnm en el sector de Café Madrid en la desembocadura del Río de Oro al Río Suratá.

Figura 1 Cuenca del Río de Oro. Localización General.

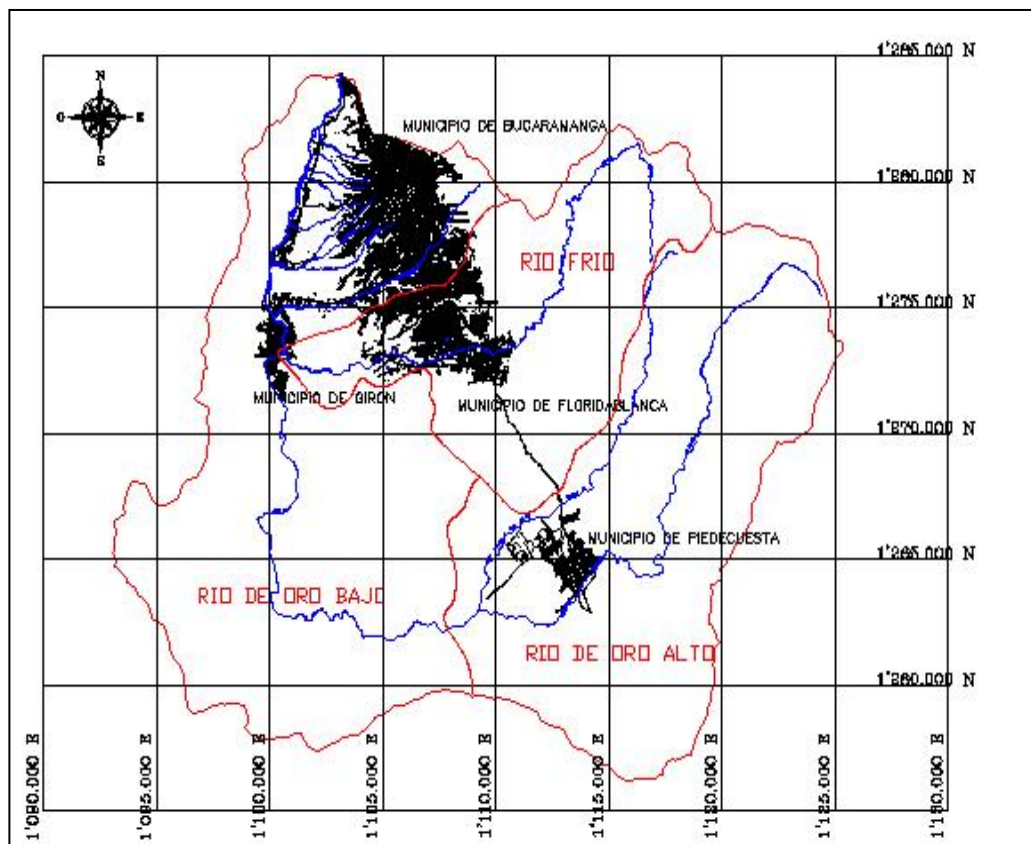


Fuente: Atlas Ambiental de Santander.

La Subcuenca del Río de Oro, limita al Norte con la Subcuenca del Río Suratá y la Microcuenca del Río Tona afluente del anterior, al oriente con las microcuencas de los ríos Jordán (Cuenca del Río Arauca) y Manco (Subcuenca del Río Chicamocha); al Suroccidente con la Subcuenca del Río Sogamoso y al Occidente con la Microcuenca de la Quebrada la Angula (C.D.M.B.,2003).

La cuenca del Río de Oro cuenta con un área aproximada de 581.92 Km² (cerca del 46% del área C.S.R.L); en ella se ubican las cabeceras de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón; la cuenca puede dividirse en el sistema de Subcuencas de Río de Oro bajo, Río de Oro alto y Río Frío (Ver figura 2).

Figura 2 Cuenca del Río de Oro. División por subcuencas.



Cada uno de los sistemas de subcuencas mencionados anteriormente se dividen a su vez en los siguientes sistemas de microcuencas :

Río Frío: Compuesta por las microcuencas Aranzoque (3550 Has), Frío Alto (5352 Has), Frío Bajo (1926 Has) y Zapamanga (1396 Has).

Río de Oro Alto: Compuesta por las microcuencas Oro Alto Alto (3975 Has), Oro Alto Medio (2819 Has), Oro Alto Bajo (3977 Has), Pilas (4967 Has), Rasgón (1449 Has) y Río Lato (5677 Has).

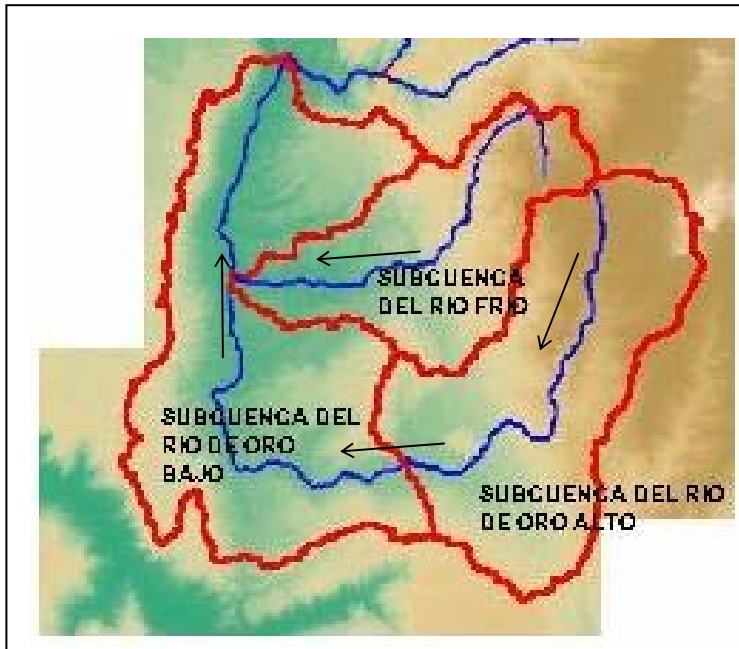
Río de Oro Bajo: Compuesta por las microcuencas Grande (1910 Has), Oro Bajo Alto (6861 Has), Oro Bajo Medio (6948 Has), Oro Bajo Bajo (2571 Has), Palmar (2325 Has) y Ruitoque (2490 Has).

1.3 ASPECTOS GENERALES DE LA CUENCA

El río de Oro nace a una altura de 3500 msnm con aportes de cauces conocidos como La Máquina, Cola de pato y La Lejía entre otros. Sobresale como punto de referencia (divisoria de aguas) el sitio conocido como El Picacho, localizado en el kilómetro 50 de la vía Bucaramanga – Pamplona (C.D.M.B.,2003). El Río de Oro corre inicialmente al sur, gira en herradura cambiando su dirección al norte, recibe las aguas del río Frío y se une con el río Suratá para formar el río Lebrija.

Los parámetros morfométricos de la cuenca fueron calculados por medio del programa HidroSig-Java, utilizando un modelo digital del terreno con celdas de 65m x 65m, por Maradei y Rojas (2002), ver figura 3. Los parámetros morfométrico se presentan en la tabla 1.

Figura 3. Cuenca del río de Oro, modelo digital de elevación realizado en el HidroSig-Java.



Fuente: (Maradei y Rojas,2002)

Tabla 1 Cuadro resumen de las características morfométricas usando HidroSIG Java para el MDT con resolución de 65m.

SUBCUENCA	A(Km ²)	Ff	Kc	Ma (m)	Pm (%)	ORDEN	Rb	RI	Ds (Km/Km ²)
R. Oro bajo	572.21	0.138	1.792	588	31.58	6	4.45	2.28	1.68
R. Oro Alto	195.21	0.236	1.710	1197	41.55	5	4.34	2.15	1.56
R. Frío	127.17	0.145	1.067	703	36.40	5	4.04	2.04	1.67

Fuente: (Maradei y Rojas,2002)

Nota: A = Área drenaje, Ff = Factor de forma, Kc = Coeficiente de compacidad Ma = Mediana de altitud, Pm = Pendiente media, Orden de Horton, Rb = Relación de confluencia, RI = Relación de longitud, Ds = Densidad de drenaje.

1.4 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

1.4.1 Geología. Desde el punto de vista geológico la cuenca del río de oro se puede dividir en dos zonas bien definidas, la zona oriental de alta montaña que presenta formaciones de origen ígneometamórfico, las cuales hacen parte del macizo de Santander.

Por otra parte se encuentra la zona occidental un hundimiento respecto a la anterior, la cual presenta rocas sedimentarias y depósitos cuaternarios formaciones de origen aluvial, los cuales corresponden a depósitos cuaternarios y rocas sedimentarias. Separando estas dos zonas se encuentra localizado el sistema de fallas denominado Bucaramanga – Santa Marta, el cual juega un papel determinante en la tectónica de la región.

- **Litología.** Al realizar una inspección de la cuenca se pueden encontrar tres tipos de agrupaciones litológicas las cuales se describen a continuación:

Rocas Ígneas Metamórficas Alteradas. Se localizan en la parte oriental de la falla Bucaramanga – Santa Marta, exactamente en la zona conocida como Macizo de Santander. En la parte nororiental de la cuenca se encuentra el Neis de Bucaramanga, adyacente a la zona de falla, a continuación del cual emergen a las rocas ígneas (Cuarzomonzonita), las cuales conforman una franja con dirección Norte – Sur.

En la parte Suroriental de la cuenca se pueden encontrar mantos meteorizados de hasta 10 mts de profundidad, donde la roca es blanda y friable, además se pueden encontrar zonas con altas permeabilidades (Garzón y Niño,2003).

Areniscas, Lutitas Y Calizas. Se localizan en la parte occidental de la falla Bucaramanga – Santa Marta, se encuentra el afloramiento de la formación Tambor en el tope de la mesa de Ruitoque. En las estribaciones de las mesas de Lebrija,

Ruitoque y los Santos se puede observar la presencia de la formación Girón y la formación Jordán rodeadas por depósitos cuaternarios.

En la parte nororiental de la cuenca (macizo de Santander) se pueden encontrar rocas de éste tipo, aunque de muy poca extensión, siendo las de la formación Rosablanca (Calizas), la mas grande y representativa.

Depósitos cuaternarios. Se localizan en la zona central de la cuenca, junto la zona de la falla de Bucaramanga, también se les encuentra en el fondo del valle de las corrientes del río Frío y el río de Oro; además de encontrarse también en la terraza de Bucaramanga.

Figura 4. Cuenca del río de Oro. Mapa geológico simplificado.

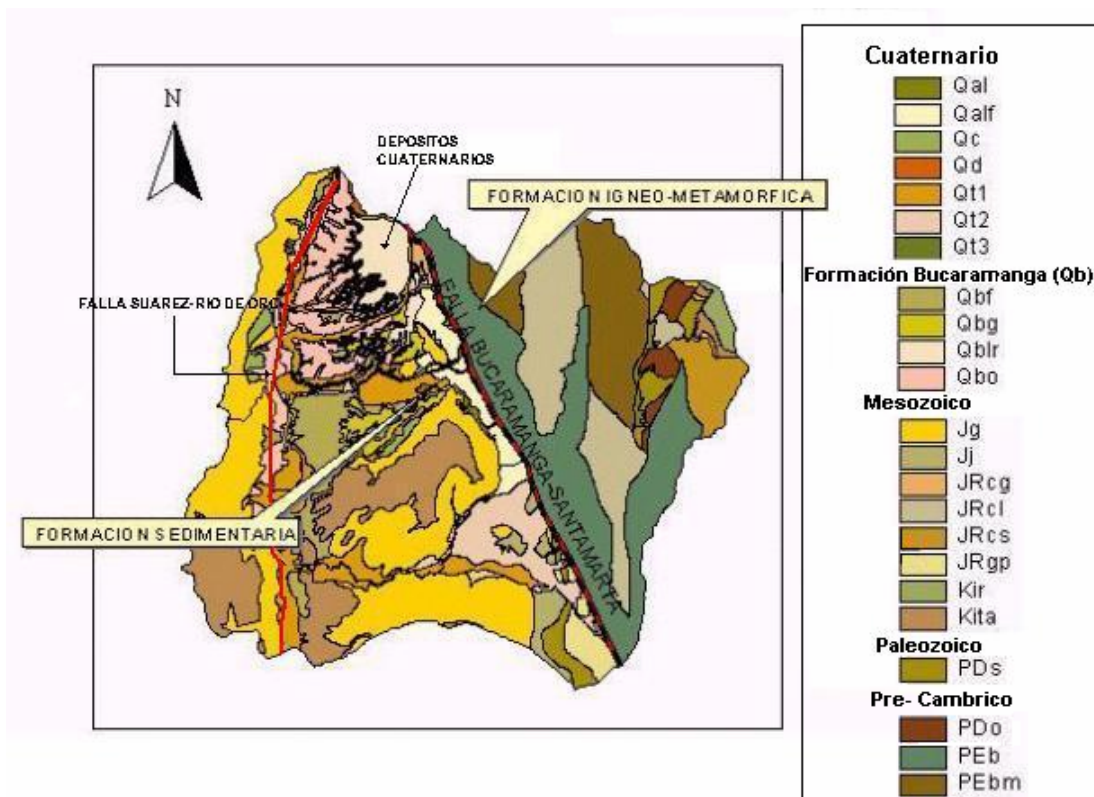


Tabla 2. Leyenda del mapa Geológico.

CUATERNARIO	
Qal	Aluvial reciente
Qalf	Aluvial reciente flujo
Qc	Coluvión
Qd	Deslizamientos
Qt1	Terraza baja
Qt2	Terraza media
Qt3	Terraza alta
FORMACIÓN BUCARAMANGA (QB)	
Qblr	Miembro Limos Rojos
Qbg	Miembro gravoso
Qbf	Miembro finos
Qbo	Miembro órganos
MESOZOICO	
Jg	Formación Girón
Jj	Formación jordán
JRcg	Cuarzomonzonita granito
JRcl	Cuarzomonzonita de la corcova
JRcs	Cuarzomonzonita de santa bárbara
JRgp	Granito pescadero
Kir	Formación Rosablanca
Kita	Formación tambor
PALEOZOICO	
PDs	Formación Silgara
PRE-CAMBRICO	
PDo	Ortoneis
PEb	Neis de Bucaramanga
PEbm	Neis de Bucaramanga

Fuente: (C.D.M.B. 2003)

Alrededor del cauce del río de Oro y cerca de la vereda Chocoa se pueden encontrar depósitos con profundidades que varían entre los 15 y los 25 mts. Estos depósitos se consideran una prolongación de los depósitos de Bucaramanga en especial los de la parte alta (Rincón C. y Rondón E., 1992, citado por Garzón y Niño, 2003).

- **Geología Estructural**

Sistema De Fallas Bucaramanga – Santa Marta. Atraviesa el área de estudio diagonalmente, cuenta con una longitud aproximada de 600 Km desde el extremo sur del Macizo de Santander hasta la costa caribe, al oeste de la ciudad de Santa Marta. El sistema de fallas es producto del ambiente tectónico compresivo regional, resultado del choque entre las placas del Caribe y Suramericana, movimiento que genera desplazamientos rumbo deslizantes en el Noroeste de Suramérica (Beltrán y Rey, 2002).

El sistema de fallas lo componen una falla principal la cual tiene la dirección Bucaramanga – Santa Marta (de ahí su nombre), la cual separa al Este el macizo de Santander y al Oeste la zona de Abanicos. Alrededor de ésta se presentan fallas paralelas que presentan la misma dirección de la principal pero su longitud es mucho menor. Entre las fallas paralelas se pueden mencionar La Cumbre, Villabel y Miramanga.

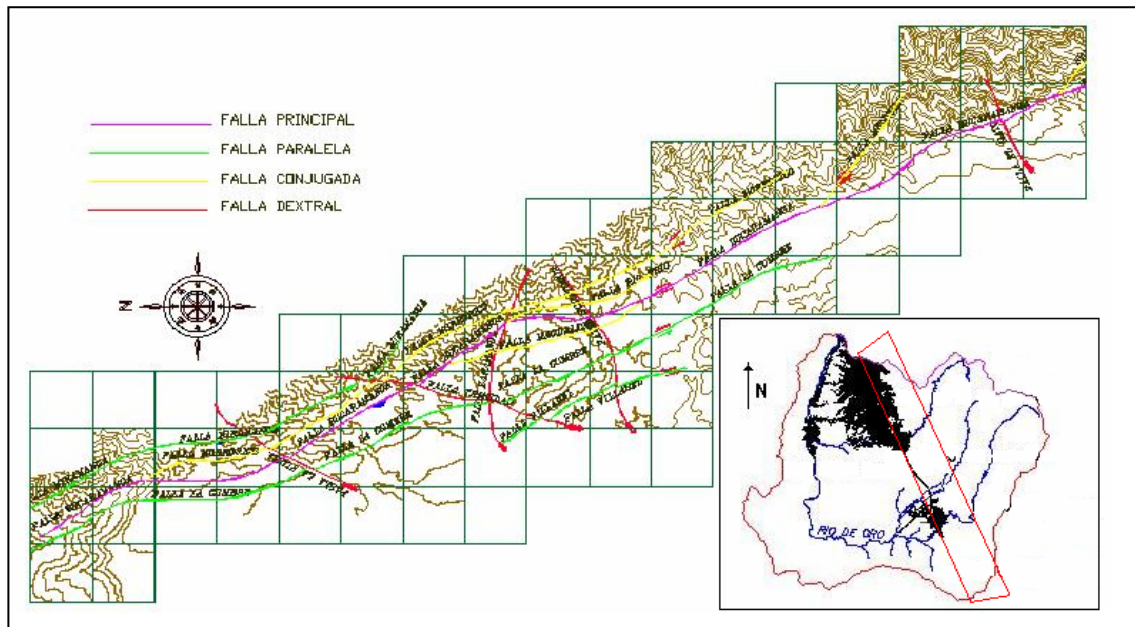
Por otra parte en el sistema también se presentan fallas conjugadas las cuales inician paralelas a la falla principal y luego se unen a ésta. Entre las fallas conjugadas se pueden mencionar Morrórico, El Carmen, Magdalena, Mensuly y las Cruces. Por último se presentan fallas Dextrales las cuales atraviesan transversalmente las fallas paralelas y la falla principal. La Flora, Trinidad, Zapamanga y el Hato son fallas dextrales (Beltrán y Rey, 2002).

Sistema de fallas Suárez – río de Oro. Este sistema de fallas se encuentra ubicado en la parte occidental de la cuenca, separando los afloramientos de la formación Girón de los depósitos cuaternarios de la zona central de la cuenca.

La falla del Suárez, es una falla de cabalgamiento de orientación N - NW al sur y N - NE al norte; con plano que buza al SW y NW respectivamente con ángulos entre 45 y 70 grados; su trazado principal afecta la formación Girón. La falla del río de Oro es paralela a la del Suárez y marca el contacto entre la formación Girón y las unidades cuaternarias; es una falla inversa y de rumbo de movimiento lateral derecho.

Complementando el sistema de fallas se encuentra el lineamiento Chimita – Café, el cual es paralelo a las fallas Suárez – río de Oro. En la parte sur de la cuenca se localiza la falla El Carrizal, la cual es una falla transversal con orientación E-W, cuyo movimiento es lateral derecho con levantamiento del bloque norte.

Figura 5. Cuenca del río de Oro. Sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta.



Fuente: (Beltrán y Rey, 2002).

1.4.2 Geomorfología. En la zona se pueden identificar tres unidades geomorfológicas, las cuales se encuentran fuertemente influenciadas por la actividad sísmica de la zona y los procesos de meteorización en la parte del macizo. La siguiente descripción geomorfológica fue publicada en el “Estudio de desarrollo de la cuenca superior del río Lebrija” (CDBM, 1981).

- **Superficies estructurales y residuales.** Esta unidad se ubica principalmente en la parte oriental de la cuenca, en la zona del Macizo de Santander. La litología corresponde al complejo ígneo-metamórfico y las zonas de vida que se encuentran son de bosque húmedo Premontano (bh-P) y bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB). Agrupa las unidades de Cordilleras altas y la unidad de Serranías Húmedas.

Los suelos de esta unidad tienen una pendiente entre 25 y 50% en la zona de serranías húmedas, y entre 50 y 100% en la zona de cordilleras altas. La profundidad promedio en ambas zonas varía entre 80 y 85 cms .

- **Superficies de acumulación antiguas levantadas.** Ésta constituida principalmente por áreas donde predomina la formación Girón y la formación Tambor. Puede dividirse en una zona de mesetas bajas y otra con laderas pendientes.

La zona de mesetas bajas está conformada por la mesa de Lebrija y la mesa de Ruitoque. La mesa de Lebrija se encuentra ubicada en la parte occidental de la cuenca, está constituida por depósitos mesozoicos de la formación Girón y retazos de la formación Tambor, y su zona de vida es el bosque seco Premontano (bs-P). Sus suelos tienen una pendiente entre 0 y 50% y una profundidad efectiva promedio de 70 cm.

La mesa de Ruitoque se ubica en la parte central de la cuenca, su material parental son depósitos de la formación Tambor, y su zona de vida es de bosque

húmedo Premontano (bh- P). Los suelos tienen una pendiente de 0 y 7% y cuentan con una profundidad promedio de 70 cm.

Por otra parte la zona de laderas Pendientes, corresponde a laderas de la mesa de Ruitoque, exactamente a las zonas de Chocoa y Acapulco. La zona de Chocoa esta constituida por depósitos de las formaciones Girón y Tambor, y su zona de vida es de bosque seco Premontano (bs-P). Los suelos tienen una pendiente entre 25 y 50% y una profundidad 45 cms. En la zona de Acapulco se encuentran depósitos de la formación Girón, su zona de vida es el bosque húmedo Premintano (bh-P), los suelos tienen una pendiente entre 25 y 50% y tienen una profundidad promedio de 50 cms.

- **Superficies de acumulación recientes. Aluviones y coluviones elevados.** Conformada por terrazas y depósitos aluviales y/o de vertiente. Se localiza en la parte centro – norte de la cuenca y su paisaje se caracteriza por ser de valles aluviales.

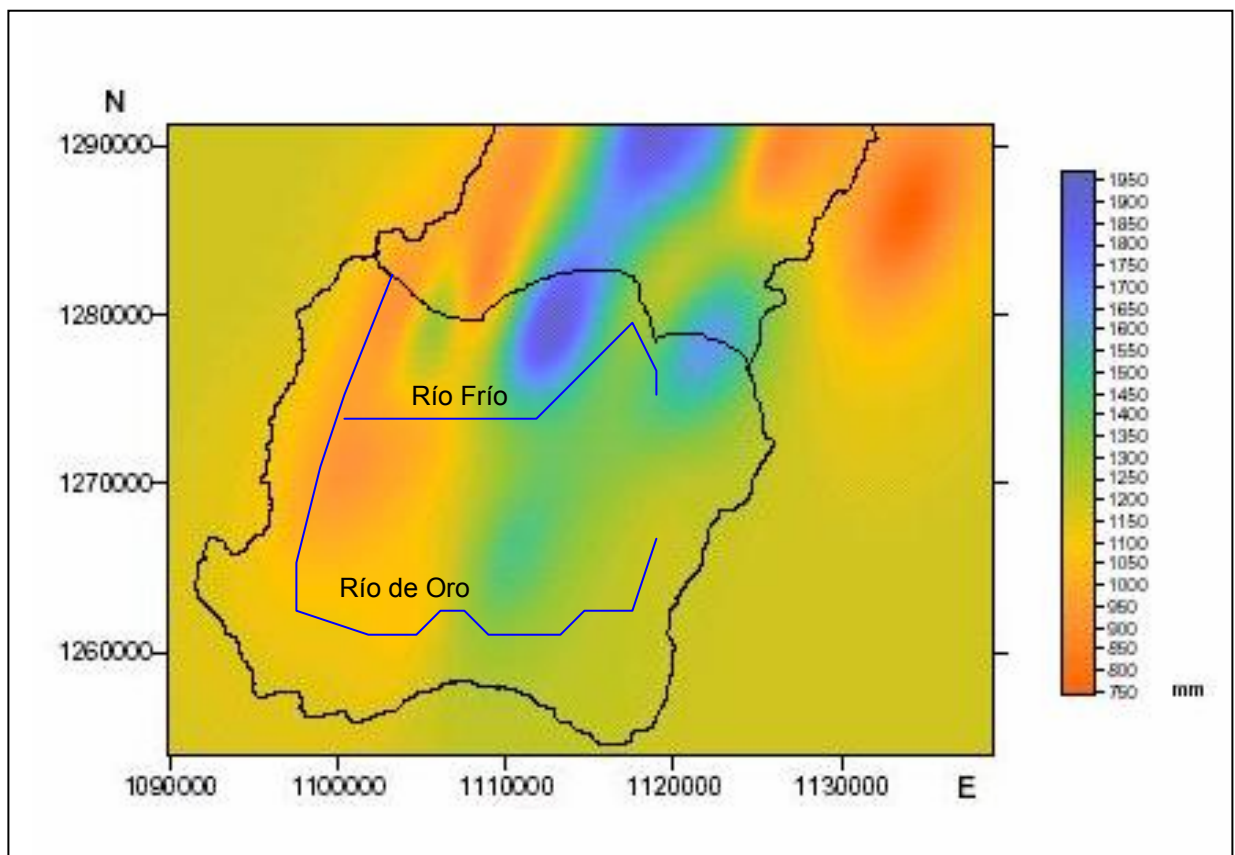
Los suelos que conforman ésta unidad son planos con pendientes entre 0 y 12%, y con profundidades promedio entre 30 y 65 cms. El microrelieve varía de ondulado suave a ondulado. Las zonas de vida presentes son de bosque seco tropical (bs – T), bosque húmedo Premontano (bh – P) y bosque seco Premontano (bs – P) .

1.5 PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

En la zona se presenta un sistema bimodal de lluvias con dos periodos húmedos y dos periodos secos, intercalados durante el año, fuertemente influenciado por el movimiento de la zona de convergencia intertropical (Gomez y Vargas, 2002). El periodo seco inicia a finales de Diciembre y finaliza a finales de Marzo, mientras el segundo inicia a finales de Junio y finaliza a mediados de Septiembre.

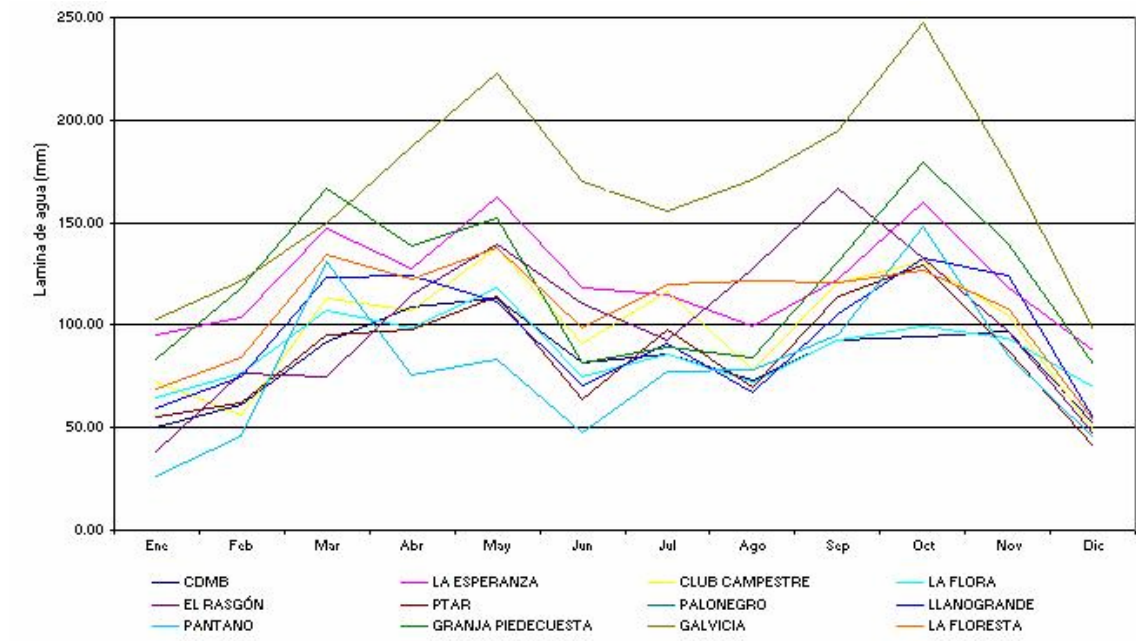
La precipitación es de tipo orográfico y convectivo. Las masas de nubes viajan desde el valle del Magdalena medio hacia el oriente, donde la mesa de Lebrija (1100 m.s.n.m.) actúa a manera de cortina ocasionando que únicamente las masas altas de nubes saturadas logren sobrepasarlo. Estas masas de nubes al encontrarse con la cordillera oriental, producen mayor pluviosidad, mientras que la zona inferior del río de Oro permanece seco (Duarte, et al, 2002). El óptimo pluviométrico en la zona se encuentra alrededor de la cota 1800 m.s.n.m. (Mendoza y Sandoval,2002).

Figura 6. Distribución anual de la precipitación media en la cuenca del río de Oro.



Fuente: Maradei y Rojas (2002)

Figura 7. Precipitación media multianual en la cuenca del río de Oro. Estaciones utilizadas en el estudio.



2. REPRESENTACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS EN EL MODELO DISTRIBUIDO

2.1 GENERALIDADES

Para el desarrollo del presente estudio se decidió representar los procesos hidrológicos de la cuenca, 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, para por medio de planteamientos matemáticos obtener valores de caudal en un cauce a partir de información de precipitación en la zona.

Con un modelo precipitación – escorrentía es posible simular el comportamiento de los caudales y los niveles en un cauce ante diferentes escenarios de precipitación, condiciones de humedad en el suelo o intervención antrópica sobre la cuenca. Además estos modelos pueden ser utilizados con fines de simulación o predicción, donde los caudales obtenidos y sus respectivos niveles se utilizan en : evaluación de riesgos, diseño de obras de infraestructura, diseño de obras hidráulicas evaluación del efecto de diferentes actividades antrópicas en la cuenca, etc.

Este tipo de modelos pueden ser de base física ó conceptuales. Los de base física realizan la representación de los procesos hidrológicos por medio de planteamientos físicos de tipo analítico ó empírico, basados en el estudio de la hidráulica, la hidrología, la geología y otras ciencias. Los conceptuales por otra parte representan los procesos hidrológicos por medio de elementos (conceptos), los cuales se basan en las similitudes que pueden plantearse entre algunos procesos hidrológicos y otros procesos mas simples y fáciles de estudiar (descarga de tanques, flujo en canales prismáticos, entre otros).

Para la utilización de los modelos de base física es necesario contar en la gran mayoría de los casos con información bastante completa y detallada de tipo hidrológico y geológico, la cual no siempre se encuentra al alcance del estudio a realizar. Por otra parte la información que requieren los modelos conceptuales generalmente suele ser menos complicada de conseguir, en muchos casos puede ser cualitativa, indirecta, o cuantitativa de precisión relativamente baja. Además éste tipo de modelos se ajustan más fácilmente a condiciones de información escasa, las cuales son muy comunes en estudios hidrológicos en nuestro medio.

Tanto los modelos de base física como los modelos conceptuales dependiendo de la forma como representen el área de estudio, pueden ser de tipo distribuido ó de tipo agregado. La representación de tipo distribuida permite representar la variabilidad espacial de las características del suelo, y de las diferentes variables hidrológicas, como la precipitación, la evapotranspiración, la temperatura, etc. La representación distribuida se realiza dividiendo la zona de estudio en zonas donde se pueda considerar que las condiciones hidrogeológicas sean homogéneas, luego en cada una de estas zonas se simulan los procesos hidrológicos que luego se unen para generar la respuesta total de la cuenca.

La representación de tipo agregado por otra parte, toma a la cuenca o a la subcuenca como una zona con características hidrogeológicas homogéneas, donde se desprecia la variabilidad espacial de las componentes hidrológicas de la zona y de las características del suelo.

A continuación se realizará una breve descripción del marco conceptual del modelo, donde se podrá observar cada una de las variables que intervienen en el modelamiento hidrológico, al igual que la forma como el mismo representa los procesos hidrológicos.

2.2 MODELO SHIA (SIMULACIÓN HIDROLÓGICA ABIERTA)

Es un modelo conceptual distribuido que se apoya en la física de los procesos, teniendo en cuenta las características morfológicas de la cuenca, con el fin de estimar la magnitud de cada una de las diferentes componentes de la escorrentía (Vélez,2001). Representa la producción y la transferencia de escorrentía por medio de tanques de almacenamiento interconectados entre sí, sobre los cuales actúa la ecuación de continuidad y una serie de ecuaciones conceptuales, las cuales le proporcionan flexibilidad al modelo, permitiendo que éste se ajuste a diferentes condiciones de simulación.

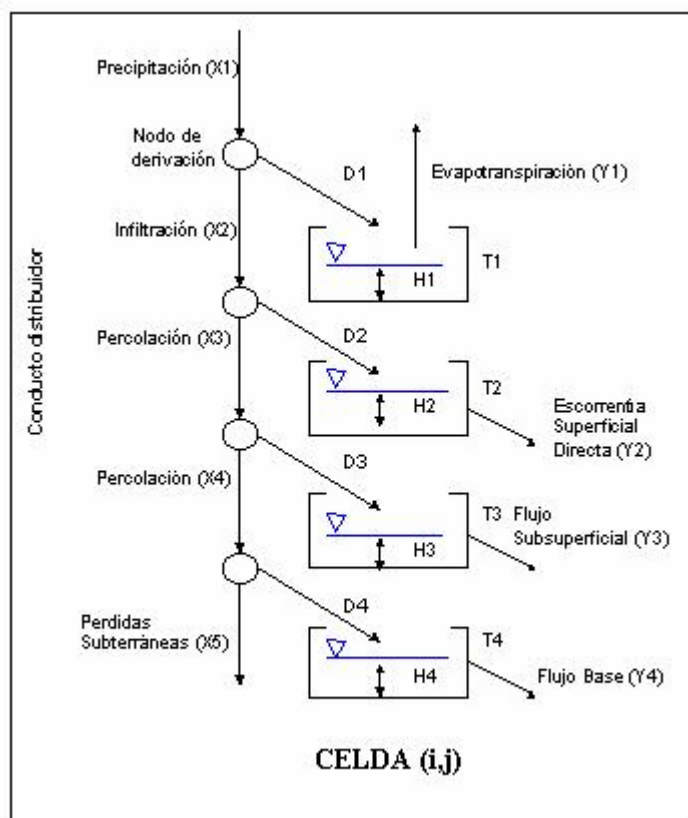
El modelo representa la cuenca por medio de celdas cuadradas, sobre las cuales actúan los dos submodelos que lo conforman, uno es el encargado de representar los procesos de producción de escorrentía y el otro los procesos de transferencia de la misma.

La producción de escorrentía se refiere a los diferentes procesos que se llevan a cabo desde el momento en el que el agua cae en el terreno en forma de precipitación, hasta que se incorpora a la red de drenaje superficial. Los procesos de producción de escorrentía son representados por medio de cuatro tanques interconectados entre sí y con las celdas vecinas, además se encuentran ordenados de manera jerárquica de arriba hacia abajo representando las diferentes capas de almacenamiento en el suelo (figura 8):

- Tanque 1 (T1): Representa el agua que queda almacenada sobre la cobertura vegetal, la detención en charcos y la que retiene el suelo por fuerzas capilares. Este tanque es el único afectado por la evapotranspiración.
- Tanque 2 (T2): Representa el agua que fluye superficialmente por la superficie del suelo, hasta ingresar a la red de drenaje.

- Tanque 3 (T3): Representa el agua gravitacional almacenada en la capa superior del suelo, donde se desplaza como flujo subsuperficial hasta alcanzar la red de drenaje principal.
- Tanque 4 (T4): Representa el agua gravitacional almacenada en la capa inferior del suelo (acuífero), que se desplaza y forma el flujo base del cauce.

Figura 8. Esquema de la conexión de la celda (i,j)



Fuente: (Jaramillo,2003)

Por otra parte el submodelo de transferencia de escorrentía requiere de un quinto tanque, el cual tiene la función de representar el almacenamiento del agua mientras fluye por un canal equivalente a los elementos de la red de drenaje. El modelo proporciona múltiples opciones para representar la forma como viaja el agua por

estos canales; para el presente estudio se representará como canales lineales con flujo uniforme.

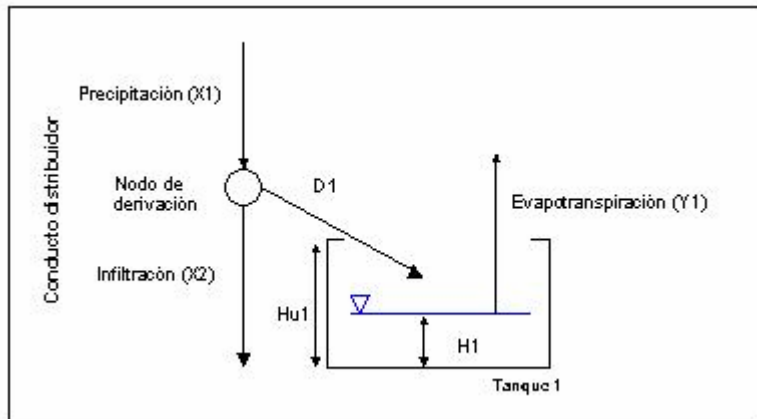
Para interconectar los diferentes tanques, el modelo se vale de un conducto distribuidor y de unos nodos de derivación; el primero es el encargado de representar las propiedades hidráulicas del suelo (conductividad, permeabilidad), regulando el flujo entre los tanques. Por su parte los nodos de derivación se ubican en la entrada de cada tanque y es allí donde se realiza el balance de agua, una parte de esta ingresará al conducto distribuidor y seguirá descendiendo, la otra ingresará 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 y de la evapotranspiración potencial, saldrá una parte del agua almacenada en forma de evapotranspiración real. La parte de la precipitación que no entra al primer tanque puede seguir 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, una parte del agua se quedará almacenada en el segundo tanque. Luego de igual forma ocurrirá en el nodo de derivación tres y cuatro, aunque para el nodo cuatro no se evalúan las condiciones del conducto distribuido mas adelante, en este caso toda el agua que llega al nodo queda almacenada en el tanque que representa al acuífero y las perdidas 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 en el suelo y las pérdidas por evapotranspiración (Tanque 1). Las diferentes variables que definen el comportamiento del primer tanque o t1 (figura 9) son :

Figura 9. Esquema del almacenamiento capilar (Tanque 1).



Fuente: (Jaramillo,2003)

$X1_t$: cantidad de lluvia en el intervalo Δt (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 Δt (mm).

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

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

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

$Y1_t$: cantidad de agua evaporada (mm).

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 de “agua útil” en el 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 ingresa al almacenamiento estático D1 desde el nodo de derivación corresponde al mínimo entre el agua existente en el nodo y la cantidad de agua que le falte al tanque para llenarse. Aunque de esta manera hasta que el almacenamiento capilar no se llenara, no habría escorrentía (menos infiltración), por lo que se utiliza un coeficiente Φ para lograr que aunque no este lleno el almacenamiento capilar, se permita el paso de una fracción de la lluvia. Este coeficiente Φ esta relacionado con el estado del almacenamiento del tanque tal que, cuando este se encuentre muy lleno deje pasar mucho, y cuando está muy vacío deje pasar poco. De esta manera D1 corresponde a:

$$D1_t = \text{Min}\{ \Phi * X1_t, Hu1 - H1_{t-\Delta t} \} \quad \phi = 1 - \left[\frac{Hu1}{H1_{t-\Delta t}} \right]^a$$

El anterior planteamiento ha sido utilizado en varios modelos conceptuales como el modelo HBV (Bergström,1995) y los modelos GR-3J y GR-3H (Arnaud y

Lavabre,1996) citados por Vélez (2001), en donde el exponente α puede tomar valores entre 1 y 3.

El modelo representa la cantidad de humedad que pierde el suelo debido a la evapotranspiración real $Y1$, por medio de una expresión en función de la evapotranspiración potencial y una relación entre la humedad del suelo y la humedad al punto de la capacidad de campo. Como se mencionó anteriormente el modelo representa la humedad del suelo con el nivel $H1$ del tanque y la humedad de la capacidad de campo como el nivel máximo $Hu1$ del tanque. Entonces $Y1$ se calcula así:

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

En algunos otros modelos se ha utilizado un planteamiento similar al anterior para representar la evapotranspiración real, entre los que se encuentran el GR-2 y el GR-3 del CEMAGREF (Michel, 1989) y el HBV (Bergström,1995); en éstos el valor del exponente b fue utilizado con un rango entre 0 y 1.

Como no es posible que la evapotranspiración real sea mayor que la humedad presente en el suelo, el modelo plantea que el valor de $Y1$ debe ser:

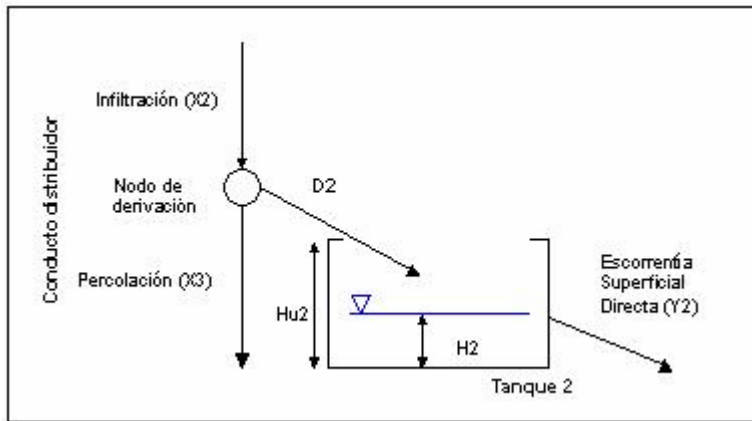
$$Y1_t = \text{Min} \left\{ ETP \left(\frac{H1_t}{Hu1} \right)^b, H1_t \right\}$$

El agua que no ingresa en el almacenamiento capilar T1, sigue bajando por el conducto distribuidor hacia la zona interior del suelo.

$$X2_t = X1_t - D1_t$$

2.2.2 El Almacenamiento Superficial (Tanque 2). Al igual que el almacenamiento capilar ó tanque t1, el almacenamiento superficial ó t2 también tiene una serie de variables que determinan su comportamiento. A continuación se enumeran cada una de estas variables y en la figura 10 se puede ver un esquema del tanque t2.

Figura 10. Esquema del almacenamiento superficial (Tanque 2).



Fuente: (Jaramillo,2003)

X_{2i} : cantidad de agua que excede el almacenamiento capilar (mm).

X_{3i} : cantidad de agua excedente del almacenamiento superficial (mm).

D_{2i} : cantidad de agua que se deriva hacia T2 durante el intervalo de tiempo Δt (mm).

H_{2i} : cantidad de agua en T2 al final del intervalo de tiempo Δt (mm).

$H_{2,t-\Delta t}$: cantidad de agua T2 al inicio del intervalo de tiempo Δt (mm).

H_{u2} : capacidad máxima de almacenamiento en el tanque T2 (mm).

Y_{2i} : cantidad de agua que sale por escorrentía superficial (mm).

La cantidad de agua que ingresa al suelo y se desplaza por el interior de éste, depende la conductividad hidráulica de la capa superior del suelo en condiciones de saturación K_s (mm/día) , la cual se encuentra estrechamente relacionada al tipo de suelo y su estructura, al igual que a la cobertura vegetal y a las características geomorfológicas de la zona.

La parte de la precipitación que no ingresa al almacenamiento capilar sigue bajando por el conducto distribuidor hasta el nodo de derivación, donde dependiendo de las condiciones del conducto distribuidor, una parte del agua seguirá su recorrido por éste y la restante ingresa al tanque T2. La cantidad de agua que se infiltra (sigue bajando por el conducto distribuidor) depende de dos parámetros, por una parte se encuentra como se mencionó anteriormente la conductividad hidráulica de la capa superior del suelo en condiciones de saturación K_s y obviamente de la cantidad de agua disponible en el nodo de distribución X_2 , es así como el modelo trabaja con la siguiente expresión:

$$X_{3t} = \text{Min}\{X_{2t}, K_s \Delta t\}$$

$$D_{2t} = X_{2t} - X_{3t}$$

Una vez el agua ingresa en el almacenamiento superficial T2 , se supone que se convierte en el flujo superficial de la cuenca, el cual se comporta como un embalse lineal con una velocidad constante y un coeficiente de descarga α , el cual se encuentra en función del tiempo de residencia del agua en el suelo.

$$Y_{2t} = \alpha * H_{2t}$$

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

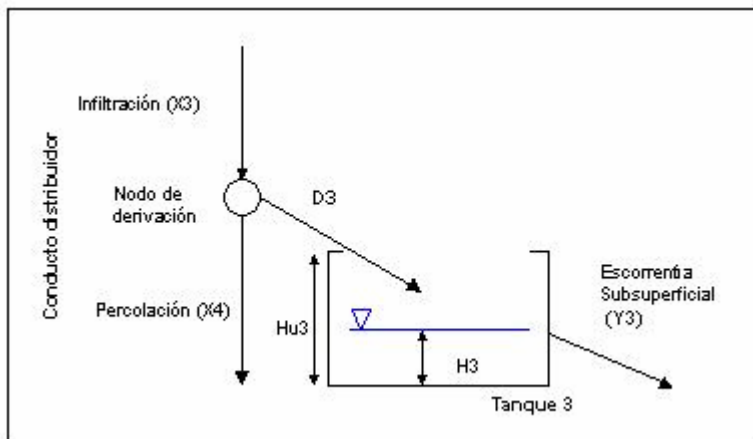
2.2.3 Almacenamiento subsuperficial (Tanque 3). Teniendo en cuenta que el comportamiento hidráulico del suelo varía según sus niveles de humedad, el modelo lo representa dividiendo el suelo en dos partes, en una capa superior y una

capa inferior. La primera capa cuenta con valores de permeabilidad mas altos, mayores gradientes y menores tiempos de residencia. la capa inferior puede considerarse como la zona saturada del suelo ó acuífero y a diferencia de la capa superior cuenta con permeabilidades mas baja, gradientes bajos y mayores tiempos de residencia.

El almacenamiento Subsuperficial representa el comportamiento hidráulico de la capa superior del suelo, en la cual se presenta un flujo lateral hacia abajo en la ladera, el cual se desplaza por las grietas o pequeños conductos en el suelo hasta aflorar y hacer parte de la red de drenaje.

Para la representación del almacenamiento subsuperficial ó T3 (figura 11) se consideran las siguientes variables:

Figura 11. Esquema del almacenamiento Subsuperficial (Tanque 3).



Fuente: (Jaramillo,2003)

X_{3t} : cantidad de agua excedente del almacenamiento superficial (mm).

X_{4t} : cantidad de agua que excede el almacenamiento Subsuperficial (mm).

D_{3t} : cantidad de agua que se deriva hacia T3 durante el intervalo de tiempo

Δt (mm).

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

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

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

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

El funcionamiento de éste tanque es similar al del tanque anterior T2, el agua que se siguió desplazando por el conducto distribuidor ingresa al nodo de derivación, donde dependiendo de las características del subsuelo una parte seguirá percolando hacia el acuífero y el resto se convertirá en flujo subsuperficial.

El modelo supone que el subsuelo cuenta con una capacidad de percolación **Kp** (mm/día), la cual determina la cantidad de agua que puede ingresar al acuífero. Ésta capacidad de percolación se encuentra relacionada con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. Por otra parte ésta capacidad de percolación debe representar tanto la permeabilidad primaria como la secundaria, de tal manera que sea posible reproducir en el modelo los efectos de la microporosidad y la macroporosidad del subsuelo.

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

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

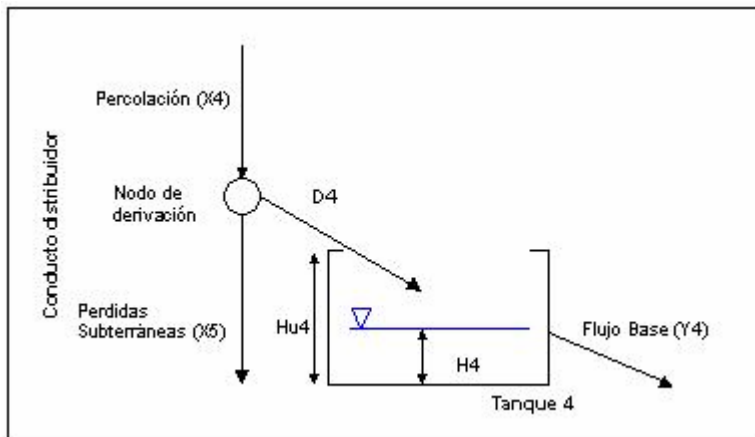
El modelo representa el flujo subsuperficial de forma similar que el flujo superficial, por medio de un embalse lineal donde el flujo viaja a velocidad constante y en función del tiempo de residencia .

$$Y_{3t} = \alpha * H_{3t}$$

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

2.2.4. Almacenamiento subterráneo (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. Las variables que se utilizan para representar el tanque T4 son las siguientes:

Figura 12. Esquema del almacenamiento Subterráneo (Tanque 4).



Fuente: (Jaramillo,2003)

X_{4t} : cantidad de agua 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 Δt (mm).

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

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

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

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

Una vez el agua alcanza el último nodo de derivación ubicado en la entrada del tanque T4, puede seguir percolando y convertirse en pérdidas subterráneas ó ingresar al almacenamiento subterráneo y convertirse en flujo base. La cantidad de agua que ingresa al almacenamiento subterráneo depende por lo tanto del agua disponible en el nodo de derivación y de la magnitud de las pérdidas subterráneas, así:

$$D4_t = X4_t - X5_t$$

Las pérdidas subterráneas ó por percolación profunda suele presentarse en la mayoría cuencas naturales, aunque su magnitud es muy pequeña comparada con el total del agua que circula por la cuenca por lo que tiende a despreciarse. Por otra parte en algunas cuencas se presentan condiciones geológicas y/o antrópicas particulares, que generan una variación considerable en los niveles del flujo base, donde puede considerarse que una parte del agua que se infiltra, no circula después por la cuenca, sino por el contrario puede seguir percolando hasta aflorar en otra cuenca.

De forma similar con los almacenamientos anteriores, la representación del flujo subterráneo se hace por medio del embalse lineal y en función del tiempo de residencia, así:

$$Y4_t = \alpha * H4_t \quad \alpha = \frac{1}{\text{tiempoderesidencia}}$$

Por último el caudal en cada celda para cada intervalo de tiempo (Qc_t) es la suma del flujo producido en cada tanque.

$$Qc_t = (Y2_t + Y3_t + Y4_t)$$

Y el caudal total (QT_t) en el punto de salida de la cuenca es la suma de los caudales producidos en cada una de las celdas (n).

$$QT_t = \sum_{i=1}^n Qc_t$$

De esta manera el modelo representa y maneja los procesos hidrológicos mas importantes que afectan el flujo de agua en cuencas.

3. PARAMETRIZACIÓN Y ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO

3.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de parametrización y estructuración del modelo consiste en seleccionar y calcular los diferentes parámetros que representarán las características de la cuenca. Estos parámetros se estiman a partir de la información topográfica, geológica, geomorfológica, de uso de suelo e hidrológica del área de estudio.

El modelo distribuido requiere de la representación topográfica de la cuenca, de donde se pueda extraer la red de drenaje, la cual representa la forma como el agua se mueve en el área de estudio. Esta representación topográfica se realizó por medio de un modelo digital de elevación (MDE) de la zona, el cual tiene un formato raster y en donde cada celda que lo constituye se utilizó como unidad de respuesta hidrológica (HRU) (Vélez, 2001). En cada una de estas unidades de respuesta se llevan a cabo los diferentes procesos hidrológicos (interceptación, 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 descrito en el capítulo anterior.

A cada una de las unidades de respuesta hidrológica se le deben asignar los parámetros característicos del suelo, los cuales describen su comportamiento hidráulico. Estos parámetros 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). Como cada celda del MDE debe contar con esta información se generaron mapas digitales del terreno, los cuales tienen el mismo formato del MDE.

Por último, en la estructuración del modelo es necesario introducir la variación climatológica para el periodo de modelamiento; ésta se representa con valores de precipitación para cada intervalo de tiempo de simulación, la cual se debe encontrar distribuida de la mejor forma a lo largo y ancho de la zona de estudio. Además se debe contar también con valores de evapotranspiración potencial (ETP) característicos para la zona, a partir de los cuales como se pudo observar en el capítulo anterior, se estimará la evapotranspiración real.

En el desarrollo del presente estudio se contó con el programa SimDis3, el cual fue desarrollado por el Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional (sede Medellín), donde se encuentra programadas las diferentes opciones del modelo. Cada uno de los parámetros se le introducen al programa por medio una serie de archivos, los cuales se describen en el Anexo B de éste informe.

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

3.2 REPRESENTACIÓN TOPOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO. MODELO DIGITAL DEL ELEVACIÓN Y SU PROCESAMIENTO

El modelo plantea la representación de la zona de estudio por medio de celdas cuadradas, las cuales son la unidad mínima de análisis. Para generar esta representación del área de estudio, el modelo plantea la posibilidad de trabajar con un modelo digital de elevación (MED), del cual dependerá en buena parte la calidad de los resultados. Por otra parte a partir del MED se puede obtener información tal como la variación de la pendiente del terreno, la variación de las direcciones de flujo sobre el suelo y una representación de la red de drenaje de la zona.

En la ejecución del modelo digital de elevación se utilizó una base topográfica 1:25000 en la parte oriental (zona del macizo) y en la parte occidental de la terraza de Bucaramanga. La zona central de la cuenca y mas exactamente la zona de la subcuenca de Río Frío se trabajó con base topográfica 1:10000. La base topográfica que se utilizó se obtuvo de procesos de digitalización manual en tableros, de planchas preliminares del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y había sido utilizada anteriormente en el trabajo de Maradei y Rojas (2002).

El proceso de rasterización de la información topográfica se llevó a cabo utilizando el programa Surfer 8, el cual realizó la división por celdas (Gridding) del área de estudio y la consiguiente interpolación, para de esta manera generar el modelo digital de elevación. Se decidió que el tamaño de las celdas fuese de 50m x 50m, por dos razones principalmente, la primera que el modelo SHIA (Simulación Hidrológica Abierta) exige celdas cuadradas y la segunda, que con este tamaño de celda se podría tener una buena representación de la cuenca, con un volumen manejable de datos para la escala a la que se estaba trabajando.

Ahora bien con el fin de generar un MDE que representará lo mejor posible el área de estudio, se probaron diferentes métodos de interpolación, analizando su algoritmo matemático y comparando sus resultados.

3.2.1 Métodos De Interpolación Analizados. El programa Surfer 8 proporciona múltiples algoritmos de interpolación, pero no todos generan una buena representación de las características topográficas del terreno. Así pues solo se analizaron inicialmente cuatro algoritmos de interpolación, el Kriging, el método de base radial, el método Shepard modificado y el método del vecino natural, pero de estos solo se tomaron el Kriging y el Base Radial para realizar la interpolación, ya que los demás a simple vista demostraban una fuerte distorsión en la información.

A continuación se hará una breve descripción del algoritmo matemático utilizado por el Kriging y el Base Radial, a la vez que se describirán la forma como se estimó el error generado por cada uno de estos métodos de interpolación.

- **El Kriging.** Este método realiza la interpolación planteando la existencia de una correlación espacial entre los datos separados a diferentes distancias; con este fin calcula la covarianza de dichos datos por medio de la semivarianza de las diferencias con la siguiente expresión (Felicísimo,1999):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \text{var}(z_p - z_{p+h})$$

donde:

var: representa la varianza.

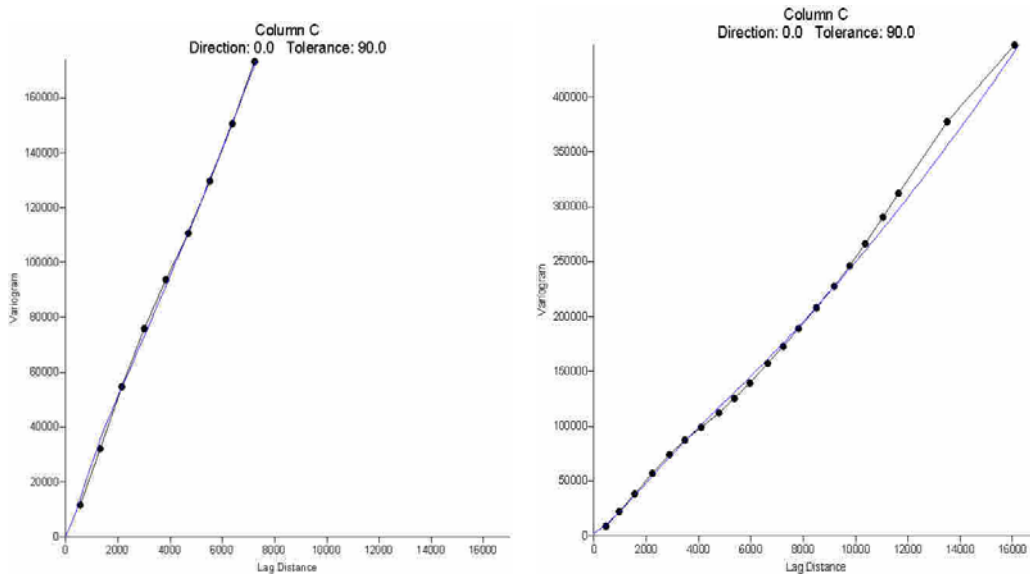
Z_p : Representa el valor de la variable en el punto P .

Z_{p+h} : Representa el valor de la variable en el punto a una distancia h del anterior.

Además es necesario calcular el Variograma, que no es mas que una función que muestra la variación en la correlación de los datos, con respecto a la distancia entre estos. Ahora bien el objetivo del método es encontrar el semivariograma que mejor se ajuste a la covarianza real de los datos. Con este fin Surfer 8 proporciona primero la opción de estimar el variograma original de los datos, para luego poder generar el variograma de interpolación por medio de la adición de diferentes funciones matemáticas.

Para estimar el semivariograma de interpolación para nuestro MDE, se probó con múltiples funciones (ver figura 13), donde se buscaba encontrar la distancia hasta la que se podía considerar que existía una correlación entre los datos, además de la combinación de funciones que mejor representaran la correlación de los datos de elevación de la cuenca. También se utilizó una anisotropía igual a 1 y un ángulo igual a cero.

Figura 13. Semivariogramas generados por el Krigin 1 y Krigin2.



Como se puede ver en la figura 13, por medio de Kriging se puede obtener una mejor representación de la variación de la topografía en la zona de estudio, al disminuir la distancia de correlación entre los puntos; esto se puede atribuir a las condiciones geomorfológicas tan particulares de la zona, en donde se encuentran algunos sitios que podrían considerarse planos (mesetas de Bucaramanga y Ruitoque) y por otra parte sitios con pendientes muy pronunciadas (Escarpa de Bucaramanga y parte del macizo de Santander).

- **Método De Función Base Radial.** Este método de interpolación consiste en aplicar una función que le otorgue el peso adecuado a los diferentes datos durante la interpolación. Esta función es como el variograma para el Kriging.

Este método proporciona la opción de utilizar variar funciones base entre las que se tienen:

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 variable a interpolar.

R²: Es el factor moldeador especificado por el usuario.

El valor por defecto de R² es calculado por el programa, multiplicando por 2 la longitud diagonal de los datos y a esto dividirlo por 25 veces el número de datos.

La función recomendada por el programa y con la que se realizó la interpolación de los datos fue con la multicuadrática, utilizando el R² calculado por defecto, un radio de anisotropía igual a 1 y un ángulo igual a cero.

3.2.2. Estimación del Error y Elección del MDE. La calidad de un MDE depende del tipo y magnitud de los errores implicados; de esta manera es necesario poder reducir estos errores a lo mínimo posible. Al trabajar con información topográfica digital obtenida a partir de digitalización manual, se debe hacer la salvedad que el MDE desde el principio contará con errores que pueden ser de tipo topológico, estocásticos y de generalización (Felicísimo, 1999), pero que para desarrollo de este modelo, solo se evaluarán y analizarán errores producto de la interpolación.

Una vez realizada la rasterización de la cuenca por medio de los métodos de interpolación mencionados anteriormente, se optó por determinar cual de ellos contenía un menor valor de error, para de esta manera realizar la elección del mejor MDE. Con este fin se realizaron las siguientes comparaciones:

Primero por medio de Surfer 8 se calcularon los residuos (diferencia de valor entre los puntos originales y los puntos generados) y con ellos se estimó el valor del error medio cuadrático (EMC), es cual se calcula con la siguiente expresión:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_{z_i}^2}$$

donde:

δ_{z_i} : Representa el valor de los residuos.

n: Es el numero total de datos.

Como se puede observar en la tabla 2, los valores de error no son significativamente diferentes entre los 3 modelos comparados, aunque se nota que el método de base radial contiene un menor valor de EMC.

Tabla 3. Valores del error medio cuadrado (EMC), calculado por MDE analizados.

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	NUMERO DE DATOS	EMC
Kriging 1	296736	5.7
Kriging 2	296736	8.2
Función Base Radial	296736	4.8

Luego se tomaron los modelos digitales de elevación realizados con el Kriging 1 y con la Función de Base Radial, para estimar el numero de sumideros (pits) con que contara cada uno. Estos sumideros son las celdas donde la red de drenaje queda estancada, ya que su elevación es menor que la de las celdas que se encuentran a su alrededor. Pueden haber zonas naturales dentro de la cuenca donde ocurra este fenómeno, pero se asumen como despreciables debido al área que representa cada celda.

Para realizar este chequeo y corrección de sumideros se empleó el programa Spell-Map (Guzmán,2002). La corrección de los sumideros se realizó dándole un valor de elevación, a la celda problema igual al de la celda a su alrededor con menor elevación mas un pequeño porcentaje (1/10000). El SimDis3 también cuenta con una herramienta que localiza y corrige los sumideros, pero no permite conocer el numero total de sumideros corregidos; por esta razón se chequeó únicamente con el Spell-Map.

Tabla 4. Número de sumideros generados por cada uno de los métodos de interpolación utilizados.

INTERPOLACIÓN UTILIZADA	NUMERO DE SUMIDEROS
Kriging 1	6758
Función de Base Radial	7251

Por ultimo se optó por comparar la forma de las diferentes redes de drenaje generadas contra una que se tenia digital, encontrando que se tenia una mejor representación por medio del MDE generado a partir de la función de Base Radial.

Ahora bien, es importe resaltar que se procuró obtener el mejor modelo digital de elevación para este estudio, pero la información con la que se contaba no era del todo excelente, ya que como se mencionó anteriormente, la información cuyo origen sea de digitalización manual, trae consigo ya un buen numero de errores. Por otra parte, se hubiese querido contar con puntos de control geodésico u otras metodologías para poder evaluar los errores, pero fue imposible contar con esa clase de recursos en el desarrollo de este estudio.

3.2.3. Información Generada. Para realizar la simulación se requiere que el modelo digital de elevación se encuentre en formato GRASS. Por esta razón fue necesario procesarlo en el programa IDRISI 32, el cual reconoce información de un buen número de programas y permite hacer el cambio de formato entre estos.

Al contar con el MDE en formato GRASS fue necesario correr las rutinas iniciales del SimDis3 (ver Anexos), primero la 1dtmcuenca, 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 las coordenadas del punto de control a la salida de la cuenca, genera una mascara con la divisoria de aguas de la cuenca. Como se explicará mas adelante, se tomó como punto de control la estación Limnimétrica Puente Nariño , la cual se encuentra a cargo de la Corporación Autónoma para Defensa de La Meseta de Bucaramanga (CDMB).

Luego se ejecutó la segunda rutina, la cual es la encargada de crear un archivo donde se agrupan las celdas del MDE que realmente pertenecen a la cuenca que se estudia, ordenándolas a partir de la dirección del flujo, lo cual permite observar la forma como se encuentran intercomunicadas las celdas. En las figuras 14, 15, 16 y 17 se presentan algunos de los mapas utilizados en la simulación.

Figura 14. Cuenca del río de Oro. MDE (Modelo Digital de Elevación)

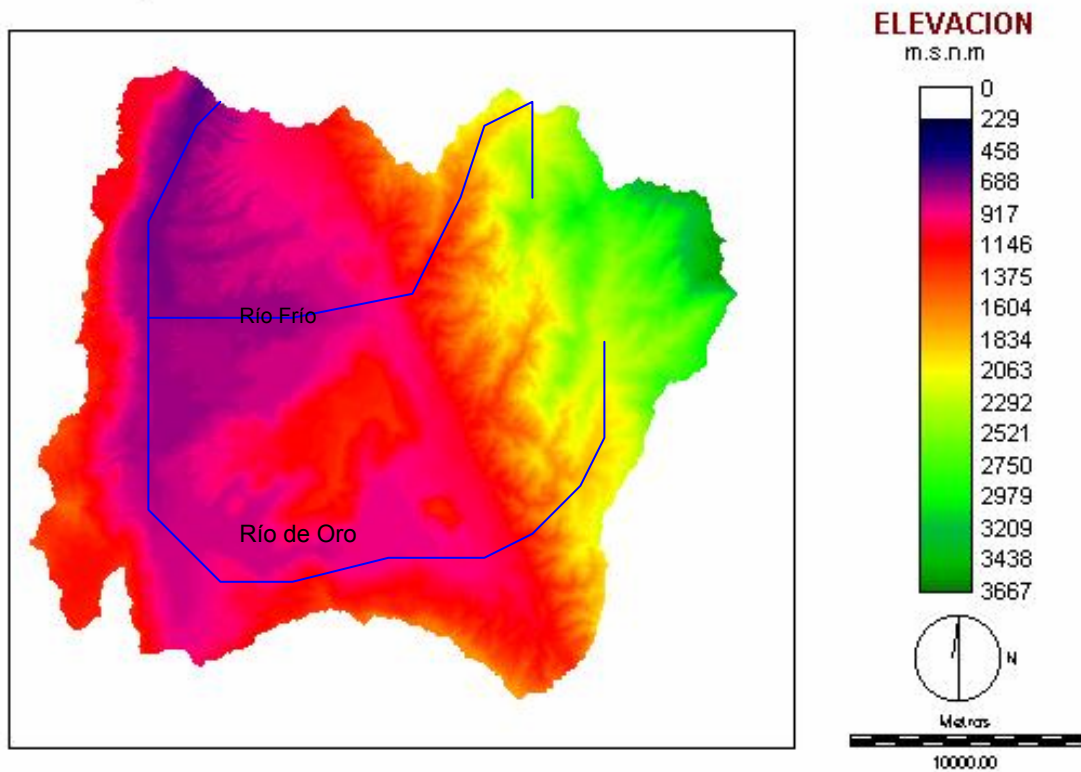


Figura 15. Cuenca del río de Oro. Mapa de pendientes.

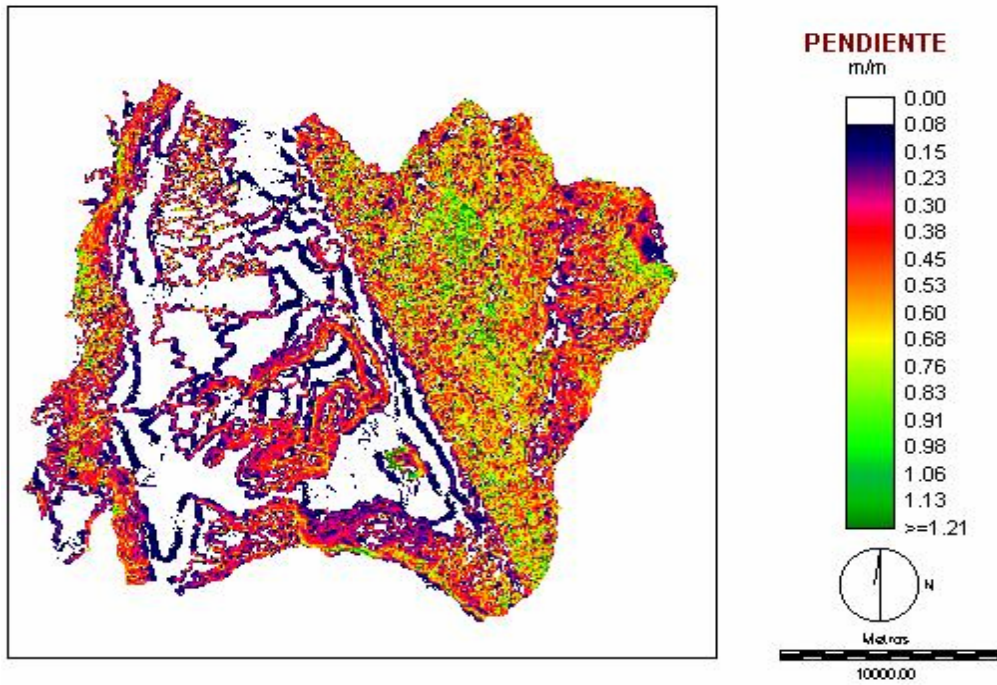


Figura 16. Cuenca del río de Oro. Mapa de celdas acumuladas.

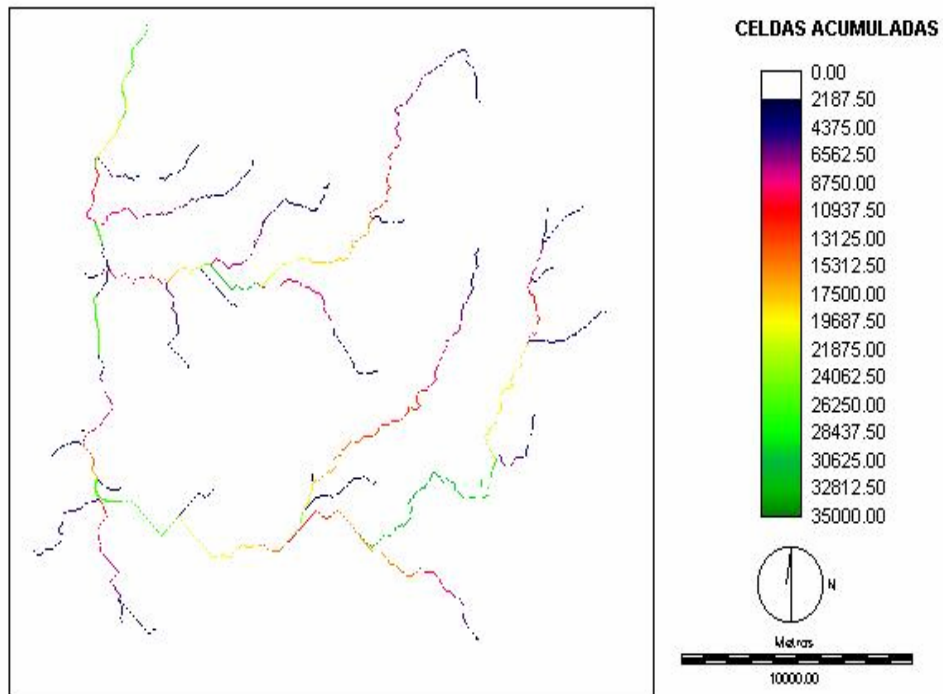
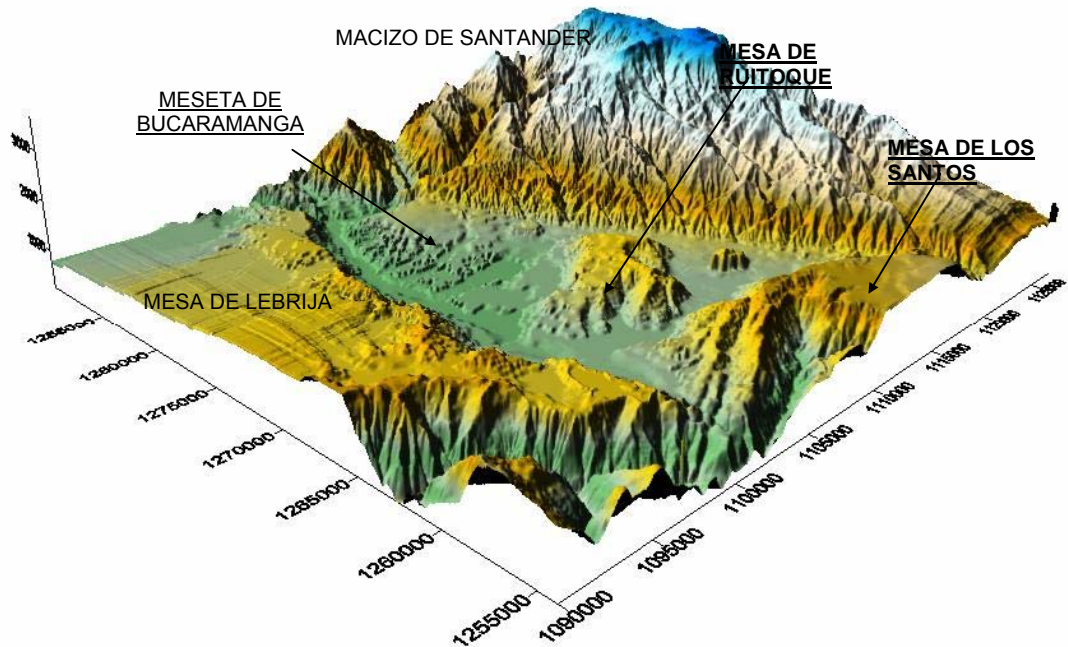


Figura 17. Cuenca del río de Oro. Proyección 3D del Modelo Digital de Elevación



3.2 INFORMACIÓN DEL SUELO Y SU COBERTURA

Como se había mencionado en el capítulo 2, el modelo SHIA representa el comportamiento del suelo por medio de cuatro tanques y un conducto distribuidor. Las características de estos elementos se toman como parámetros de calibración del modelo y se deben relacionar con condiciones reales de la zona de estudio. Por lo anterior se analizó la información proveniente del Plan de Ordenamiento Ambiental de la subcuenca Río de Oro ,adelantado por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga en el presente año.

Entre la información analizada se contó con una descripción de las principales características ambiental de la cuenca del Río de Oro, además de mapas digitales de usos de suelo, geología superficial, geomorfología y zonas de vida.

A partir de estos mapas se generarán mapas digitales del terreno (MDT), donde a cada celda se le asignó un valor de almacenamiento capilar y de cobertura

superficial, otro de conductividad de la capa superior del suelo y por último uno con la conductividad de la capa inferior del suelo ó subsuelo.

Con el fin de facilitar el proceso de calibración del modelo, el programa SimDis3 maneja los valores atrás mencionados como un producto entre dos factores; el primero es un valor porcentual ya sea de almacenamiento ó de conductividad, multiplicado por un valor inicial, el cual irá variando a lo largo de la calibración, hasta encontrar el valor real que corresponde a cada celda. El valor porcentual se le asigna a cada grupo de celdas cuyo comportamiento pueda considerarse similar y se relaciona con la cantidad de agua que puede almacenar el suelo y la vegetación de un grupo determinado , con respecto al resto de los grupos. Igual sucede para la conductividad hidráulica de la capa superior y la capa inferior del suelo.

3.2.1 Mapas Digitales Del Terreno. La forma como se debe representar las características de almacenamiento y conductividad del suelo es por medio de mapas digitales el terreno, los cuales deben tener la misma estructura del modelo digital de elevación y deben tener formato GRASS.

Con el fin de facilitar el manejo de la información, se procesaron los mapas de uso de suelo, geología y geomorfología de la zona, que se encontraban digitales en formato *dwg de autocad, para llevarlos a Arcview, donde por medio de la calculadora de mapas se manipularon con el fin de generar zonas cuyo almacenamiento capilar y conductividad saturada del suelo fueran similares. A continuación se hará una breve descripción de los parámetros que se tuvieron en cuenta para dicha división.

- **Almacenamiento capilar y de cobertura superficial del suelo.** Para representar el agua que queda almacenada sobre la vegetación y en la zona capilar del suelo, fue necesario analizar el mapa de uso actual del suelo en la cuenca del río de Oro. Sobre dicho mapa se realizó una zonificación dependiendo del tipo de vegetación ó cultivo (cobertura vegetal) , de esta manera se obtuvo un mapa del área de estudio con 7 divisiones. Con el fin de facilitar el proceso de calibración y partiendo de que el almacenamiento en una zona de cultivos o de pastos es muy

diferente al de una zona de bosques, se decidió disminuir de 7 zonas en solamente 3 (ver tabla 4).

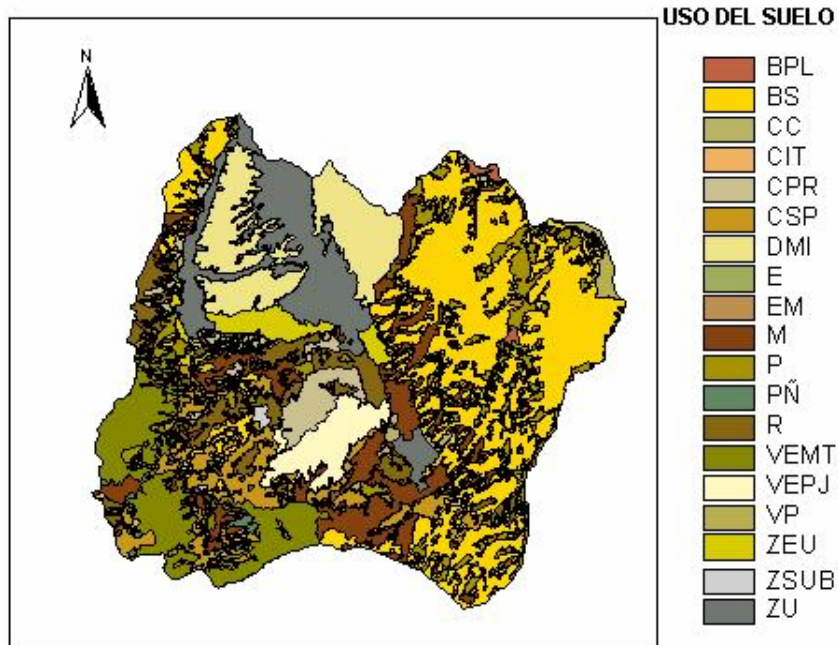
Tabla 5. Clasificación de los diferentes usos de suelo en la cuenca del río de Oro.

TIPO DE VEGETACIÓN	REF.	AGRUPACIÓN PRELIMINAR	SUBZONAS	COD. SUBZONAS
Distrito de manejo integrado	DMI	Pastos	HERBACEA	2
Pastos naturales	P			
Cultivos de Cítricos	Cit	Cultivos		
Cultivos Semipermanentes	Csp			
Cultivos mixtos	M			
Cultivos de Piña	Pñ			
Cultivos-Pastos-Rastrojos	CPR			
Café Sombra	Cs			
Caña-Caracoli	Ccf			
Matorrales	Vetm	Vegetación especial		
Pajonales	Vepj			
Vegetación de Páramo	Vp			
Bosque Secundario	Bs	Bosque secundario	BOSCOSA	3
Coníferas	Bpl	Bosque plantado		
Rastrojo	R	Rastrojo		
Erosión	E	Zona sin vegetación	SIN VEGETACIÓN	1
Material de Arrastre	EM			
Zona Urbana	ZU			
Zona Suburbana	Zsub			

Fuente: (C.D.M.B, 2003) y Autor

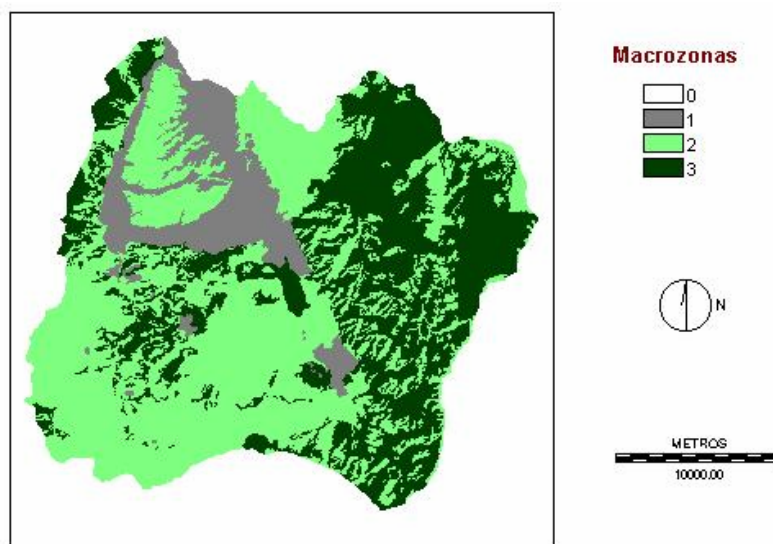
Al contar con un mapa con la zona de estudio dividida en macrozonas con almacenamiento capilar y superficial del suelo similares, se exportó a IDRISI 32, donde se rasterizó y se le dio el mismo formato que al MDE (ver figura 19).

Figura 18. Cuenca del río de Oro. Mapa de uso de suelo simplificado.



Fuente: (C.D.M.B., 2003)

Figura 19. Cuenca del río de Oro. Mapa de macrozonas con almacenamiento capilar y cobertura superficial similar.



- **Conductividad hidráulica saturada de la capa superior del suelo (ks).** La conductividad hidráulica de la capa superior del suelo se refiere a la capacidad del suelo para dejar pasar agua a su interior. Dicha capacidad está estrechamente relacionada con la cobertura vegetal, el uso y manejo del suelo, al tipo de suelo y a sus características geológicas. En el modelo Ks se encuentra representada como la facilidad que tiene el conducto distribuidor de dejar pasar agua entre el tanque 2 (Almacenamiento de flujo superficial) y el tanque 3 (Almacenamiento de agua gravitacional).

Con el fin de obtener el modelo digital del terreno con esta información, se analizaron con detenimiento los mapas de uso actual del suelo, geología superficial y geomorfología de la zona de estudio, dividiendo la cuenca de río de Oro en 6 macrozonas donde el comportamiento hidráulico de la capa superior del suelo fuese similar (ver tabla 5). Una vez se tuvo el mapa con la clasificación lista, se exportó al Idrisi 32, donde se realizó la rasterización y se le dió el mismo formato que al MDE.

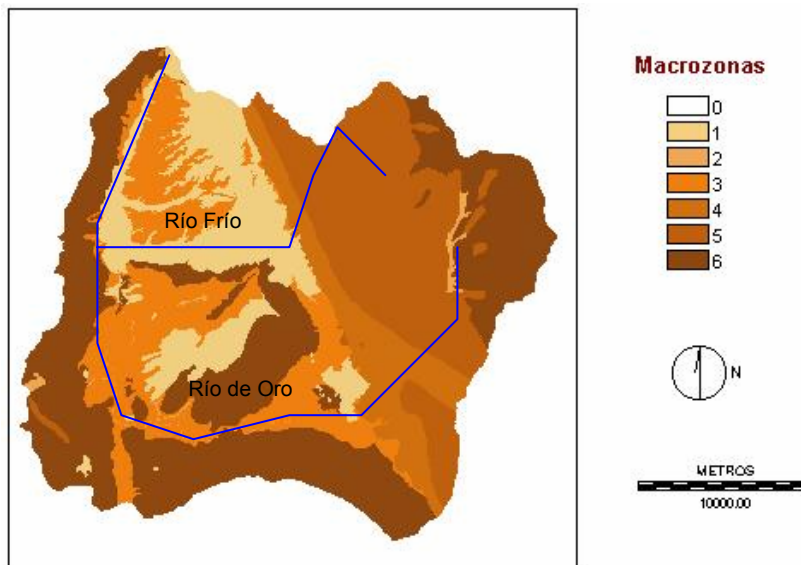
Tabla 6. División de la zona de estudio en macrozonas de similar comportamiento hidráulico en la capa superior del suelo.

COD. SUBZONA	MACROZONA	OBSERVACIONES
1	Urbana	Sin vegetación
2	Lecho fluvial	
3	Terraza Aluvial	Depósitos aluviales
4	De Falla	Escarpes de fallas
5	De Suelo Meteorizado	Neis de Bucaramanga
6	De Suelos arenosos-arcillosos	Sedimentos clásticos origen continental

- **Conductividad Hidráulica De La Capa Inferior Del Suelo (Kp).** Este parámetro representa la capacidad de percolación característica del suelo, la cual está estrechamente relacionada con las características geológicas y

geomorfológicas de las capas inferiores del suelo y en algunos casos también con la producción de flujo base aguas abajo. En el modelo este parámetro controla la cantidad de agua que se puede desplazar del tanque 3 (almacenamiento de agua gravitacional) y el tanque 4 (almacenamiento de aguas subterráneas).

Figura 19. Cuenca del río de Oro. Mapa de macrozonas con conductividad hidráulica similar en la capa superior del suelo.

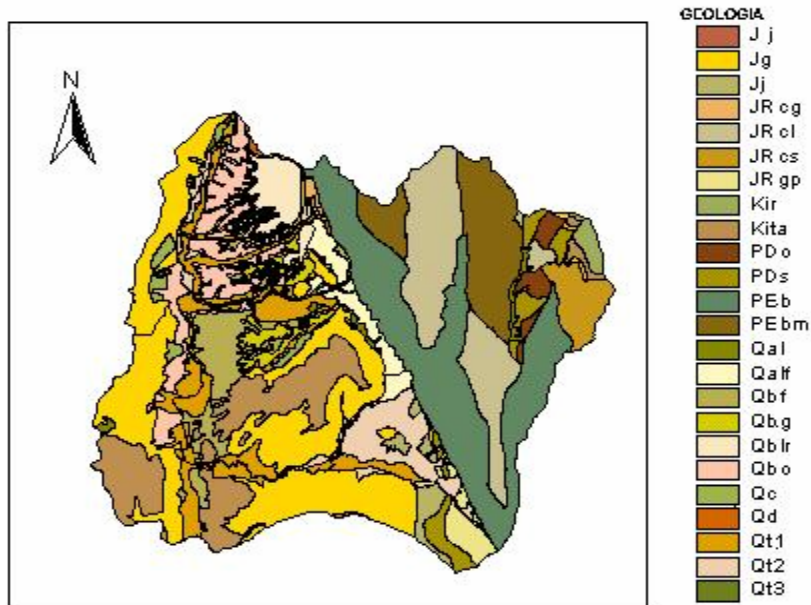


A partir de la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio, se decidió dividirla en dos subzonas cuyo comportamiento podría ser similar, por un lado la macrozona de suelos de la formación ígneo e ígneo-metamórfica, por el otro la macrozona de suelos de origen fluvial (ver tabla 6). Una vez determinada la subdivisión de la cuenca se realizó el mismo proceso que en los casos anteriores para generar el MDT.

Tabla 7. División de la zona de estudio en Macrozonas de similar comportamiento hidráulico, en la capa inferior del suelo

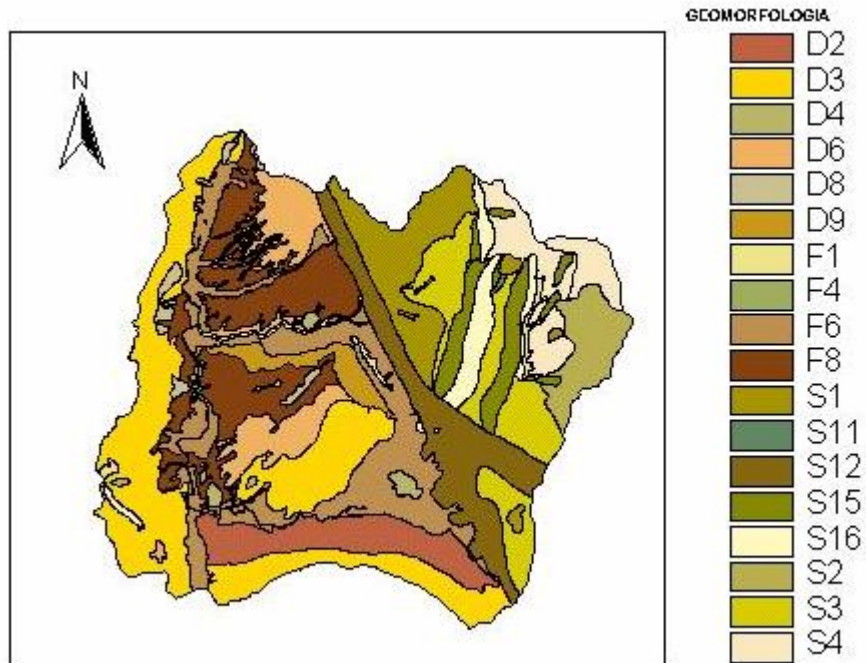
COD. SUBZONA	MACROZONA
1	ÍGNEO-METAMÓRFICA
2	DE ORIGEN ALUVIAL

Figura 21. Cuenca del río de Oro. Mapa Geológico simplificado.



Fuente: (C.D.M.B.,2003)

Figura 22. Cuenca del río de Oro. Mapa Geomorfológico simplificado

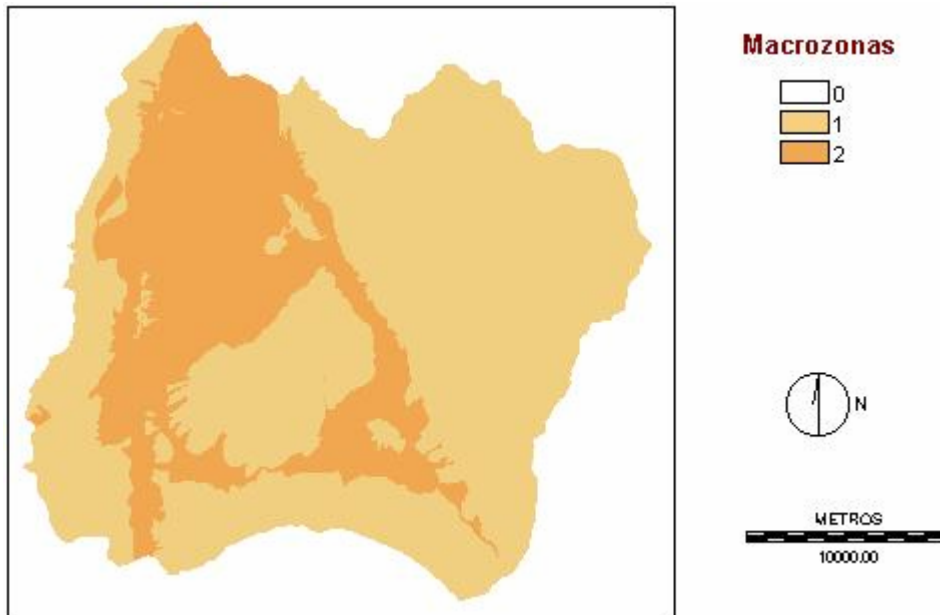


Fuente: (C.D.M.B., 2003)

Tabla 8. Leyenda de los mapas geológicos y geomorfológicos de la cuenca del río de Oro.

MAPA GEOLÓGICO		MAPA GEOMORFOLÓGICO	
CUATERNARIO		FORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL	
QAL	Aluvial reciente	D2	Pendientes y colinas
Qalf	Aluvial reciente flujo	D3	Colinas y montañas
Qc	Coluvión	D4	Colinas residuales
Qd	Deslizamientos	D6	Mesetas
Qt1	Terraza baja	D8	Glasis de ladera
Qt2	Terraza media	D9	Escarpes
Qt3	Terraza alta	D12	Tierras malas
FORMACIÓN BUCARAMANGA (Qb)		FORMAS DE ORIGEN ESTRUCTURAL DENUDACIONAL	
Qblr	Miembro Limos Rojos	S1	Topografía ondulante a rizada con sistemas de drenaje relacionados a fracturas, fallas o patrones de equistosidad.
Qbg	Miembro gravoso	S2	Topografía de lomos y vertientes onduladas, con sistemas de drenaje predominantemente relacionados a afloramientos de roca estratificada
Qbf	Miembro finos	S3	Topografía rizada a colinada con sistemas de drenaje predominantemente a fracturas, fallas o patrones de equistosidad.
Qbo	Miembro órganos	S4	Topografía de lomos y vertientes onduladas con sistemas de drenaje predominantemente relacionados a afloramientos de rocas estratificadas
MESOZOICO		S11	Diques
Jg	Formación Girón	S12	Escarpes de falla y escarpes de línea de falla
Jj	Formación jordán	S15	Filos rocosos
JRcg	Cuarzomonzonita granito	S16	Depresión estructural
JRcl	Cuarzomonzonita de la corcova	FORMAS DE ORIGEN FLUVIAL	
JRcs	Cuarzomonzonita de santa bárbara	F1	Lecho fluvial
JRgp	Granito pescadero	F2	Cuerpos de agua
Kir	Formación Rosablanca	F6	Terraza fluvial
Kita	Formación tambor	F8	Abanicos aluviales inactivos
PALEOZOICO			
PDs	Formación Silgara		
PRE-CAMBRICO			
PDo	Ortoneis		
PEb	Neis de Bucaramanga		
PEbm	Neis de Bucaramanga		

Figura 23. Cuenca del río de Oro. Mapa de macrozonas con Conductividad hidráulica similar en la capa inferior del suelo.



3.4. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y CLIMATOLÓGICA

El periodo de tiempo que se escogió para realizar el estudio fue de 6 años (1986-1991), debido a que se contaba con buena parte de la información pluviométrica de la zona. Además era de interés estudiar la respuesta del modelo en un periodo seco, donde se pudiera ver mejor el comportamiento de las recesiones, y este periodo se ajustaba perfectamente a estas consideraciones. Como se profundizará mas adelante, debido al gran volumen de información de faltante de caudales, fue necesario realizar la calibración del modelo con los registros del año 1987 para así luego analizar el comportamiento de la cuenca para el periodo completo. Se hubiera preferido analizar una serie de tiempo mas larga, lo cual fue imposible debido a información faltante tanto de precipitación como de escorrentía. El proceso de calibración se profundizará en el capítulo siguiente.

3.4.1. LA PRECIPITACIÓN. En el proceso de simulación, la precipitación juega un papel muy importante, ya que es la encargada de alimentar el sistema. Por esta

razón se buscó que estuviera lo mejor distribuida posible. Fue así como se tomaron datos de 12 estaciones hidrológicas, entre las que se contaban pluviométrica, pluviográficas y climatológicas. Las estaciones que se escogieron para el presente estudio son monitoreadas por el IDEAM y por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB).

Los registros de estas estaciones fueron analizados anteriormente en los trabajos de Duarte (2002) y Duarte, et al (2002), donde se realizó el análisis estadístico de las diferentes estaciones hidrológicas de la cuenca superior del Río Lebrija y la cuenca del Río de Oro. Por esta razón en el presente informe no se hace mención a las pruebas estadísticas realizados a los datos de precipitación.

En los datos de precipitación con que se alimentó el modelo se presentó un total del 3.45% de datos faltantes, los cuales fueron calculados a partir de los registro de las estaciones mas cercanas. En la tabla 10 se pueden observar el porcentaje de datos faltantes por estación.

Tabla 11. Datos faltantes por estación utilizada.

NOMBRE ESTACIÓN	ENTIDAD ENCARGADA	REGISTROS FALTANTES	%
Cdmb	CDMB	Ninguno	0
Club Campestre	CDMB	Ninguno	0
El Rasgón	CDMB	Ninguno	0
La Esperanza	CDMB	Ninguno	0
La Flora	CDMB	Ninguno	0
Ptar	CDMB	Ninguno	0
Aeropuerto Palonegro	IDEAM	Julio 1988	1.69
La Galvicia	IDEAM	Ninguno	0
Granja Piedecuesta	IDEAM	Ninguno	0
Llano Grande	IDEAM	Septiembre 1989	1.64
El Pantano	IDEAM	Agosto 1 y 2 1988	0.11
La Floresta	IDEAM	Ninguno	0
TOTAL			3.45

Tabla 9. Estaciones hidrológicas manejadas por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDBM).

NOMBRE ESTACIÓN	TIPO DE ESTACIÓN	MUNICIPIO	COORDENADAS		ELEVACIÓN (M.S.N.M)	FECHA INSTAL.
			N	E		
CDMB	PG	BUCARAMANGA	1279632.56	1105523.12	950	ENERO-79
Club Campestre	PG	FLORIDABLANCA	1273071.53	1106398.82	920	OCT. - 82
El Rasgón	CO	PIEDRECUESTA	1270293.97	1119912.75	1950	ENERO - 87
La Esperanza	CO	FLORIDABLANCA	1273581.60	1111228.36	1020	SEP. - 79
La Flora	PG	BUCARAMANGA	1280894.09	1107543.41	1150	ENERO - 79
Ptar	CO	GIRÓN	1273129.03	1104802.91	785	AGO. - 85

Fuente: (Duerte,2002)

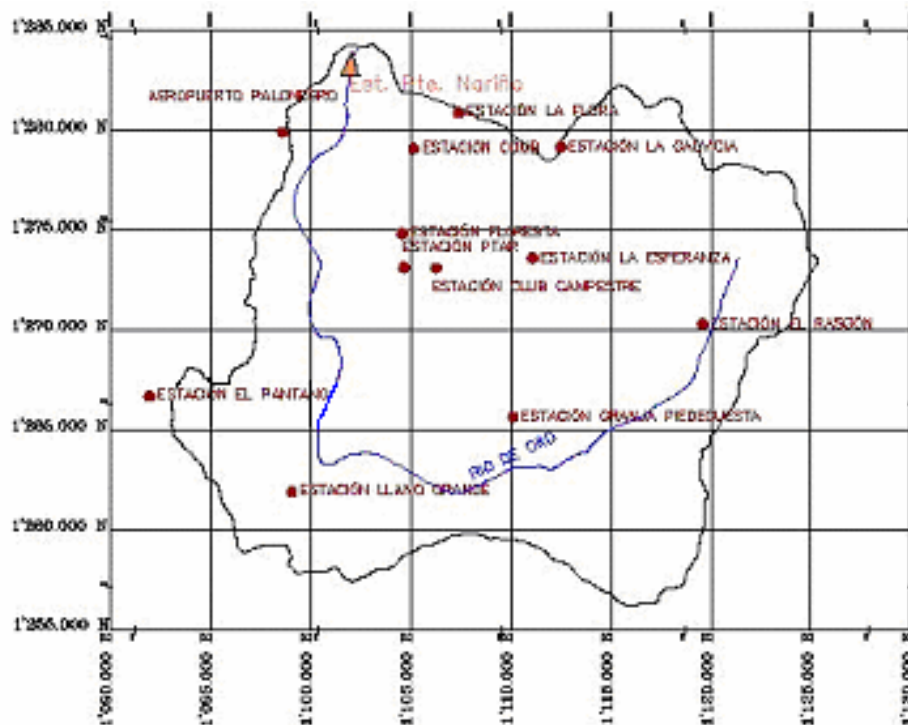
Tabla 10. Estaciones hidrológicas manejadas por el IDEAM.

NOMBRE ESTACIÓN	TIPO DE ESTACIÓN	MUNICIPIO	COORDENADAS		ELEVACIÓN (M.S.N.M)	FECHA INSTAL.
			N	E		
Aeropuerto Palonegro	SP	LEBRIJA	1279868.85	1098742.93	1189	AGO.- 74
La Galvicia	PM	FLORIDABLANCA	1279150.00	1112600.00	1779	ENERO - 68
Granja Piedecuesta	PG	PIEDRECUESTA	1265631.18	1110237.98	1000	JULIO - 70
Llano Grande	CO	FLORIDABLANCA	1261922.07	1099193.58	777	JULIO - 71
El Pantano	PM	GIRÓN	1265800.00	1094300.00	1280	NOV. - 67
La Floresta	PM	FLORIDABLANCA	1274837.01	1104693.55	925	JULIO - 78

Fuente: (Duarte ,et al, 2002)

3.4.2. Escorrentía. Los datos de escorrentía que el modelo requiere, no son estrictamente necesarios para desarrollar la simulación como tal, pero si lo son para llevar a cabo el proceso de calibración y validación. Como se mencionó anteriormente, se escogió como punto de cierre de cuenca la estación limnimétrica de Puente Nariño, la cual es monitoreada por la CDMB.

Figura 24. Cuenca del Río de Oro. Localización de las estaciones de registro: precipitación (círculos), escorrentía (triángulo).

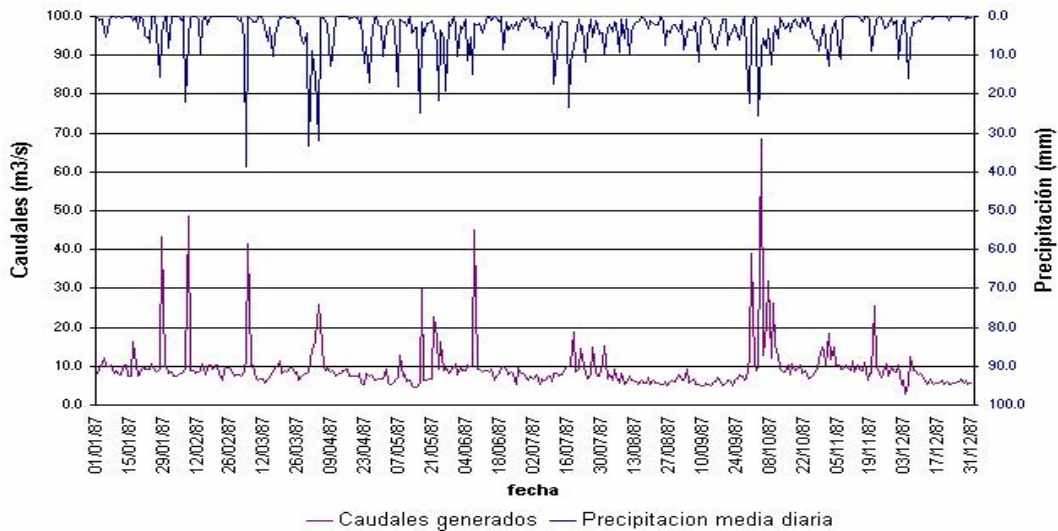


La estación de Puente Nariño está ubicada en la parte inferior del río de oro, aguas abajo de la zona de Chimita, al noroeste del área metropolitana de Bucaramanga. Su elevación es de 670 m.s.n.m. y cuenta con registros desde mayo de 1983, pero hasta el momento no cuenta con una curva de calibración. Por esta razón para el desarrollo del presente estudio fue necesario realizar la curva de calibración de la estación (Ver anexo A). Una vez realizada la curva de calibración se obtuvieron los caudales diarios para el periodo de calibración.

3.4.3. Efecto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga en el modelo.

Antes de iniciar la calibración, se vio la necesidad de representar el efecto que la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana ejercían en el modelo. Éste se desarrolló para representar el comportamiento de la cuenca del río de Oro, por lo que no se representaron las condiciones de las cuencas del río Surata y del río Tona, principales abastecedores del acueducto metropolitano de Bucaramanga; por esta razón dentro del modelo simulado la ciudad de Bucaramanga funciona como un trasvase, incorporando al sistema un incremento en los caudales del río de Oro, por medio del alcantarillado de la ciudad, el cual cuenta con un coeficiente de retorno de 0.85 (KEETELAAR,1994). El sistema de alcantarillado de Bucaramanga realiza las descargas principales de aguas residuales en el río Frío y la quebrada la Iglesia, a la vez que realiza descargas menores en las demás quebradas que atraviesan la meseta de Bucaramanga de oriente a occidente; estas descargas terminan llegando al río de Oro.

Figura 25. Hidrograma de la estación Puente Nariño para el periodo de calibración del modelo.



El sistema de abastecimiento actual del acueducto metropolitano de Bucaramanga lo conforman el río Surata y el río Tona, los cuales satisfacen las necesidades de la ciudad de Bucaramanga y una parte del municipio de Floridablanca; también el río

Frío para cubrir la parte restante de Floridablanca y el río de Oro para abastecer el municipio de Piedecuesta.

Con el fin de descontar el aporte que el sistema de alcantarillado de Bucaramanga hace a los caudales de la estación Puente Nariño, se calculó un caudal promedio de trasvase que ingresa al modelo desde el río Surata y el río Tona. Ese caudal medio se estimó entre la capacidad mínima y máxima captación y luego se afectó por el coeficiente de retorno de 0.85. De esta manera a los caudales diarios de la estación se le descontó un caudal constante de 2500 l/s. Con los nuevos caudales diarios se generó el hidrograma de calibración del modelo (ver figura 27).

Tabla 12. Sistema actual de abastecimiento del acueducto metropolitano de Bucaramanga (C.A.M.B).

SISTEMA DE ABASTECIMIENTO ACTUAL DEL C.A.M.B				
CORRIENTE	CAPACIDAD MÍNIMA (l/s)	CAPACIDAD MÁXIMA (l/s)	INFORMACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO	
			NOMBRE	CAPACIDAD (l/s)
RÍO SURATA	2000	2000	BOSCONIA	2000
RÍO TONA	750	1400	LA FLORA	1250
			MORRORICO	400
RÍO FRÍO	400	620	FLORIDABLANCA	620
RÍO DE ORO	550	550	PIEDECUESTA	550
<u>TOTAL</u>	3700	4570		4820

Fuente: (C.A.M.B,1997)

Las captaciones en el río Frío y en el río de Oro no se tuvieron en cuenta, pues recogen y depositan el agua en el mismo cauce, produciendo una intervención muy pequeña en el funcionamiento del modelo, sin embargo este es un efecto que debe ser estudiado en el futuro.

Figura 26. Puntos de captación del acueducto metropolitano de Bucaramanga y ubicación planta de tratamiento.

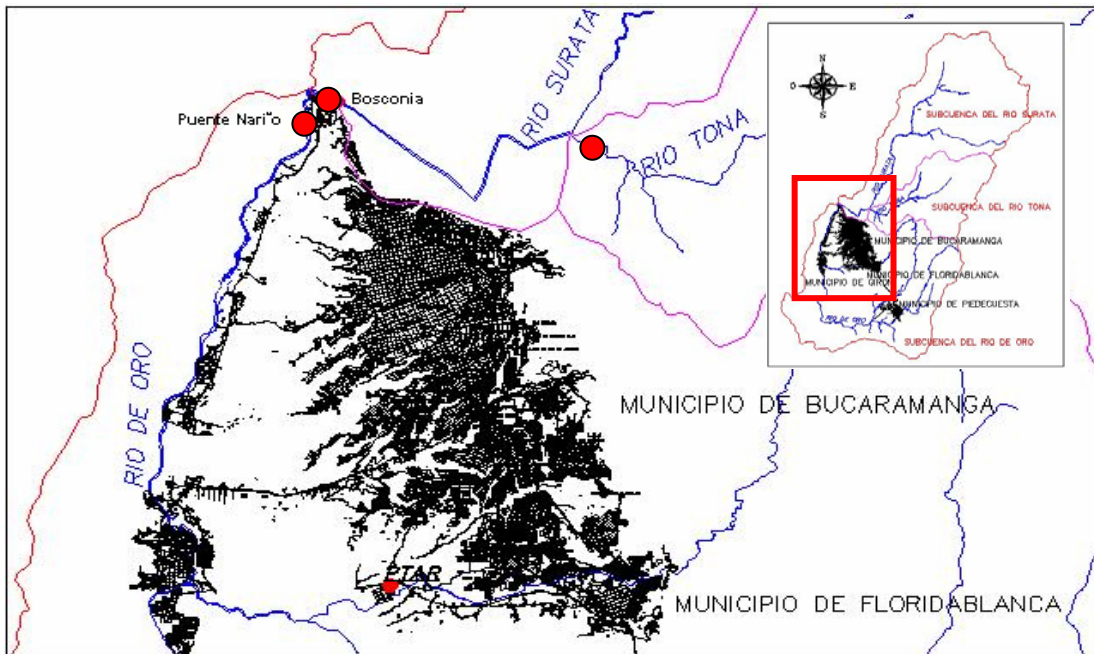
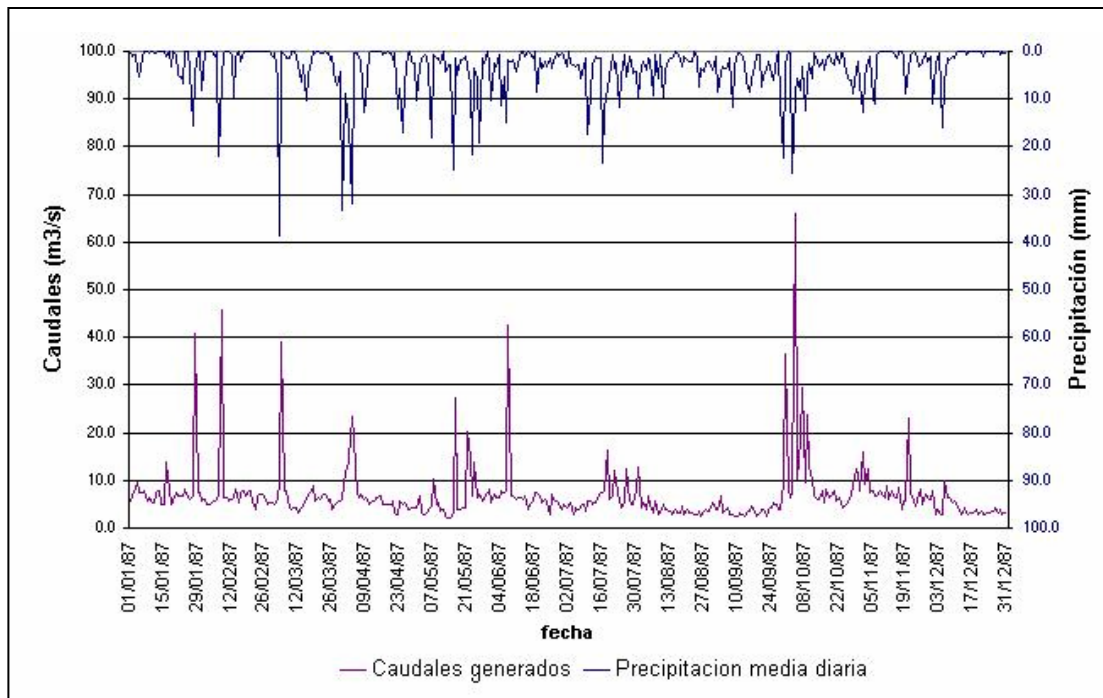


Figura 27. Hidrograma usado en la calibración del modelo



3.4.4. Evapotranspiración Potencial (ETP). Como se pudo observar en el capítulo 2, el cálculo de la evapotranspiración real (ETR) de la zona se realiza a partir del valor de la evapotranspiración potencial (ETP) y la relación de humedades presentes en el suelo (humedad presente / humedad máxima). Una de las limitaciones del modelo es que representa la ETR de la zona como un único valor característico para toda el área de estudio, lo cual no siempre es válido y sobre todo en cuenca de gran tamaño con variedad de pisos térmicos y de vegetación.

Para el desarrollo del presente estudio no se calculó directamente un valor de ETP, sino se trabajó con los valores calculados anteriormente en "UN ESTUDIO DE OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA" (Mendoza y Sandoval, 2002).

A partir del trabajo de Mendoza y Sandoval (2002), se escogieron las estaciones que se encuentran ubicadas en la cuenca del Río de Oro, luego se revisó con detenimiento las fórmulas que fueron aplicadas para estimar la ETP en cada estación y se pudo concluir que los resultados eran aceptables para el estudio. En la tabla 12 se encuentra la información general de las estaciones utilizadas.

Por la ubicación de las estaciones se puede esperar una buena representación de la ETP en la zona central de la cuenca y entre las altitudes 777 y 1950 m.s.n.m., por lo que el valor calculado aquí se tomará únicamente como una condición inicial y por medio del modelo se obtendrá uno que se ajuste más a la totalidad de la cuenca.

Tabla 13 Información general de las estaciones utilizadas en la estimación de la ETP.

NOMBRE ESTACIÓN	TIPO DE ESTACIÓN	ELEVACIÓN (M.S.N.M)	COORDENADAS		ECUACIÓN UTILIZADA	ETP (mm) MEDIA MENSUAL
			N	E		
UIS	CP	1018	1281632.7	1105933.6	Christiansen	77.33
Llano Grande	CO	777	1269700	1101500	García y López	133.04
El Rasgón	CO	1950	1270293.97	1119912.7	Turc Modificado	80.39
La Esperanza	CO	1950	1273581.60	1111228.3	Christiansen	54.49
ETP PROMEDIO DIARIA PARA TODA LA CUENCA						2.877

Fuente: (Mendoza y Sandoval,2002).

4. CALIBRACIÓN DEL MODELO

4.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de calibración de un modelo consiste en generar un ajuste en ciertos parámetros, con el fin de lograr que los resultados del modelo sean lo mas parecidos a los valores en el punto de control. Esta calibración puede ser de tipo manual ó de tipo automática; la manual es la que realiza el operador del modelo, cambiando el valor de los parámetros y observando como varía el comportamiento del modelo. La calibración automática es la que utiliza herramientas estadísticas, matemáticas (mínimos cuadrados) y computacionales para encontrar el valor que mejor se ajuste al funcionamiento del modelo.

Sin importar el tipo de calibración que se desee realizar, es necesario tener en cuenta tres factores que juegan un papel muy importante en este proceso: primero la elección de los parámetros de calibración, segundo la elección de los valores de control (ó reales) y tercero la elección del modo de evaluación de la calibración.

Los parámetros de calibración son aquellos que en el momento de la parametrización, no se pudieron representar con un grado aceptable de confiabilidad debido a la reducida ó inexistente información recolectada. Los valores de control son los que deben representar fielmente el comportamiento real de los que se están modelando, deben ser datos medidos ya sea por una estación o cualquier otro instrumento. Por último se encuentra la elección de los modos de evaluación de la calibración, los cuales pueden ser de tipo matemático, gráfico, estadístico, etc. El objetivo de estos modos de evaluación es poder apreciar que tan

aproximado ha sido el resultado de la simulación, comparando los resultados de la simulación con los valores de control.

En el presente capítulo se profundizará cada uno de los factores que intervinieron en la calibración del modelo.

4.2 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Como parámetros de calibración se tomaron las características hidráulicas, la capacidad de almacenamiento capilar, la conductividad hidráulica y los tiempos de residencia de las diferentes capas del suelo. Además también fue necesario calibrar las condiciones iniciales de humedad en el suelo.

Entre la bibliografía consultada no fue posible encontrar referencia a ensayos ó estudios realizados, donde alguno de estos valores hubiesen sido calculados. Por lo tanto, con el fin de encontrar para cada parámetro un intervalo de valores significativo, se escogieron unas condiciones iniciales de calibración al azar y luego se realizaron gráficas entre la variación de los valores y el error medio cuadrático, entre los valores simulados y los medidos en el río de Oro. En la figura 28 y la figura 29 se pueden observar algunas de estas gráficas.

Al contar con estos intervalos, se inició la calibración variando los diferentes los parámetros y observando el comportamiento de la curva de duración con los caudales reales y los caudales simulados, además verificando el comportamiento del coeficiente de Nash.

Figura 28. Variación de los valores de evapotranspiración potencial (ETP) contra el error medio cuadrático.

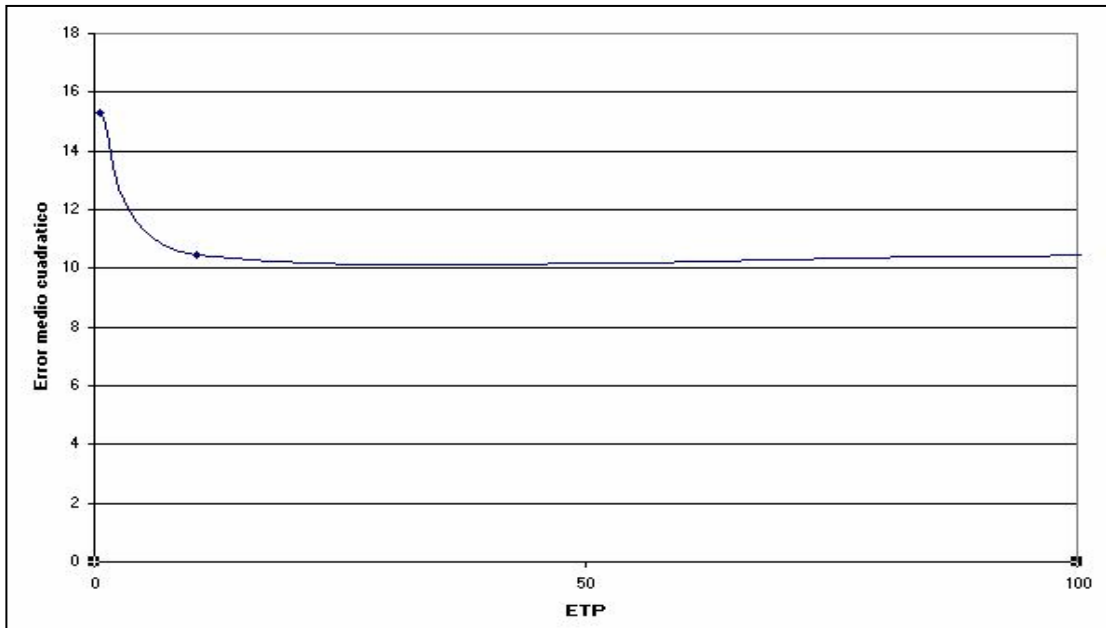
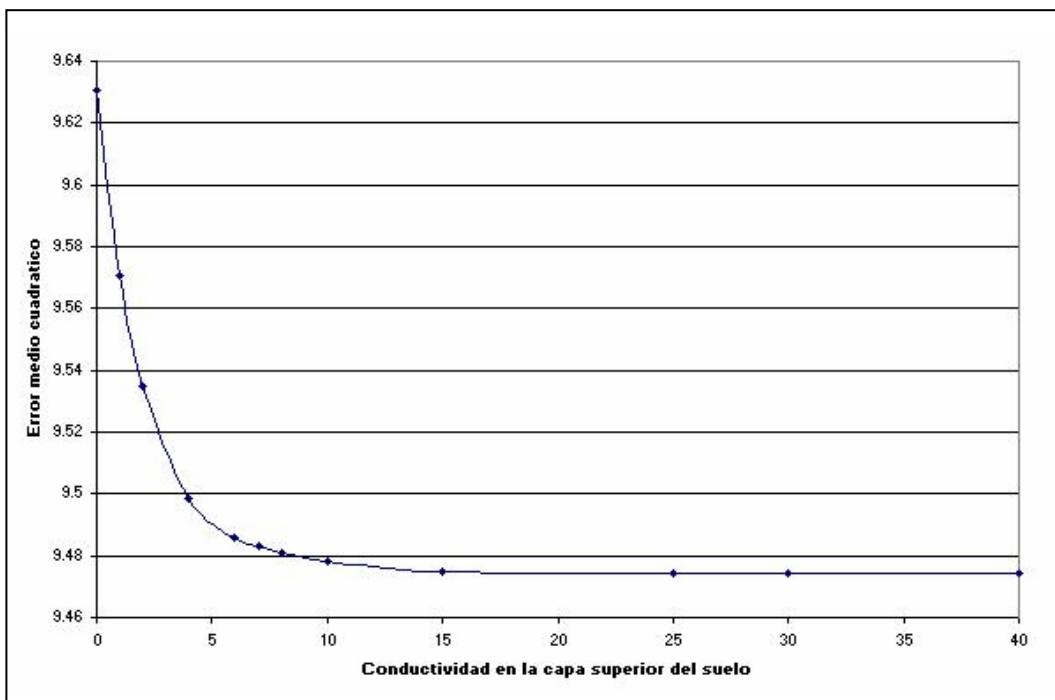


Figura 29. Variación de los valores de conductividad hidráulica en la capa superior del suelo contra el error medio cuadrático.



4.3 PUNTO DE CONTROL

Como se mencionó en el capítulo anterior, el punto de control escogido fue la estación Puente Nariño, a cargo de la Corporación Autónoma Regional para defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), la cual se ubica en la parte baja del río de Oro. Al estudiar los valores de las lecturas de mira diarias para el periodo de tiempo del estudio, se encontró que cerca del 32% del total de los datos faltaban (ver tabla 14).

Tabla 14. Datos de lecturas de mira diarias, faltantes en la estación Puente Nariño para el periodo de estudio.

% DATOS FALTANTES TOTALES:		31.54
AÑO	No DE DATOS FALTANTES	%
1987	0	0
1988	60	16.39
1989	62	16.98
1990	303	83.01
1991	151	41.36

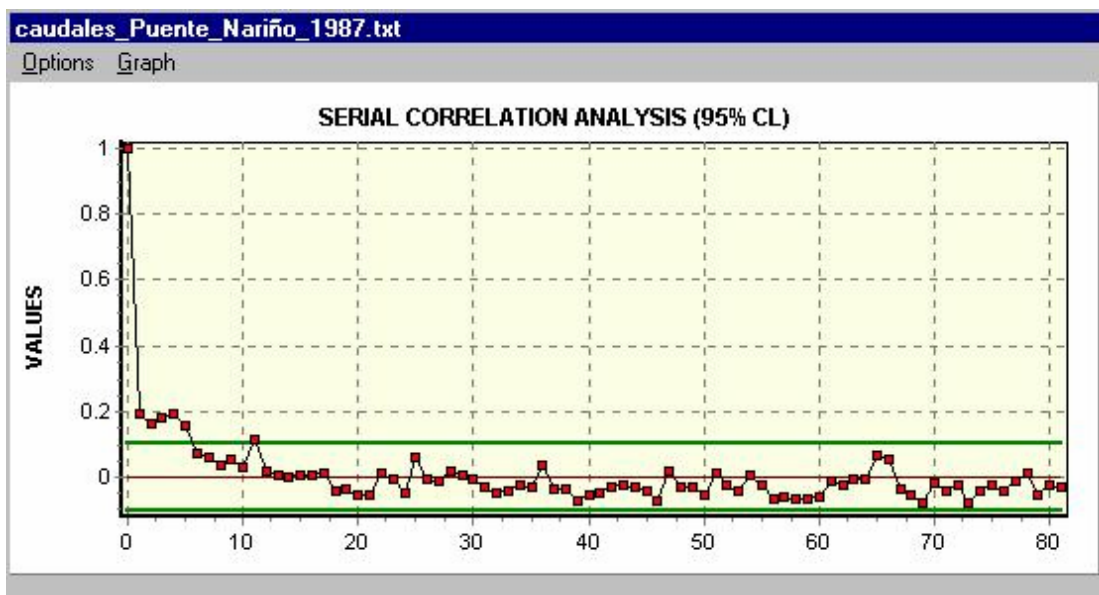
Como se puede observar en la tabla 13, el año 1987 es el único con valores de lecturas de mira diarias completas, por lo que se escogió en este trabajo como periodo de calibración. En cuanto a los datos dudosos se observó que eran los que generaban los caudales mínimos, ya que era cero uno de los dos registros diarios de la mira, pero como no se contaba con los registros originales, simplemente se localizaron en la serie de tiempo, para tenerlos en cuenta al momento del análisis.

Al realizar un análisis estadístico del comportamiento de los caudales diarios del año 1987, se encontró que tenían una baja correlación, lo que muestra cierta independencia entre los valores de la serie de datos diarios. Las series de caudales diarios en un río poseen la propiedad de dependencia entre un evento y el siguiente, por lo que el comportamiento de la serie de caudales en Puente Nariño no es muy

común en una serie de datos diarios. En la figura 30 se puede observar el correlograma realizado en el programa SPELL- stat (Chu y Guzmán ,2002), con el cual se realizó todo el análisis estadístico.

El correlograma es una herramienta estadística que permite evaluar el grado de correlación entre los datos que conforman una serie. Calcula la relación entre un dato y los que se encuentran a diferentes pasos de éste (un paso es la separación entre un dato y el siguiente), luego se agrupan y se grafican.

Figura 30. Correlograma de los caudales diarios de 1987 de la estación Puente Nariño



En el correlograma se puede observar como la correlación entre cada dato y el inmediatamente siguiente es de 0.2 y luego cae hasta cero, lo que plantea la posibilidad que algo inusual este sucediendo con la serie de datos. Por esta razón se decidió observar el comportamiento de la serie de tiempo para otros años, pero al no contar con caudales se analizó el comportamiento de los niveles medios diarios del río de Oro.

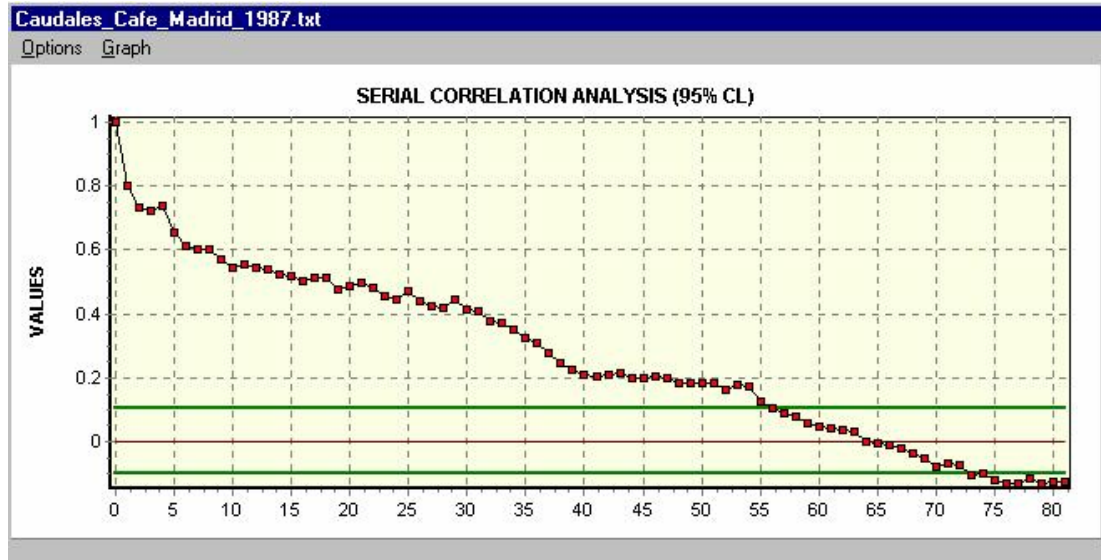
Figura 31. Correlograma de los niveles medios diarios del año 2001 y 2002 del río de Oro en la estación Puente Nariño.



El comportamiento de los niveles del río de Oro en la misma estación en los años 2001 y 2002, es muy similar al que presentan los datos de caudales del año 1987. Con el fin de comprender si este comportamiento anómalo se desarrollaba en todo el río, se analizaron los caudales aguas abajo en la estación Café Madrid. Esta estación registra el comportamiento del río Lebrija (unión del río de Oro con el río Surata) y se ubica 5 Km aguas abajo de la estación Puente Nariño.

Los caudales diarios registrados en la estación Café Madrid, muestran un comportamiento dependiente entre sí, con un coeficiente de correlación de 0.8 entre un dato y el que le sigue, luego el valor de este coeficiente va disminuyendo lentamente a medida que la separación entre los días (paso) aumenta. Este comportamiento es el que se esperaría en cualquier serie de caudales diarios, lo que confirma un comportamiento inusual del río de Oro en las cercanías a la estación Puente Nariño.

Figura 32. Correlograma de los caudales diarios del año 1987 en la estación Café Madrid.



Dado que éste comportamiento inusual en el río de Oro no ha sido documentado previamente, conforme se deduce de la lectura de la bibliografía consultada, a lo que se le agrega el bajo grado de precisión en las mediciones de la estación limnométrica y el poco conocimiento de las condiciones operativas de la estación, solo es posible en el presente estudio plantear algunas hipótesis que podrían explicar dicho comportamiento, las cuales deben ser probadas o descartadas por futuros estudios más detallados de la estación.

- La estación Puente Nariño se encuentra ubicada en la parte baja del río de Oro, en donde el río ya ha recogido las descargas del agua proveniente de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, las cuales llegan a éste por medio de las quebradas que atraviesan la ciudad y por los drenes y demás estructuras de conducción de agua, ubicadas en la zona de escarpa de la meseta. De esta manera se podría atribuir el comportamiento inusual del río en la parte baja, a una fuerte intervención antrópica, causada por la ciudad de Bucaramanga.

- Por otra parte la estación fue instalada en el año 1982 y cuenta con registros de niveles a partir de mayo de 1983 (Suárez, 1997); hasta octubre del 2001 se le habían realizado cerca de 120 aforos, pero actualmente no se cuenta con una curva de calibración para la estación; a demás dentro de los registro diarios se encuentran meses completos donde no se realizaron las lecturas de mira (ver tabla 14).

Todo lo anterior podría reflejar cierto grado de desinterés en las mediciones de la estación, a demás de un desconocimiento de las condiciones reales de la misma. De ésta manera el río de Oro podría tener realmente un comportamiento muy diferente al registrado por la estación.

4.4 CONTROLES EN LA CALIBRACIÓN

Con el fin de evaluar el proceso de calibración se utilizó el coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970, citado por Chu, 2003), por medio del cual se puede calcular el grado de correlación entre los valores que resultan de la simulación y los valores medios medidos, es decir para el caso de este estudio describe la forma del hidrograma medio de la cuenca.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2}$$

donde:

Qobs: Caudales medidos en la estación de aforo.

Qsim: Caudales simulados.

Qobs: Caudal medio observado.

Al ser un coeficiente de correlación puede tomar valores entre -1 y 1 , de los cuales los valores negativos no se tienen en cuenta y los positivos representan el grado de relación entre la serie de valores simulados y los valores que han sido medidos y se

consideran reales. La ventaja del coeficiente de Nash comparada con otros coeficiente de correlación se encuentra en que el grado de ajuste que se estima es entre los datos simulados y el valor medio de los datos medidos (reales); de esta manera permite buscar mas fácilmente un buen ajuste a los valores medios reales.

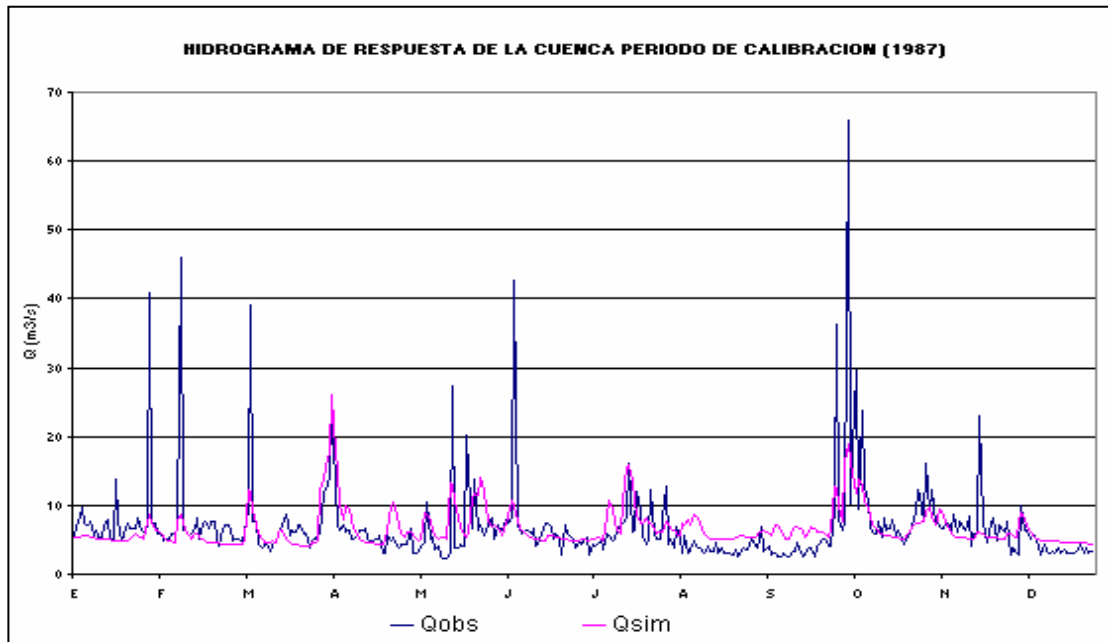
Como se puede observar en la figura 31, en el proceso de calibración no fue posible representar los caudales extremos del río, ni los máximos, ni los mínimos. El coeficiente de Nash estimado fue de 0.25, lo cual es resultado de ésta pobre representación de los valores extremos.

La deficiente representación de los caudales máximos del río se debió a que el modelo requiere que la información de los eventos a simular sean de un orden menor al diario (horas, minutos), para poder representar mejor el comportamiento de la respuesta rápida (escorrentía superficial), que en el caso de los eventos extremos es la que realiza el aporte al caudal pico del río.

Por otra parte en cuanto a los caudales mínimos, generar un buen ajuste se dio por descontado, debido a que en la serie de valores que se utilizaron en la calibración, en general tales datos, fueron considerados dudosos, ya que alguna de las dos lecturas que se registraron en la estación para esos días no correspondían a un comportamiento normal del río. De esta forma se busco en la calibración, representar lo mejor posible el comportamiento de los caudales medios del río.

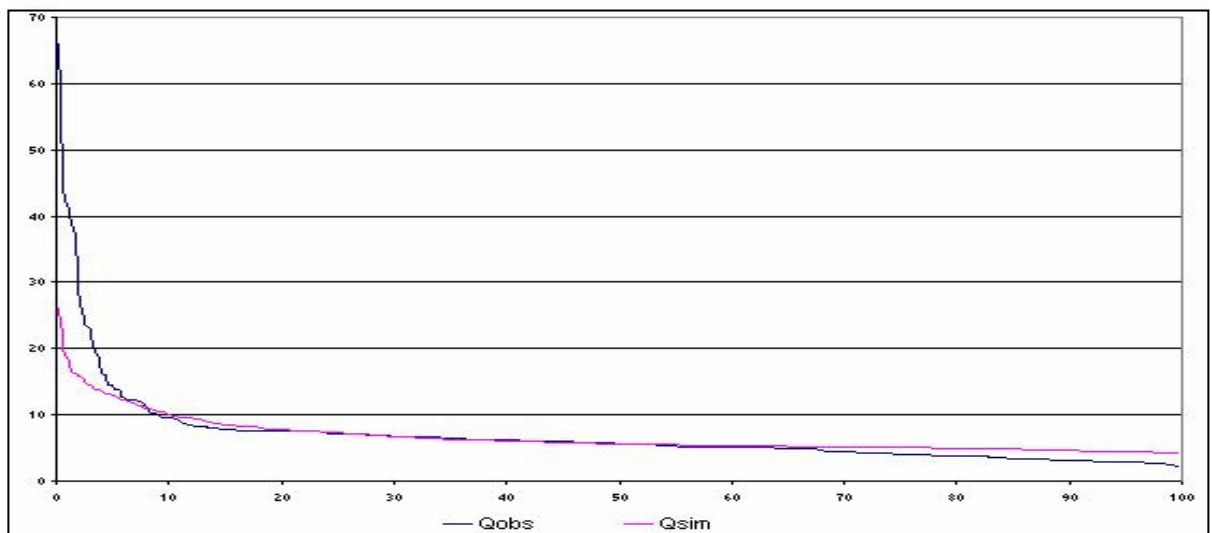
En la figura 33 se puede observar como el modelo representa de una manera muy clara la forma de las recesiones y los caudales medios en la cuenca. Al comparar las curvas de duración (figura 34) de la cuenca para los caudales observados y los caudales simulados se pudo observar que se representaba de una manera muy clara los caudales para probabilidades entre 20 y 70%. Por otra parte se pudo observar la diferencia en el comportamiento de los caudales extremos, las series analizadas.

Figura 33 Hidrograma de respuesta de la cuenca del río de Oro para el periodo de calibración.



Los parámetros que se le introdujeron al modelo mediante el proceso de calibración se encuentran consignados en el anexo. De igual forma también se puede observar allí, la estructura de los archivos utilizados en la simulación.

Figura 34 Curvas de duración para los caudales observados y los caudales simulados.



5. RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Al concluir el proceso de calibración se procedió a realizar la simulación diaria para todo el intervalo de tiempo del estudio (1986 –1991). Una vez concluida la simulación, los resultados se dividieron en tres grupos. Primero se analizaron los parámetros del suelo, donde se obtuvieron valores de almacenamiento capilar, conductividad hidráulica y tiempos de residencia. El segundo grupo de resultados corresponde a la distribución de las componentes de la escorrentía, donde se puede observar el aporte del flujo superficial, subsuperficial y subterráneo, al cauce principal. Por último se analizó el comportamiento de la evapotranspiración real y la recarga en la zona de estudio.

5.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO ENCONTRADAS EN LA SIMULACIÓN.

Como se mencionó en el capítulo 3, debido a las condiciones tan heterogéneas en cuanto a la estructura, conformación y el uso del suelo, el área de estudio se dividió en macro zonas, cuyo comportamiento hidráulico se esperaba fuese similar.

Al realizar la calibración manual del modelo se encontraron valores de almacenamiento capilar ($r(1)$), infiltración (conductividad hidráulica capa superior del suelo $r(3)$) y percolación (conductividad hidráulica capa inferior del suelo $r(5)$), los cuales se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de la zona de estudio, por medio de los coeficientes que caracterizaron cada una de las macro zonas. Los coeficientes también se obtuvieron por medio de la calibración (ver tabla 15).

En las figuras 36 ,37 y 38 se pueden observar la forma como se distribuyen los valores de almacenamiento en el suelo, al igual que los valores de conductividad hidráulica tanto de la capa superior como de la capa inferior del suelo, calculados por medio de la calibración del modelo.

Por otra parte en el proceso de calibración se obtuvieron los valores para los tiempos de residencia del agua, en las diferentes capas que representan el funcionamiento del suelo en el modelo. De esta manera se encontró un tiempo de residencia para el flujo superficial de 2 días, para el flujo subsuperficial de 100 días y para el flujo base de 400 días. Estos valores son aún preliminares y requieren ser corroborados con ensayos de campo y estudios más detallados, pero pueden ser el punto de partida para futuros estudios de simulación hidrológica.

La división en macro zonas se realizó a partir de los mapas de geología, geomorfología y uso de suelo. Para hacer una clasificación más precisa del suelo y su cobertura en los distintos aspectos requeridos por el modelo, es necesario hacer un trabajo de campo con ensayos o pruebas que arrojen resultados cuantitativos que permitan construir mapas para su posterior clasificación en categorías. Este tipo de ensayos queda fuera del alcance de este trabajo y es el paso a seguir en futuras investigaciones.

En la figura 36 se puede observar que como era de esperarse la capacidad de almacenamiento capilar es muy bajo (35 mm) en la zona urbana, debido a que esta zona se encuentra fuertemente intervenida y la vegetación es muy escasa. En cuanto a las otras 2 zonas (cultivos y bosques) se encontraron valores de capacidad de almacenamiento mas altas (1050 mm y 700 mm respectivamente), lo cual es necesario estudiar con mayor profundidad en estudios futuros, debido a que se encontró mayores valores en la zona de cultivos que en los bosques, que era lo que se esperaba encontrar.

Figura 35 Esquema del modelo de tanques.

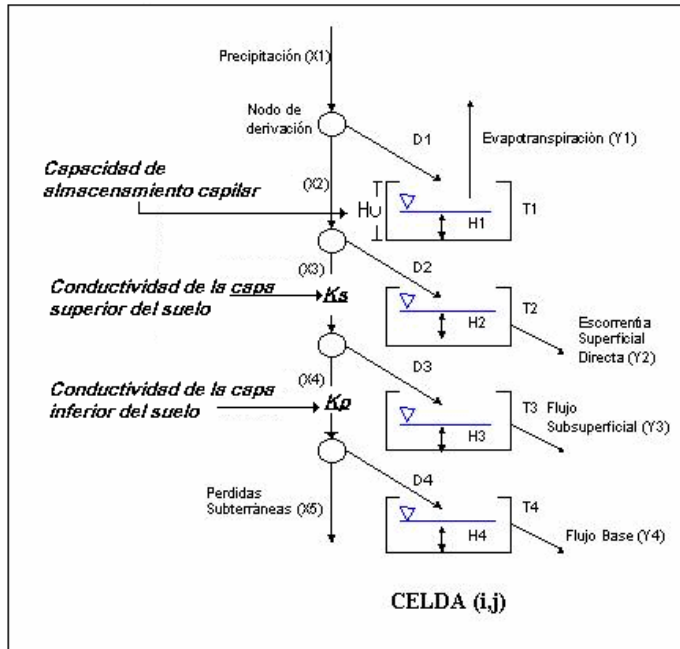


Figura 36. Valores de almacenamiento capilar del suelo (mm), en la cuenca del río de Oro.

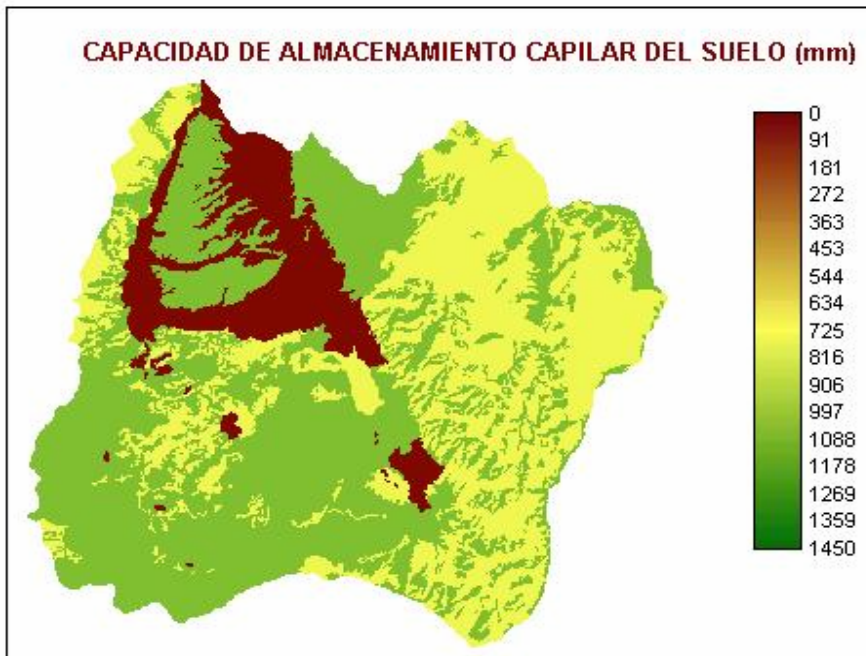
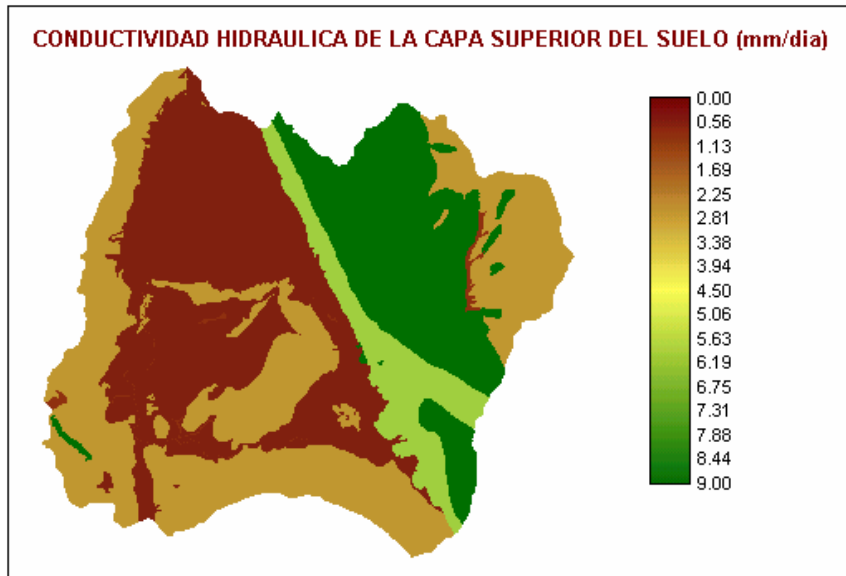


Figura 37. Valores de conductividad hidráulica en la capa superior del suelo (mm / día), en la cuenca del río de Oro.



En cuanto a la conductividad hidráulica de la capa superior del suelo, el modelo representó con los mismos valores la zona de depósitos aluviales en la parte central de la cuenca donde agrupó el comportamiento de la parte urbana con el resto de la zona aluvial, donde se encontraron los menores valores de conductividad. Los mayores valores de conductividad hidráulica se encontraron en la zona media del macizo de Santander donde se encuentran los suelos meteorizados y en la zona alrededor de la falla Bucaramanga – Santa Marta.

La conductividad hidráulica para la capa inferior del suelo se comportó de manera contraria a la de la capa superior ya que los mayores valores se encontraron en la parte de central de la cuenca, donde se ubican los depósitos aluviales.

Figura 38. Valores de conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (mm / día), en la cuenca del río de Oro.



Tabla 15 Valores de las características hidráulicas del suelo, obtenidas en la calibración.

ALMACENAMIENTO CAPILAR DEL SUELO (mm)	
<u>MACRO ZONA</u>	<u>VALOR</u>
URBANA	35
CULTIVOS HERBÁCEOS	1050
BOSQUES	700
CONDUCTIVIDAD CAPA SUPERIOR DEL SUELO (mm / día)	
<u>MACRO ZONA</u>	<u>VALOR</u>
URBANA	0.6
LECHO FLUVIAL	0.4
TERRAZA ALUVIAL	0.6
DE FALLA	6
SUELOS METEORIZADOS	9
SUELOS ARENOSOS - ARCILLOSOS	2.7
CONDUCTIVIDAD CAPA INFERIOR DEL SUELO (mm /día)	
<u>MACRO ZONA</u>	<u>VALOR</u>
ÍGNEA-METAMÓRFICAS- SEDIMENTARIA	0.6
ALUVIAL	1.4

5.3 COMPONENTES DE LA ESCORRENTÍA

Para el análisis de la información hidrológica resultante del modelo se decidió que el estudio se realizaría por años hidrológicos, el cual inicia alrededor del mes de marzo. De esta manera los resultados se agruparon de marzo a febrero de cada año, iniciando con marzo de 1986 y concluyendo el estudio con diciembre de 1991.

El periodo de estudio fue un periodo predominantemente seco, donde los caudales del río de Oro disminuyeron considerablemente (Roa,1992). Este comportamiento se puede observar en los caudales simulados, donde a partir del año 1989 se nota una fuerte tendencia a la disminución en la magnitud de los caudales, que continuo en los primeros años de la década de los 90.

La Figura 36, muestra el aporte de cada una de las componentes de la escorrentía (flujo superficial = Y2, flujo subsuperficial = Y3 y flujo subterráneo = Y4) al caudal total (en este caso el caudal simulado).

Como se puede en la figura 39, la componente subterránea (Y4) con la componente subsuperficial (Y3) controlan las recesiones y los caudales mínimos. Por otra parte la componente superficial (Y2) es la encargada de representar los picos en los caudales diarios.

En las figuras 40 y 41, se puede observar los valores promedio de cada una de las diferentes componentes de la escorrentía y porcentaje con respecto al caudal total simulado. De acuerdo con estos valores el aporte principal lo hace el flujo base (escorrentía subterránea) con el 41%, seguido del flujo Subsuperficial con el 36% y por último se encuentra el flujo superficial con el 23 %.

Figura 39. Aporte de las diferentes componentes de la escorrentía al caudal total simulado.

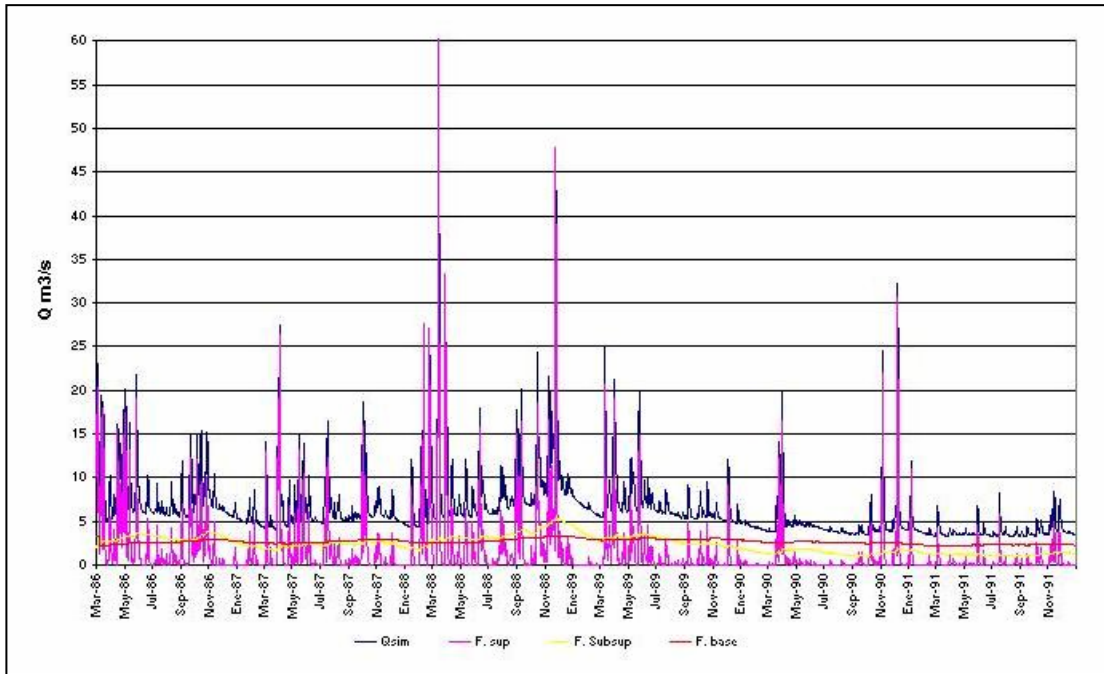


Figura 40. Aporte (m3/s) de las diferentes componentes de la escorrentía.

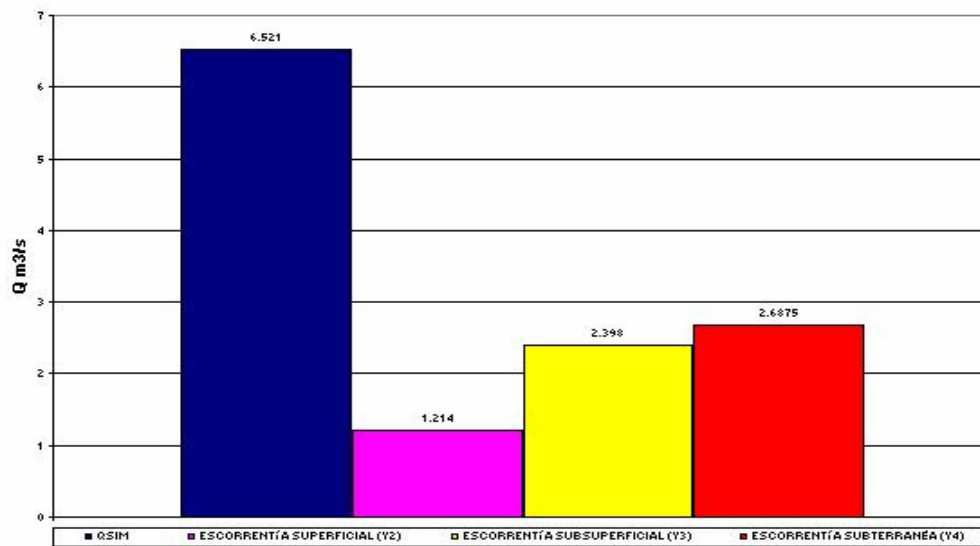
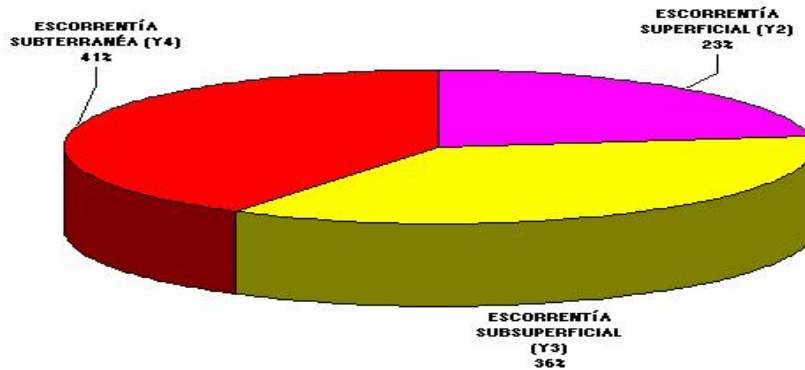


Figura 41. Aporte (en %) de las diferentes componentes de la escorrentía.



5.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

Como se mencionó en el capítulo tres la evapotranspiración en la zona de estudio, se tomó también como una variable para calibrar el modelo. El modelo calcula la evapotranspiración real (ETR) a partir de la evapotranspiración Potencial (ETP) y de la relación entre la humedad del suelo y la humedad del suelo a la capacidad de campo; dicha relación de humedades son representadas por el agua existente en el tanque 1 y la capacidad máxima de dicho tanque. La Tabla 16 y la Figura 42 presentan los resultados de la ETR (Y1) media mensual (mm), calculados por el modelo, los valores de la precipitación (X1) media mensual (mm) y el porcentaje de lluvia que anualmente se convierte en evapotranspiración.

De acuerdo a los resultados, para el mes de enero y diciembre la ETR es mayor que la precipitación, lo cual es debido a que el modelo calcula la ETR en función de la cantidad de agua almacenada en el tanque 1 y no exclusivamente de la cantidad de lluvia que cae en el período modelado. Así, la ETR media anual es de 956.4 mm/año y la precipitación media anual es de 1261.17 mm/año, lo que significa que el 75% de la lluvia anual se convierte en evapotranspiración. Estos valores de ETR se compararon con los resultados obtenidos en el trabajo de Maradai y Rojas

(2002), donde se realizó un balance hídrico anual para la cuenca superior del río Lebrija y la ETR estimada fue de 850 mm/año en la cuenca del río de Oro, un valor no muy lejano del obtenido en el presente estudio, que fue de 900 mm/año.

Figura 42. Precipitación y ETR media mensual en la cuenca del río de Oro.

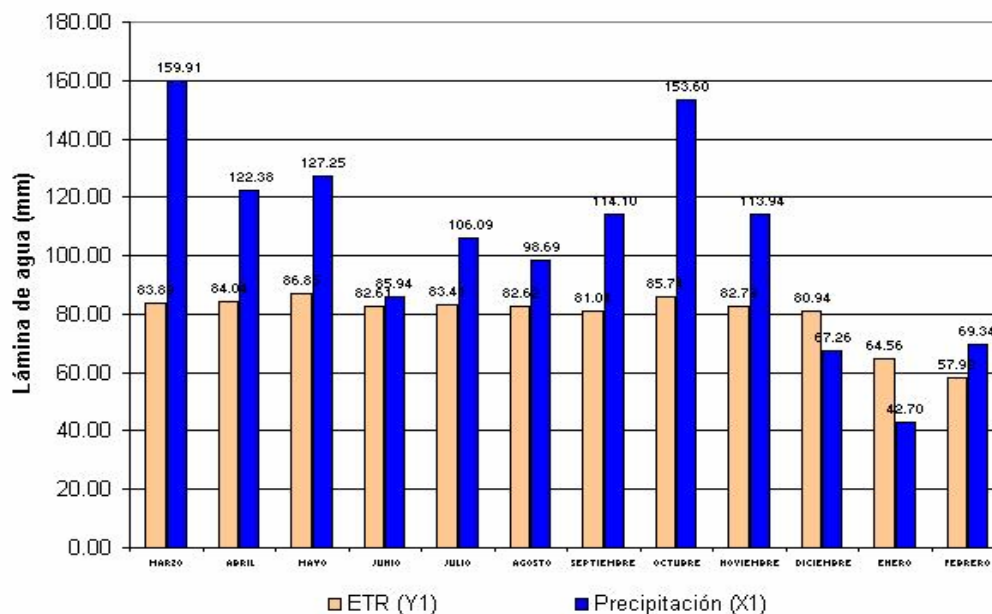
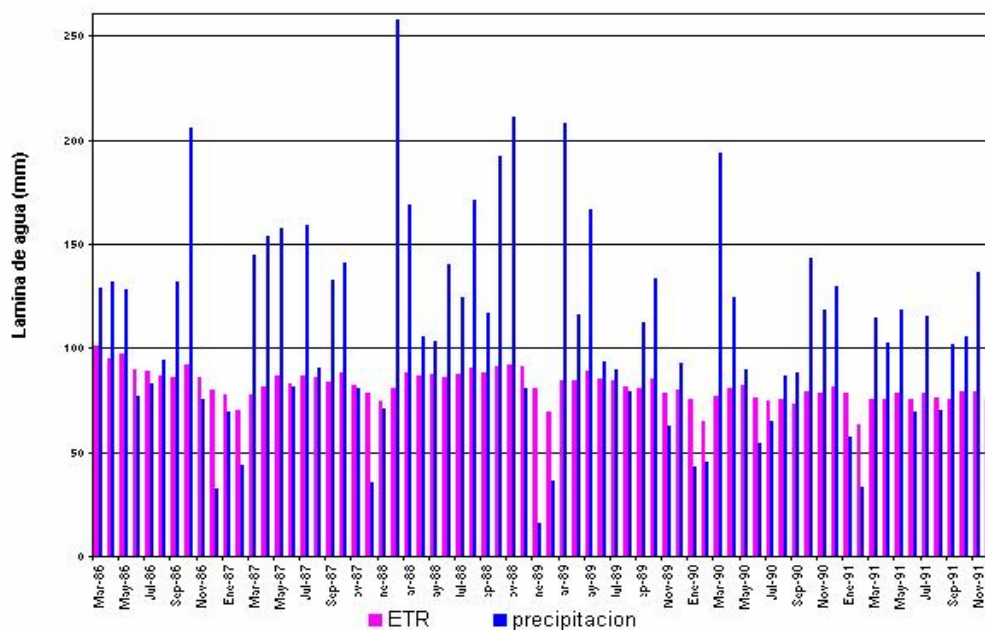


Figura 43. Variación de la ETR media mensual para el periodo de estudio.



5.5 LA RECARGA

La magnitud de la recarga de un acuífero 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 modelo de tanques considera que el agua que ingresa en el tanque 4 en cada intervalo de tiempo es igual a la que viene viajando por el conducto distribuidor (x_{4t}) menos las pérdidas subterráneas (x_{5t}). En el presente estudio las pérdidas subterráneas se anulaban, por lo que la recarga ó infiltración efectiva se consideró igual a x_{4t} .

En la zona la recarga promedio anual es igual a 124.74 mm/año, mientras que la precipitación media anual tiene un valor de 1261.17 mm/año, lo que significa que aproximadamente el 10% de la precipitación anual se convierte en recarga (Tabla 17). Este valor de recarga es algo bajo, pero como se mencionó anteriormente, el estudio se realizó en un periodo seco, donde la precipitación en la zona disminuyó por causa del fenómeno del Niño.

Como se puede observar en la figura 44, el comportamiento de los valores de la recarga en la cuenca es bimodal y corresponde al comportamiento de la precipitación como habría de esperarse. Los niveles mas bajos se presentan en los meses de Diciembre a Febrero, los cuales corresponden al periodo del verano mas fuerte en la zona.

La máxima recarga se alcanza en el mes de octubre, tiempo en el cual el invierno alcanza su nivel máximo en la zona de estudio, además en los meses de agosto y septiembre se presentan precipitaciones considerables, las cuales aumentan los niveles de humedad en el suelo, permitiendo que el agua que se infiltra pueda continuar su camino hacia el acuífero.

Figura 44. Variación de la recarga media mensual multianual en la cuenca del río de Oro para el periodo de estudio.

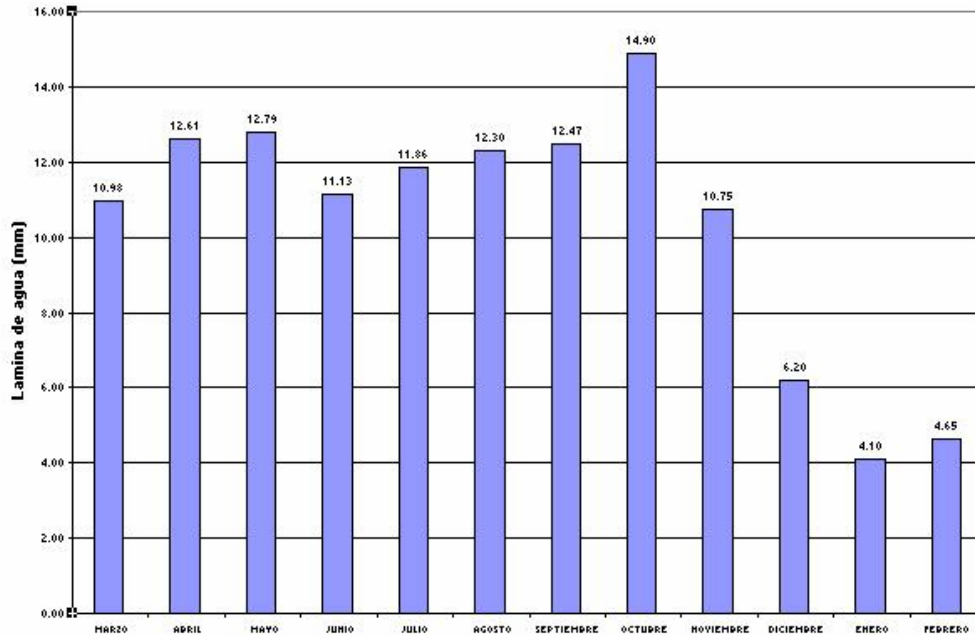


Figura 45. Variación de la recarga mensual en el periodo de estudio.

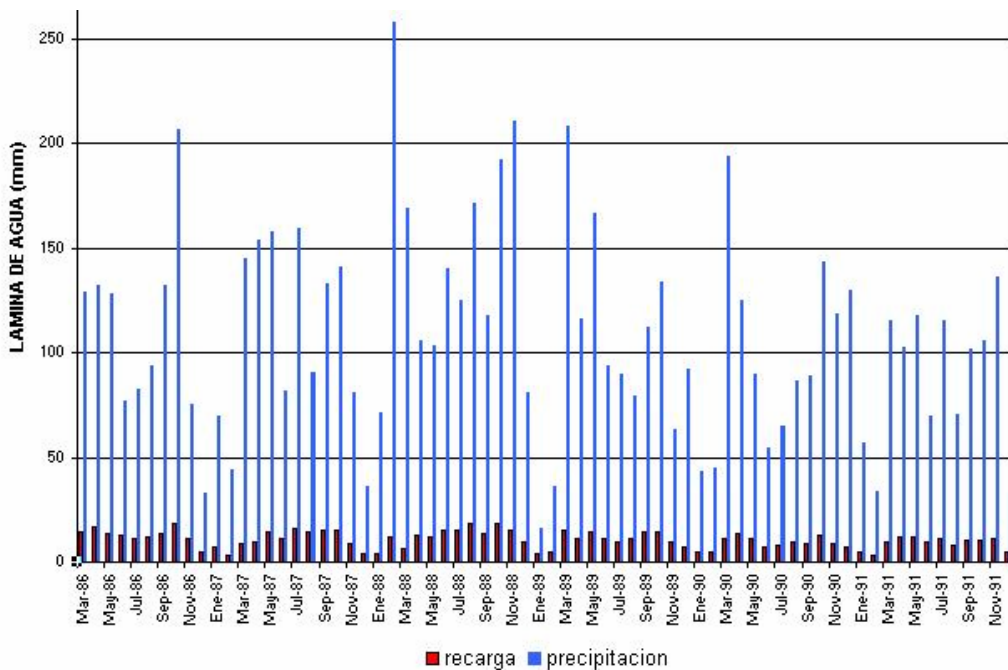


Tabla 16. ETR media mensual y anual (mm) en la cuenca del río de Oro para el periodo de estudio.

Evapotranspiración potencial estimada en la calibración (r2):											3.8 mm / día		
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Y1 media	64.55	57.91	83.88	84.04	86.85	82.61	83.40	82.63	81.04	85.74	82.79	80.94	956.40
Pptn (X1)	42.70	69.33	159.91	122.38	127.25	85.94	106.09	98.68	114.10	153.60	113.93	67.26	1261.17
%	1.51	0.84	0.52	0.69	0.68	0.96	0.79	0.84	0.71	0.56	0.73	1.2	0.75

Tabla 17. Recarga media mensual y anual (mm) en la cuenca del río de Oro para el periodo de estudio.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
X4 media	4.09	4.65	10.98	12.61	12.79	11.13	11.86	12.29	12.47	14.90	10.70	6.20	124.74
Pptn (X1)	42.70	69.33	159.91	122.38	127.25	85.94	106.09	98.68	114.10	153.60	113.93	67.26	1261.17
%	9.59	6.71	6.86	10.30	10.05	12.95	11.17	12.45	10.93	9.70	9.43	9.22	9.89

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- En el proceso de calibración se encontró que los caudales medios y máximos responden sensiblemente a cambios en el parámetro de permeabilidad hidráulica saturada de la capa superior del suelo y los tiempos de residencia de los flujos subsuperficial y superficial, mientras que las recesiones o caudales mínimos se ven afectados por cambios en la conductividad hidráulica saturada de la capa inferior del suelo y el tiempo de residencia del flujo subterráneo.
- El modelo, es bastante sensible a los datos de precipitación y la evapotranspiración potencial. Debido a esto, se obtendrán mejores resultados mientras más largos sean los períodos de registro y mejor sea la calidad en su obtención.
- En la cuenca del río de Oro, se pudo observar que el mayor aporte a los niveles del cauce principal provienen del flujo base (41 %) con una fuerte colaboración del flujo subsuperficial (36%) y un menor aporte del flujo superficial (2.3%). Se observó además una presencia permanente de la componente Subsuperficial, la cual se encarga de representar las recesiones.
- Al analizar la evapotranspiración real simulada por el modelo (Y1) se puede apreciar que fue del orden del 70% (956.4 mm) de la precipitación media anual y presentó un comportamiento bimodal al igual que la lluvia. Además, se encontró que para el mes de enero, la ETR es mayor que la precipitación, lo cual es debido a que el modelo calcula la ETR en función de la cantidad de agua almacenada en el tanque 1 y no exclusivamente de la cantidad de lluvia que cae en el delta de tiempo empleado, en este caso 1 día.

- Al analizar el comportamiento de la recarga (X4) en el modelo, se pudo observar que fue alrededor del 10% (124.74 mm) de la precipitación media anual. Los meses con menores valores de recarga fueron enero y febrero, coincidiendo de esta manera con los meses de verano en la zona. También se observó un comportamiento bimodal en la recarga, que coincide con el comportamiento del régimen de lluvias de la región.

6.2 RECOMENDACIONES

- Para hacer una clasificación más fina del suelo y su cobertura en los distintos aspectos requeridos por el modelo, es necesario hacer un trabajo de campo con ensayos o pruebas que arrojen resultados cuantitativos que permitan construir mapas para su posterior clasificación en categorías. Este tipo de ensayos queda fuera del alcance de este trabajo y es el paso a seguir en futuras investigaciones.
- Es necesario para futuras investigaciones evaluar la respuesta del modelo al considerar los tanques como embalses no lineales al momento de efectuar los cálculos de los caudales producidos en cada uno de ellos. Por otra parte se debe realizar la validación del modelo puesto que quedó fuera del alcance de este proyecto.
- Se recomienda realizar un estudio detallado del comportamiento de la estación limnimétrica de Puente Nariño, el cual permita conocer la razón del comportamiento tan irregular del cauce del río de Oro en sus cercanías.
- Para facilitar el desarrollo de futuros estudios se recomienda ampliar y mejorar la red de monitoreo hidrológico en el área de la cuenca del río de Oro. Asimismo, se sugiere continuar con la validación de metodologías para la estimación de recarga en el área de estudio, con el fin de alcanzar un mejor conocimiento hidrológico de la zona.

7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

BELTRÁN, R., y REY, A., 2002. Comportamiento estructural asociado al sistema de fallas Bucaramanga –Santa Marta y diaclasas, para definir una red de drenaje subterráneo en el macizo de Santander, sección entre Piedecuesta (río de oro) y Bucaramanga (río Suratá). Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 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.

-----, **1981.** Estudio de desarrollo integral de la cuenca superior del río Lebrija, Tomo II, Bucaramanga.

COMPAÑÍA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA, C.A.M.B., 1997. Proyecto de nuevos abastecimientos de acueducto para el área metropolitana de Bucaramanga, Bucaramanga.

CUSTODIO, E., 1997. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En: La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. Editado por: Custodio E., Llamas M. R. y Samper J.. Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Español e Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 455p.

DUARTE, D.R., 2002. Estudio de valores extremos de precipitación en la cuenca del río de Oro. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

DUARTE, J.E., GÓMEZ, S., y VARGAS, W., 2002. La precipitación en la cuenca superior del río Lebrija. Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander. 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/> >.

GARZÓN, L., y NIÑO, E., 2003. Estudio de curvas de recesión en la cuenca superior del río Lebrija. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

GÓMEZ, S., 2002. Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el Macizo de Santander e identificación de acuíferos. Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

INGENIERÍA DE SUELOS, 1988. Estudio de factibilidad para la explotación de aguas subterráneas, Bucaramanga.

-----, 1997. Recopilación y Análisis de Información Secundaria Geohidroclimática en el Área de Jurisdicción de la C.D.M.B. Bucaramanga.

INSTITUTO DE DESARROLLO DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES, INDERENA, 1969. Proyecto Para la Ordenación de la Cuenca Superior del Río Lebrija. Volumen 5, Estudios Físicos I. Bucaramanga.

INSTITUTO DE HIDROLÓGICA METEREOLÓGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM, 1999. Sistema de información, componente hidrológico, redes, mediciones, observaciones y procesos básicos, Bucaramanga.

JARAMILLO, M., 2003. Estudio de interacción acuífero – río como soporte metodológico en la estimación de caudales mínimos. Tesis de Maestría, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

KEETELAAR, C., 1994. Saneamiento ambiental en el área metropolitana de Bucaramanga, plan integral de saneamiento ambiental 1995 – 2010, C.D.M.B., Bucaramanga.

MARADAI, Z., y ROJAS, J., 2002. Distribución espacial de variables hidrológicas en la cuenca superior del río Lebrija utilizando geoestadística, Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

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

PÉREZ, D., 1995. La explotación del agua subterránea, un nuevo enfoque, Editorial Científico – Técnica, La Habana.

- ROA, J. M., 1992.** Estudio de caudales en el río de Oro. Corporacion Autonoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga, C.D.M.B., Bucaramanga.
- SAMPER, C. J.,1997.** Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Editado por: Custodio E., Llamas M. R. y Samper J.. Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Español e Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 455p.
- SÁNCHEZ, I., SARMIENTO, M., 2003.** Revisión de metodologías para la estimación de la recarga en acuíferos, mediante balances de agua, Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- SHRESTHA, I., 2003.** Conceptual data – drive hidrogical modelling of Basmati river basin, Nepal, IHE, DELFT.
- 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.
- VÉLEZ, M.V., 1999.** Hidráulica de aguas subterráneas, Posgrado en aprovechamiento en recursos hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

ANEXOS

ANEXO A

CURVA DE CALIBRACIÓN DE LA ESTACIÓN PUENTE NARIÑO

Para realizar la curva de calibración de la estación se contó con los registros de los aforos realizados en dicha estación a partir de junio de 1986, hasta agosto de 1990. Fueron un total de 41 aforos de los cuales solo 5 contaban nivelación topográfica. Esta información fue facilitada por la Subdirección de Normatización y Calidad Ambiental de la CDMB.

La curva de calibración de la estación es la forma como se puede relacionar el nivel de un río con el caudal que este lleva en un punto determinado. Esta relación es del tipo:

$$Q = a * (H - H_0)^b$$

donde:

Q: Caudal en el aforo.

H: Nivel en el aforo.

H₀: Nivel en el cual el caudal se considera cero.

a y b: Parámetros propios de las condiciones de la estación.

Como se puede ver en la expresión anterior para poder caracterizar una estación limnimétrica es necesario calcular los parámetros H₀, a y b. El valor de a y b pueden estimarse por medio de una regresión con mínimos cuadrados, en cambio el valor de H₀ requiere un poco mas de trabajo para ser calculado.

Para el presente estudio el parámetro H_0 se calculó por medio del método logarítmico expuesto en el documento “Sistema De Información, Componente Hidrológico, Redes, Mediciones, Observaciones Y Procesos Básicos”, realizado por la Subdirección de Hidrológica del IDEAM en 1999. A continuación se realizará un breve resumen de la forma como se realizó el cálculo.

Primero se graficaron en escala logarítmica los valores de los niveles y los caudales obtenidos en los diferentes aforos, considerando a H_0 igual a cero. Como la gráfica no describió exactamente una línea recta, fue necesario por medio de una hoja de cálculo buscar el valor de H_0 que mejor ajustara la serie de datos. Claro está que también se tuvo en cuenta un perfil tipo de la sección transversal del río en el sitio de la estación, que se escogió entre los perfiles topográficos levantados en algunos de los aforos que se le realizaron a la estación.

Una vez se obtuvieron los valores de H_0 , a y b , se procedió a realizar la evaluación de la estabilidad de la curva de gasto de la estación. Esta evaluación consiste en estimar que tan grande es la dispersión en los caudales estimados con la curva y los caudales medidos en el aforo, dicha dispersión puede ser causada por diversos factores entre los que se puede destacar, un error sistemático en la metodología de aforo y los factores hidráulicos y morfológicos del cauce.

La influencia del error sistemático en la metodología de aforo es un factor aleatorio que puede tender a balancearse a lo largo de la serie de aforos aumentándolo algunas veces y disminuyéndola otras. Por otra parte la influencia de los factores hidráulicos y morfológicos del cauce pueden producir una dispersión considerable en la curva de calibración, provocando la aparición del fenómeno de histéresis en la curva, lo cual rompe la monovalencia por lo que para un nivel determinado pueden corresponder mínimo dos caudales.

Una vez se ha concluido que los factores hidráulicos y morfológicos del cauce no están alterando el comportamiento de la curva (observando que la sección del cauce en los aforos no cambia considerablemente), se procede a calcular la

magnitud de la dispersión de la curva y compararla con el error sistemático de aforo. La magnitud de la dispersión se calcula utilizando:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} \right)^2}$$

Donde:

N: número de aforos utilizados para construir la curva.

K: Grados de libertad de la ecuación de regresión de la curva.

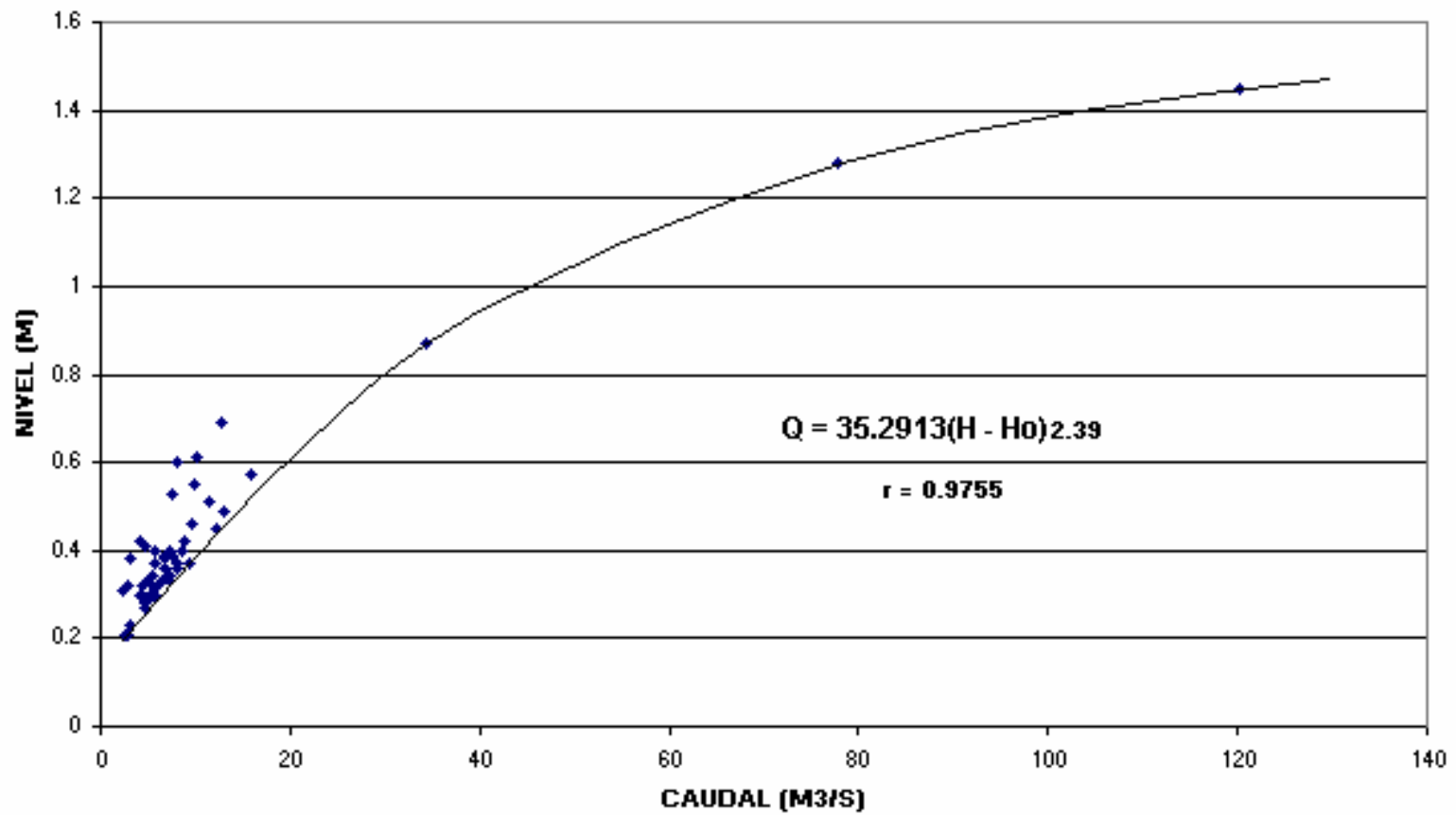
Q_i: Caudal aforado en el nivel H_i.

\bar{Q}_i : Caudal obtenido de la curva bajo nivel H_i.

Una vez se tiene la magnitud de la dispersión esta debe ser menor que el error sistemático de aforo, el cual para estaciones aforadas por el IDEAM debe ser menor del 10%; Para la curva generada para Puerto Nariño la magnitud de la dispersión fue del 15.45% y considerando el reducido numero de aforos y nivelaciones con que se contaba se aceptó la curva como estable.

Al contar con la curva de la estación, se estimaron los caudales a partir de los niveles promedio diarios, para el periodo comprendido entre el 1 de Enero de 1987 al 31 de Diciembre de 1987, el cual se consideró como el periodo de calibración del modelo.

**CURVA DE CALIBRACION DE LA ESTACIÓN DE PUENTE NARIÑO
PARA EL PERIODO DE ESTUDIO (1986-1991)**



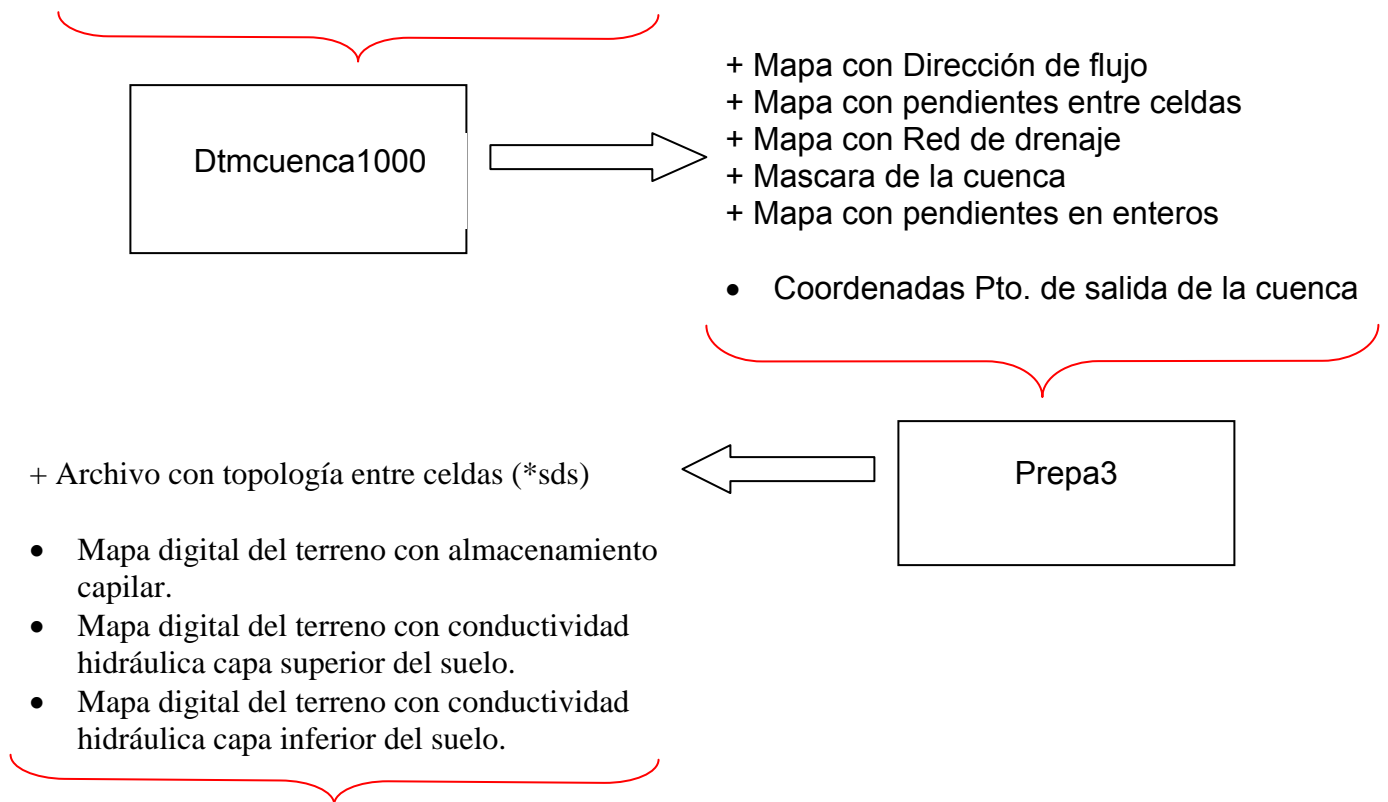
ANEXO B

ESTRUCTURA DE LOS ARCHIVOS DEL PROGRAMA SimDis3

El programa SimDis3 fue realizado por el Postgrado en Aprovechamiento en recursos hidráulicos de la Universidad Nacional (sede Medellín). Los parámetros del modelo fueron programado en la plataforma Fortran 90. A continuación se exponen las características de los diferentes archivos de entrada, donde van almacenadas las características del área de estudio y del evento a simular. Si se desea mayor información, se puede consultar el trabajo de Jaramillo (2003).

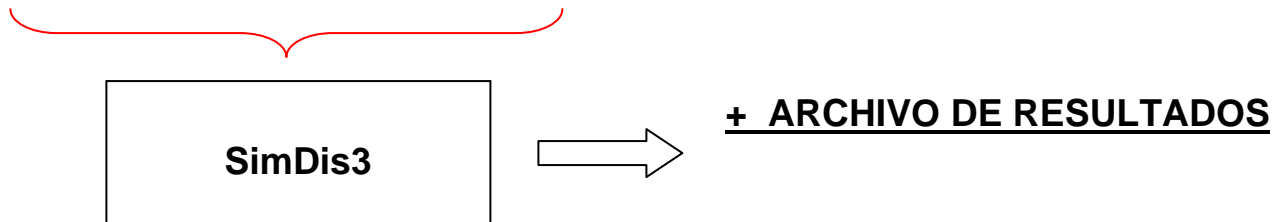
DIAGRAMA DE ARCHIVOS NECESARIOS EN LA SIMULACIÓN:

- Modelo Digital de Elevación
- Coordenadas Pto. de salida de la cuenca



ARCHIVO DE ESCENARIO

- ARCHIVO DE ESCENARIO
- ARCHIVO DE EVENTO
- ARCHIVO DE PARÁMETROS



Descripción de los archivos:

- Modelo digital de elevación (MDE):

Debe contener el área de estudio representada por medio de celdas cuadradas y en formato Grass.

- Coordenadas Pto. de salida de la cuenca:

Deben ser las coordenadas de la estación que se va a utilizar para el proceso de calibración. El ***dtmcuenca1000*** ofrece la opción entre coordenadas planas ó la columna y la fila en el MDE.

- Mapa con Dirección de flujo:

Muestra la forma como se movería el agua a través de las celdas, por medio del modelo D8.

- Mapa con pendientes entre celdas:

Muestra la pendiente media de cada una de las celdas del MDE en m/m.

- Mapa con Red de drenaje:

Muestra la interconexión de la celdas.

- Mascara de la cuenca:

Muestra el área que drena el punto que se coloca como salida de la cuenca.

- Mapa con pendientes en enteros:

Muestra la pendiente media de cada una de las celdas en m/km, para que el resultado sea un numero entero.

- Archivo con topología entre celdas (*.sds)

Se encuentra consignada la forma como se intercomunican cada una de las celdas, desde las celdas iniciales a las que no llega ninguna otra, hasta la celda en el punto de salida de la cuenca a la que todas le drenan.

- Mapa digital del terreno con el almacenamiento capilar del suelo.

Mapa digital con el mismo formato del MDE donde se encuentra el valor de almacenamiento capilar del suelo para cada celda.

- Mapa digital del terreno con conductividad hidráulica capa superior del suelo.

Mapa digital con el mismo formato del MDE donde se encuentra el valor de conductividad hidráulica de la capa superior del suelo para cada celda.

- Mapa digital del terreno con conductividad hidráulica capa inferior del suelo.

Mapa digital con el mismo formato del MDE donde se encuentra el valor de conductividad hidráulica de la capa inferior del suelo para cada celda.

- Archivo de escenario:

Es un archivo de texto donde se encuentra consignada las rutas de acceso a los archivos de topología y los mapas digitales con las propiedades hidráulicas del suelo.

- Archivo de evento:

Es un archivo donde esta consignada las coordenadas de cada una de las estaciones climatologicas utilizadas en la simulación, además de los valores de la precipitación, los caudales usados en la calibración y el intervalo de tiempo a simular.

- Archivo de parámetros:

En este archivo como su nombre lo indica se almacenan los parámetros de funcionamiento del modelo, como las características hidráulicas del suelo, las coordenadas del punto de control y el tipo de representación que se va a realizar (lineal , no lineal)

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO

Al contar con el MDE, se le debe procesar por medio de la primera rutina de SimDis3 (dtmcuenca1000), en la cual además del archivo con el MDE se le debe introducir las coordenadas del punto de aforo a la salida de la cuenca. Por medio de este programa se corrigen las zonas planas y se generan el mapa de direcciones de flujo, el mapa de pendientes, el mapa con la red de drenaje y el mapa con la mascara de la cuenca, los cuales tienen el mismo formato del MDE.

Luego se debe correr la segunda rutina (prepa3) en la cual se crea el archivo topológico de la zona de estudio. En este archivo se encuentra consignada la relación entre las celdas que conforman la red de drenaje. Es necesario realizar los mapas digitales del terreno donde se almacenan las características hidráulicas del suelo; estos mapas tiene el mismo formato del MDE.

Para poder realizar la simulación, se debe contar con el archivo de escenario y el archivo de evento, los cuales se introducen en el SimDis3 y se obtiene el archivo de resultados en el cual se puede observar los valores de cada una de las variables hidrológicas para cada intervalo de tiempo.