

**SEPARACION DEL FLUJO BASE UTILIZANDO ISOTOPOS ESTABLES DEL
AGUA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA**

**JULIETH ANDREA ARROYAVE LÓPEZ
JHON JAIRO VÁSQUEZ OTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2009

**SEPARACION DEL FLUJO BASE UTILIZANDO ISOTOPOS ESTABLES DEL
AGUA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA**

**JULIETH ANDREA ARROYAVE LÓPEZ
JHON JAIRO VÁSQUEZ OTERO**

**Trabajo de Grado para optar por el Título de
Ingeniero Civil**

**Director:
Sully Gómez Isidro
Ing. Civil, M.sc., PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2009

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a nuestra directora de proyecto, la doctora Sully Gómez Isidro, por todo su apoyo, confianza, dedicación, paciencia, aportes y empeño invaluable para la culminación exitosa de nuestro proyecto.

Al Ingeniero Civil José Alfredo, por su colaboración oportuna.

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

A la OIEA, organismo que analiza gratuitamente las muestras de precipitación para el análisis de isótopos estables.

A las entidades: IDEAM, AMB, CDMB Y CENICAFE, por facilitar la información de datos Hidrológicos de precipitación, muestras de lluvia, y caudales en sus estaciones analizadas por la OIEA.

A los encargados de cada una de las estaciones.

A Dios por que estuvo a mi lado cuando me sentí desamparada
A mi mamá por el esfuerzo que hizo para continuar con mis sueños
A mi papá por su confianza y apoyo incondicional
A mi hermanito, por ser mi fuente de motivación
A mi novio por su colaboración y paciencia

JULIETICA

*A Dios por su compañía y su gran bondad
A mis amados padres por su sacrificio y su amor
A mi familia por su apoyo incondicional
A mis compañeros que son un power
A mi bicicleta que nunca me dejo botado*

JHON

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCION.....	1
1. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	3
1.1 LOCALIZACION DE LA CUENCA.....	3
1.2 ASPECTOS GENERALES.....	4
1.3 AREAS DE ESTUDIO.....	5
1.3.1 Escorrentía Directa.....	5
1.3.2 Agua Subterránea.....	6
1.4 RED PLUVIOMÉTRICA E ISOTÓPICA.....	7
1.5 ESTADO DEL ARTE.....	9
2. MARCO TEORICO.....	10
2.1 ISOTOPOS ESTABLES.....	10
2.1.1 Definición.....	10
2.1.2 Simbología.....	11
2.1.3 Isótopos Estables del Hidrógeno.....	11
2.1.4 Isótopos Estables del Oxígeno.....	12
2.1.5 Isótopos estables del Hidrógeno y el Oxígeno en el Ciclo Hidrológico.....	13
2.1.6 Medición y estandarización de isótopos estables en el agua.....	15
2.1.7 Línea Meteórica o Recta de Craig.....	16
2.2 HIDROGRAMA.....	17
2.2.1 Definición.....	18
2.2.2 Componentes del Hidrograma.....	19

2.2.2.1	Escorrentía Directa.....	19
2.2.2.2	Flujo Base	20
2.3	MÉTODO DE SEPARACIÓN DEL HIDROGRAMA	
	UTILIZANDO ISÓTOPOS ESTABLES.....	21
2.3.1	Principios y suposiciones.....	21
2.3.2	Determinación de la desviación isotópica.....	22
2.3.3	Separación de dos componentes.....	22
2.3.4	Determinación de las concentraciones de los componentes del hidrograma.....	24
3.	ANÁLISIS DE LOS DATOS EXISTENTES.....	26
3.1	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	26
3.1.1	Información de la precipitación.....	27
3.1.2	Información isotópica de la precipitación.....	31
3.2	Escorrentía total.....	33
3.3	Flujo base	34
4.	SEPARACION DEL FLUJO BASE	38
4.1	Obtención de las desviaciones isotópicas promedio.....	38
4.1.1	Espacialización de la Escorrentía Superficial.....	42
4.1.1.1	Espacialización de la Precipitación.....	43
4.1.1.1.1	Mapas de espacialización de la precipitación.....	44
4.1.1.2	Espacialización de Isótopos de lluvias.....	46
4.1.1.2.1	Mapas de distribución espacial de Isótopos de la precipitación.....	47
4.1.1.3	Desviación isotópica promedio de la escorrentía superficial.....	48
4.1.2	Espacialización del flujo base.....	49
4.1.2.1	Mapas de distribución espacial de isótopos del flujo base.....	51

4.1.2.2	Desviación isotópica promedio del Flujo Base.....	51
4.1.3	Obtención del promedio isotópico de la escorrentía total.....	51
5.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53
6.	CONCLUSIONES.....	58
	RECOMENDACIONES.....	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	62
	ANEXOS.....	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Fig. (1) Localización de la C.S.R.L. en Santander.....</i>	3
<i>Fig. (2) Zonas de recarga potencial en la C.S.R.L.</i>	5
<i>Fig. (3) Mascara de espacialización de la escorrentía directa.....</i>	6
<i>Fig. (4) Mascara de espacialización del flujo base.....</i>	7
<i>Fig. (5) Red pluviométrica e isotópica.....</i>	8
<i>Fig. (6) Línea de Craig y línea Meteórica local de la Cuenca Superior del Río Lebrija.....</i>	17
<i>Fig. (7) Componentes básicos del hidrograma.....</i>	19
<i>Fig. (8) Recta meteórica de Craig para Escorrentía Directa.....</i>	33
<i>Fig. (9) Ubicación de los puntos de muestreo de aguas subterráneas.....</i>	36
<i>Fig. (10) Recta meteórica de Craig para isotopos de flujo base.....</i>	37
<i>Fig. (11) Distribución espacial utilizando los métodos de interpolación: IDQ, RBF y Kriging.....</i>	39
<i>Fig. (12) Comportamiento de un modelo de variograma exponencial.....</i>	41
<i>Fig. (13) Comportamiento de un modelo de variograma exponencial.....</i>	41
<i>Fig. (14) Comportamiento de un modelo de variograma exponencial.....</i>	42
<i>Fig. (15) Variograma Gaussiano ajustado a datos de precipitación.....</i>	44
<i>Fig. (16) Variograma Gaussiano ajustado a datos de precipitación.....</i>	46
<i>Fig. (17) Variograma potencial ajustado a datos de ¹⁸O.....</i>	50
<i>Fig. (18) Variograma exponencial ajustado a datos de ¹⁸O.....</i>	50

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla (1). Resultados de ajuste censal a junio 30 de 2005.....	4
Tabla (2). Numero de datos pluviométricos de tipo mensual.....	29
Tabla (3). Numero de datos pluviométricos de tipo mensual.....	30
Tabla (4). Numero de datos isotópicos de la lluvia.....	31
Tabla (5). Numero de datos isotópicos de la lluvia.....	32
Tabla (6). Número de datos y ubicación de los puntos de muestreo de flujo base.....	35
Tabla. (7) Promedios de desviación isotópica y precipitación de cada época húmeda para escorrentía directa.....	48
Tabla. (8) Promedios de desviación isotópica para escorrentía directa.....	49
Tabla. (9) Promedios de desviación isotópica para flujo base.....	51
Tabla. (10) Promedios de desviación isotópica para escorrentía total.....	52
Tabla (11). Separación del flujo base mediante promedios obtenidos con las distintas técnicas de interpolación a partir de datos de isótopos estables del agua disponibles en la C.S.R.L.....	54

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<i>Anexo 1. Datos de Precipitación.....</i>	65
<i>Anexo 2. Datos de isótopos de la precipitación.....</i>	67
<i>Anexo 3. Datos de isótopos del flujo base.....</i>	68
<i>Anexo 4. Datos de isótopos de la escorrentía total.....</i>	69
<i>Anexo 5. Caudales diarios en la estación café Madrid año 2005.....</i>	72
<i>Anexo 6. Caudales diarios en la estación café Madrid año 2006.....</i>	73
<i>Anexo 7. Mapa de precipitación de Época Húmeda 2 de 2004.....</i>	74
<i>Anexo 8. Mapa de precipitación de Época Húmeda 1 de 2005.....</i>	74
<i>Anexo 9. Mapa de precipitación de Época Húmeda 2 de 2005.....</i>	75
<i>Anexo 10. Mapa de precipitación de Época Húmeda 1 de 2006.....</i>	75
<i>Anexo 11. Mapa de precipitación de Época Húmeda 2 de 2006.....</i>	76
<i>Anexo 12. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 2 de 2004.....</i>	77
<i>Anexo 13. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 2 de 2004.....</i>	77
<i>Anexo 14. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 1 de 2005.....</i>	78
<i>Anexo 15. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 1 de 2005.....</i>	78
<i>Anexo 16. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 2 de 2005.....</i>	79
<i>Anexo 17. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 2 de 2005.....</i>	79
<i>Anexo 18. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 1 de 2006.....</i>	80
<i>Anexo 19. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 1 de 2006.....</i>	80
<i>Anexo 20. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 2 de 2006.....</i>	81
<i>Anexo 21. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 2 de 2006.....</i>	81
<i>Anexo 22. Mapa de Oxígeno 18 utilizando variograma exponencial.....</i>	82
<i>Anexo 23. Mapa de Deuterio utilizando variograma exponencial.....</i>	83
<i>Anexo 24. Mapa de Oxígeno 18 utilizando variograma potencial.....</i>	84
<i>Anexo 25. Mapa de Deuterio utilizando variograma potencial.....</i>	85

RESUMEN

TITULO:

SEPARACION DEL FLUJO BASE CON ISOTOPOS ESTABLES DEL AGUA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA*

AUTORES:

Julieth Andrea Arroyave López
Jhon Jairo Vásquez Otero**

PALABRAS CLAVES:

Cuenca Superior de Rio Lebrija (C.R.R.L.); Isótopos estables; Escorrentía; Agua Subterránea; Separación del Flujo base.

DESCRIPCIÓN:

La situación actual, en cuanto al manejo de recursos hídricos y en especial en nuestro caso, al del agua subterránea, en la Cuenca Superior del Rio Lebrija (C.S.R.L.), ubicada al nororiente del departamento de Santander en donde está ubicada la zona metropolitana de Bucaramanga con una población de más de 1.024.350 habitantes, requiere un estudio en cuanto a la cuantificación de este recurso.

Por tal razón, en la presente investigación se presenta una forma de estimación del flujo base en la (C.S.R.L.), donde se implementó un muestreo de isótopos estables, para la utilización del método isotópico. Dicho método tiene como fin la separación del flujo base en dos componentes del hidrograma (Escorrentía directa y Flujo base) utilizando desviaciones isotópicas promedio de oxígeno 18 y deuterio, con el propósito de estudiar el comportamiento de la precipitación en épocas de invierno y agua subterránea en épocas de estiaje. Dichas desviaciones se tomaron de una serie de datos obtenidos a lo largo de la cuenca y en un periodo comprendido entre los meses de septiembre de 2004 a diciembre de 2006 y se utilizó un software para espacializar dichos datos buscando el mejor método de interpolación.

Con este estudio se determinó que el flujo base representa el 71% de la escorrentía total del río.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil,
Director: GOMEZ ISIDRO, Sully.

ABSTRACT

TITLE:

BASE FLOW SEPARATION WITH STABLE ISOTOPES OF WATER ON THE RIVER LEBRIJA SUPERIOR CATCHMENTS *

AUTHORS:

Julieth Andrea Arroyave López
Jhon Jairo Vásquez Otero**

KEY WORDS:

River Lebrija Superior Catchments (C.S.R.L.); Stable Isotope; Runoff; Groundwater; Base Flow Separation.

DESCRIPTION:

The present situation, as far as the handling of hydric resources and especially in our case, to the one of the groundwater, in the River Lebrija Superior Catchments (C.S.R.L.), located to the northwest of the department of Santander in where are located the metropolitan zone of Bucaramanga with a population of more is 1.024.350 habitants, requires a study as far as the quantification of this resource.

For such reason, in the present investigation on appears a form of estimation of the base flow (C.S.R.L.), where a stable isotope sampling was implemented, for the use of the isotopic method. This method must as aim the base flow separation on two components of the hydrograph (Run-off and Base flow) using isotopic deviations average of 18 oxygen and deuterium, in order study the behavior of the precipitation at ages of winter and groundwater at times of low water. These deviations were taken from a series of data collected throughout the catchment and a period it between the months of September of 2004 to December of 2006 and software was used to espacializar these data looking for the best method of interpolation.

With this study one determined that the base flow represents 71% of the total runoff of the river.

* Graduation Project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering,
Director: GOMEZ ISIDRO, Sully.

INTRODUCCION

El agua, que compone la mayor parte de nuestro cuerpo y de nuestro mundo, está viva y se mueve. Este líquido diáfano se ha convertido en objeto de investigaciones durante siglos en el planeta, creando incógnitas sobre la preservación de este recurso y dando paso a una fuente alternativa de abastecimiento como lo es el agua subterránea, cuyo recurso genera viabilidad y sostenibilidad de los acuíferos. Los isótopos estables son actualmente utilizados como herramientas para resolver de alguna manera esta difícil búsqueda, cuantificando el aporte de este flujo al río, por medio de la separación del flujo base.

El propósito de esta investigación es realizar la separación del flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija, mediante el uso de las desviaciones isotópicas que presentan las componentes involucradas. Dichas componentes forman parte de un hidrograma; que es la grafica de caudal vs tiempo que involucra ciertas componentes que afectan el comportamiento del rio de forma directa tales como la escorrentía directa, la escorrentía sub-superficial, y el flujo base, principalmente, el flujo base es producto de infiltraciones de eventos de lluvias anteriores y mantiene al río con agua en épocas de estiaje.

La mayoría de los procedimientos de separación del flujo base consideran 3 componentes: el flujo base, flujo sub-superficial y la escorrentía directa; para el presente estudio se tendrá en cuenta dos componentes, la escorrentía directa y flujo base. Los resultados de dicha estimación, permitirán tener mayor información acerca del comportamiento del río en épocas de estiaje, los cuales son útiles para los acueductos, ya que el flujo base está relacionado con los caudales mínimos de los ríos y así prever alternativas para el abastecimiento del recurso hídrico en la región.

Para poder estimar el valor de flujo base, se hizo necesario el conocimiento del tema a fondo, por lo que nos basamos en los fundamentos teóricos de los isótopos en general y en los estudios que se han desarrollado en el país sobre este fenómeno, teniendo en cuenta la aplicación de este concepto en la zona de estudio.

Por ende los resultados obtenidos de esta investigación serán interpretados de tal manera que se puedan llegar a conclusiones y a recomendaciones que puedan ser de utilidad en futuras investigaciones.

1. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1 LOCALIZACION DE LA CUENCA

La cuenca superior del rio Lebrija está ubicada en la provincia de soto, al nororiente del departamento de Santander entre las coordenadas geográficas 6° 54' y 7° 27' de Latitud Norte y 73° 15' y 72° 15' de longitud al Oeste de Greenwich, aproximadamente.

Con un área de 1273,4 Km² es la zona de captación y drenaje que abastece a la ciudad de Bucaramanga y a su zona metropolitana.

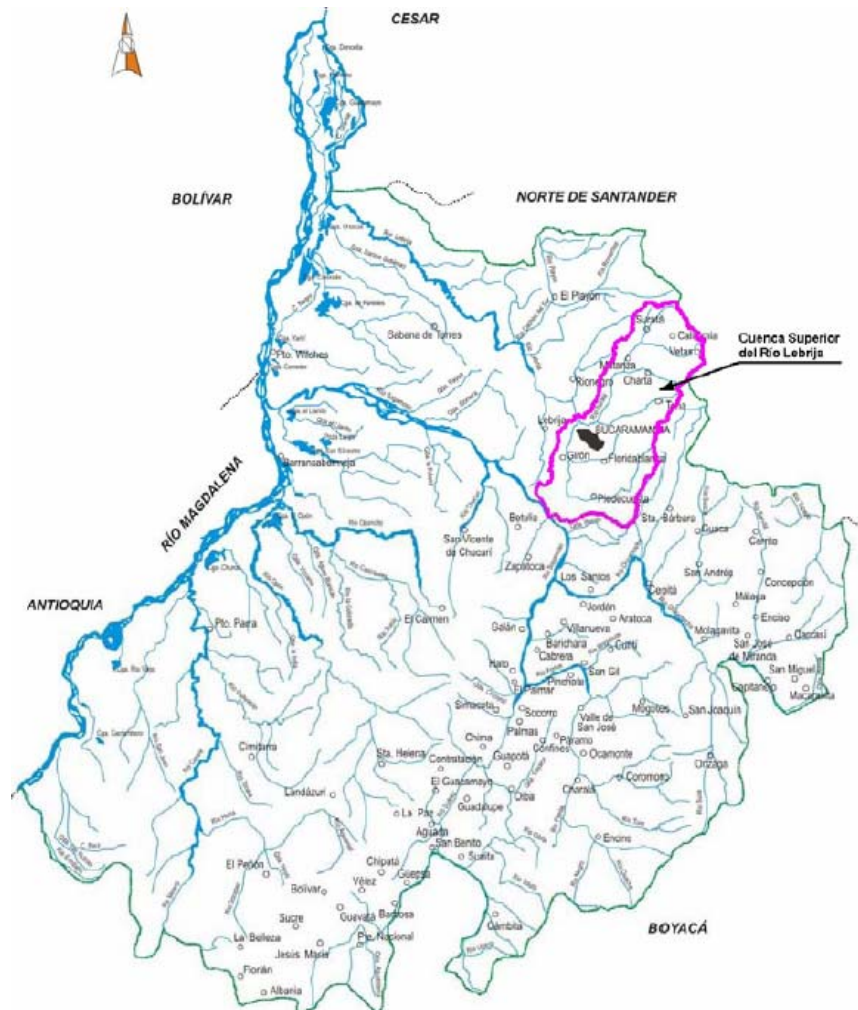


Fig. (1) Localización de la C.S.R.L. en Santander

Fuente (secretaria de planeación del dpto. de Santander)

1.2 ASPECTOS GENERALES

En la C.S.R.L. se encuentran las cuencas de los ríos Oro, Tona, Frio y Surata, las cuales conforman el sistema de captación y drenaje; en esta cuenca existe 2 geomorfologías predominantes, el macizo rocoso santandereano conformado principalmente por rocas ígneas y metamórficas; y la zona aluvial conformada por rocas sedimentarias, posee una gran variedad de climas y una amplia topografía; sus climas van desde paramo sub-alpino hasta bosque seco tropical; en las zonas correspondientes a las cuencas de los ríos de Oro, Tona y Frio predomina una topografía de alta montaña con elevaciones entre 900 y 4.200 msnm, los suelos en la parte alta tienen un porcentaje importante de materia orgánica y en la zona de mesetas y terrazas predomina suelos producto de rocas sedimentarias, hacia Girón encontraremos suelos altamente erosionables (Gómez Y Ulloa, 2007).

Esta cuenca abarca 10 municipios que son: Bucaramanga, Girón, Floridablanca, Piedecuesta, Surata, Tona, California, Vetas, Matanza Y Charta que albergan a 1'047.826 habitantes según el último censo registrado en Colombia (DANE, 2005), y representa el 53,52% de la población total de Santander, por tal razón es la cuenca más importante de la región.

Pobl. total Santander 1957789 Habitantes				
Cód. Departamento	Departamento	Código Municipio	Nombre de municipio	Población Total30-Jun-2005
68	Santander	68001	Bucaramanga	516512
68	Santander	68132	California	1793
68	Santander	68169	Charta	3142
68	Santander	68276	Floridablanca	254683
68	Santander	68307	Girón	135791
68	Santander	68444	Matanza	5840
68	Santander	68547	Piedecuesta	117364
68	Santander	68780	Surata	3662
68	Santander	68820	Tona	6690
68	Santander	68867	Vetas	2349
total				1047826
%				53,52088504

Tabla (1). Resultados de ajuste censal a junio 30 de 2005

1.3 AREAS DE ESTUDIO

1.3.1 Escorrentía Directa

La escorrentía es una consecuencia directa de la precipitación, es decir que la información isotópica que la precipitación lleva consigo es transmitida de igual forma a la escorrentía por ello se decidió tomar la información correspondiente a la precipitación como dato representativo de la escorrentía directa, se escogió una zona determinada para su análisis, dicha zona comprende parte del macizo rocoso dado que es en esa zona donde está comprobado que se presenta la recarga de los acuíferos representativos para la región (Gómez Y Ulloa, 2007 pag.137).

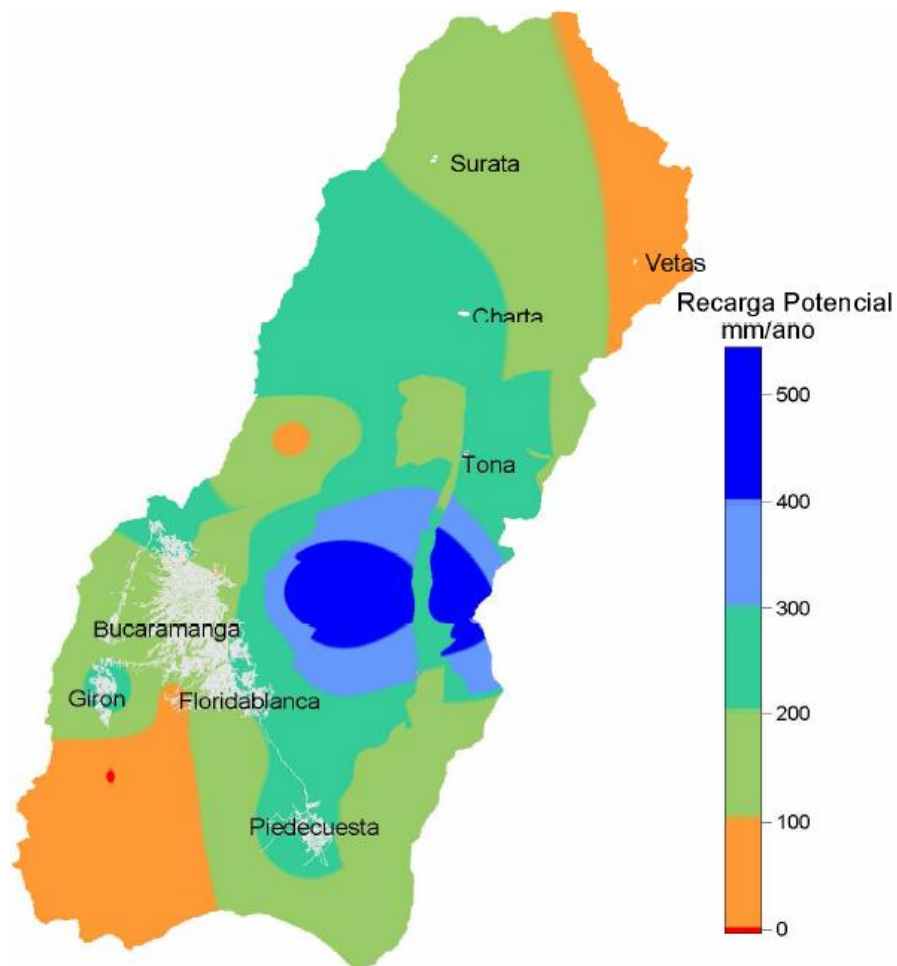


Fig. (2) Zonas de recarga potencial en la C.S.R.L.

Fuente (Gómez y Ulloa, 2007, pág. 162)

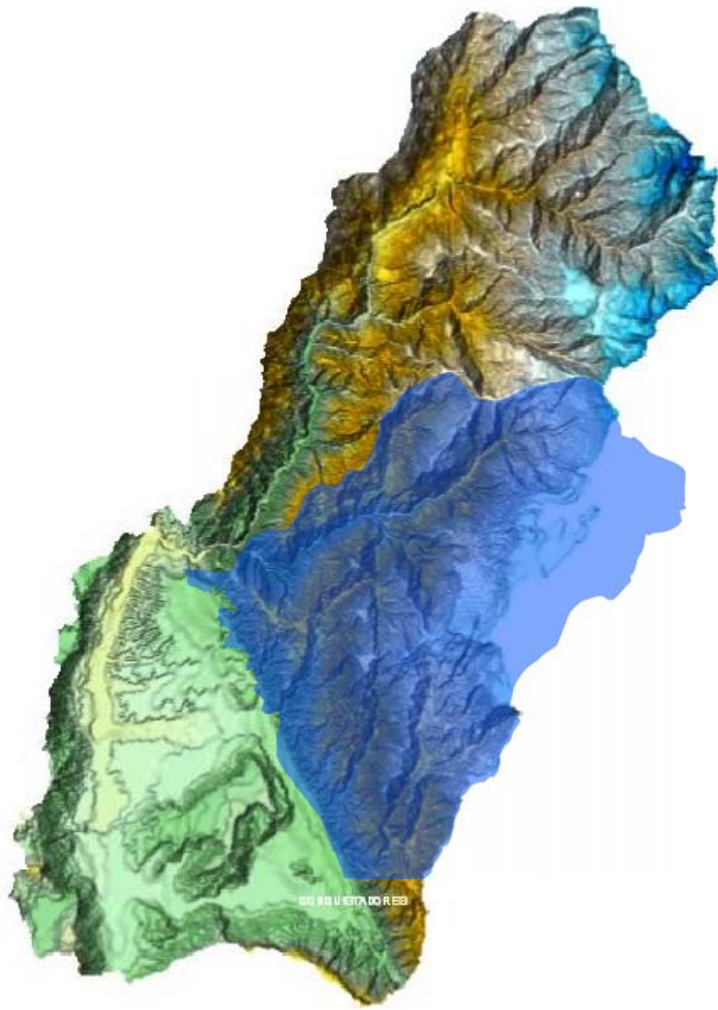


Fig. (3) Mascara de espacialización de la escorrentía directa

1.3.2 Agua Subterránea

La zona de acuíferos está ubicada hacia la zona aluvial de la cuenca, esto se puede observar en la investigación realizada por Gómez y Ulloa 2005 donde se presenta una hipótesis de las líneas de flujo subterráneo basados en el análisis del diaclasamiento de las rocas en esta zona; allí se encuentran los principales asentamientos urbanos, más adelante se verá con mayor claridad este concepto en el ítem espacialización de datos; se selecciono la zona comprendida desde la cota 1500 hacia abajo, y fue en esta zona donde se realizo la toma de muestras, ya que el flujo base se relaciona directamente con las aguas subterráneas.



Fig. (4) Mascara de espacialización del flujo base.

1.4 . RED PLUVIOMÉTRICA E ISOTÓPICA

En la C.S.R.L. existe una red de estaciones que registran los principales fenómenos atmosféricos que son de gran utilidad a la hora de definir el estado del tiempo o del clima en la región, además la información captada por esta red permite desarrollar investigaciones para conocer cada día más acerca del comportamiento del ciclo hidrológico y otros fenómenos relacionados con parámetros atmosféricos en la cuenca.

Las principales autoridades ambientales de la zona, tales como, la CDMB, el IDEAM, CENICAFE, y el acueducto metropolitano de Bucaramanga AMB, en conjunto con la universidad industrial de Santander, se han tomado la tarea de

recolectar información hidroclimática mediante una red de estaciones conformada por: La Lora, Martín Gil, Matajira, Tona, Berlín, El Brasil, El Pajal, La Mariana, El Picacho, La Galvicia, San Antonio, Sevilla, El Rasgón Y Granja Piedecuesta, algunas de ellas recolectan tanto información pluviométrica he isotópica estas son: Tona, Berlín, La Mariana, El Picacho, La Galvicia, San Antonio, Y Granja Piedecuesta excepto la casita que no entra en la clasificación de estación pues solo recolecta muestras para análisis isotópico; en la siguiente figura se puede observar las ubicación de las diferentes estaciones a lo largo de la cuenca.



Fig. (5) Red pluviométrica e isotópica

1.5 ESTADO DEL ARTE

El uso de isótopos en la cuenca se remonta al año 1994, desde entonces se ha venido tomando muestras para determinar este tipo de átomos en la precipitación, en los ríos, y en aguas subterráneas, ya que son la materia prima para investigaciones relacionadas con el comportamiento de los acuíferos y corrientes superficiales que hacen parte de la cuenca; uno de los primeros trabajos fue desarrollado por Navia y Suarez, (1994) en donde se presenta un modelo hidrogeológico de flujo del agua en los acuíferos de Bucaramanga y fue en este trabajo en donde se tomaron las primeras muestras a 9 corrientes superficiales para análisis isotópico en el periodo comprendido entre Septiembre de 1992 a Mayo de 1993, posteriormente se muestrearon 7 corrientes en un estudio presentado en Anaya y Gómez, 2003 recopilando información tanto en verano como en invierno. El muestreo isotópico en la precipitación en la cuenca se observa en el trabajo de grado “Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación para obtener la recta meteórica local” desarrollado por Camacho y Guzmán, 2005 en donde se presenta una distribución de la red de muestreadores según las zonas orográficas más representativas, se presentó una recta meteórica local y un protocolo para la toma y envío de datos al laboratorio de muestras de precipitación para su análisis isotópico, a partir del 2004 se realiza un muestreo de escorrentía con el proyecto de grado “implementación de una metodología para el muestreo de isótopos estables y aplicación a la separación de flujo base” Maldonado y Velasco, 2005 pero no fue posible implementar el método de separación del hidrograma por medios isotópicos ya que no se contaba con datos históricos de la escorrentía total, por esto aplicaron el método de separación de flujo base a datos existentes de dos cuencas fuera del país: Kentucky (U.S.A.) y Brugga (Alemania); uno de los trabajos más representativos para esta investigación es el desarrollado por Barliza y Cristancho, 2007 en donde se implementó un muestreo de isótopos estables en el periodo comprendido entre agosto de 2005 y julio de 2006, con el propósito de estudiar el comportamiento de los ríos en épocas de verano y su relación

con el flujo base, es en este trabajo donde se realizó la última estimación de flujo base en la cuenca, pero no fue posible utilizar los resultados del muestreo realizado en dicho estudio debido a la demora en el análisis de las muestras ya que este procedimiento se realiza fuera del país. Actualmente los resultados están en manos del grupo de investigación G.P.H y servirán de base para el presente estudio, además es importante mencionar el trabajo “separación de flujo base en las estación café Madrid” realizado por Balaguera y Serrano, 2006. En donde se presentan 4 modelos de separación de las componentes del hidrograma concluyendo que el flujo base está entre un 50 y 72% de la escurrentía total.

2. MARCO TEORICO

2.1 ISOTOPOS ESTABLES

2.1.1 Definición

Son cada una de las variedades de un átomo de cierto elemento químico, los cuales varían en el núcleo atómico, por lo tanto presenta el mismo número atómico (Z), constituyendo por lo tanto el mismo elemento, pero presenta distinto número másico (A). Dicho en otras palabras, son átomos que tienen el mismo número de protones y de electrones, pero un diferente número de neutrones.

Los Isótopos estables son aquellos átomos cuyos núcleos no presentan decaimiento, es decir, permanecen en la naturaleza sin alterarse, no se descomponen con el tiempo, sencillamente no se desintegran para dar lugar a otros núcleos; por lo tanto no exhiben propiedades radioactivas y pueden ser utilizados como trazadores que sigan los elementos del ciclo del agua en su curso natural.

Cuando se utilizan isótopos estables como trazadores del ciclo hidrológico, la característica diferenciadora entre sus componentes es el contraste en concentración de los mismos, debida a la transición del agua de un estado a otro (De líquido a vapor).

2.1.2 Simbología

La notación Standard que se utiliza para representar el núcleo determinado de un elemento cuyo nombre se simboliza con (X), consiste en escribir el símbolo del elemento, colocándole el número de masa (A) en la parte superior izquierda como un superíndice y su número atómico (Z) en la parte inferior izquierda como subíndice. Así:



Pero, se utiliza más frecuentemente la forma abreviada de representación:



Se debe recordar que la suma del número de protones (Z) y el número de electrones (N), es conocida como el número de masa (A).

Por ejemplo, la mayoría de los átomos de oxígeno tienen 8 protones y 8 neutrones, por lo que su masa atómica es 16 (8+8), su notación es: (${}^{16}_8\text{O}_8$); mientras que cerca del 0,2% de los átomos de oxígeno tienen 10 neutrones, por lo que su masa atómica es 18 (8+10), su notación es: (${}^{18}_8\text{O}_{10}$) ó ${}^{18}\text{O}$.

2.1.3 Isótopos Estables del Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento químico representado por el símbolo H y con un número atómico de 1. El hidrógeno posee tres isótopos naturales que se denotan como ^1H , ^2H y ^3H . ^2H , isótopo estable del hidrógeno, es conocido como deuterio y su núcleo contiene un protón y un neutrón. El deuterio representa el 0,0026% o el 0,0184% (según sea en fracción molar o fracción atómica) del hidrógeno presente en la Tierra, encontrándose las menores concentraciones en el hidrógeno gaseoso, y las mayores (0,015% o 150 ppm) en aguas oceánicas. El deuterio no es radiactivo, y no representa un riesgo significativo de toxicidad. El agua enriquecida en moléculas que incluyen. El ^2H en aguas superficiales con una evaporación intensa, presenta concentraciones elevadas, lo mismo que sucede con el ^{18}O , a diferencia del hielo de los polos que tienen bajos contenidos de ^2H .

2.1.4 Isótopos Estables del Oxígeno

El oxígeno es un elemento químico de número atómico 8 y símbolo O. Es un elemento gaseoso ligeramente magnético, incoloro, inodoro e insípido. Es el elemento más abundante en la Tierra. Posee tres isótopos estables, ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , con abundancias de 99,76; 0,04 y 0,2%, respectivamente. El ^{17}O no es utilizado en los trabajos de hidrología isotópica debido a que aporta poca información sobre el ciclo hidrológico al encontrarse en una proporción muy baja respecto a los otros dos isótopos estables y por tanto la relación que más se considera es la de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\approx 0,0020$).

Los valores de ^{18}O muestran variaciones de casi 100%. El ^{18}O presenta mayor concentración en los lagos (salinos) por estar sujetos a un alto grado de evaporación, en cambio en las zonas de altas y en los climas fríos, el ^{18}O es menor. De ahí, que en el ciclo hidrológico de los climas templados en el rango de ^{18}O no excede el 30%.

Existen variaciones naturales de ^{18}O en la precipitación, debido a que el vapor de agua de este evento se transforma debido a factores climáticos y locales. Mientras más se alejen las lluvias de la fuente principal de vapor de las regiones ecuatoriales, más negativo se vuelve el ^{18}O . En cambio, la concentración de ^{18}O que sufre variaciones en el agua superficial de los ríos, se debe a efectos estacionales: En verano los valores tienden a ser mayores y en invierno disminuyen. La evaporación en las regiones tropicales y semiáridas produce un enriquecimiento de ^{18}O de las aguas superficiales, pudiéndose encontrar concentraciones de ^{18}O entre +3 y +4%, sin embargo se han reportados casos en donde este valor varía mucho, como por ejemplo: +20% en algunos lagos.

2.1.5 Isótopos estables del Hidrógeno y el Oxígeno en el Ciclo Hidrológico

En hidrología se implementa una técnica nuclear que utiliza tanto isótopos estables como radiactivos con el fin de seguir el transcurso del agua durante cada etapa del ciclo hidrológico, y de esta forma investigar acerca del origen de las aguas subterráneas, la manera en que estas se transportan y se distribuyen. Suministrando así una firma isotópica característica.

La combinación de los cinco isótopos correspondientes al Oxígeno y al Hidrógeno da lugar a nueve moléculas de agua diferentes entre las que la ^1H y ^{16}O es la más ligera y la más abundante, y la ^2H y ^{18}O es la de mayor peso molecular y es conocida con el nombre de agua pesada.

La diferencia de peso entre las moléculas de agua origina un diferente comportamiento de unas y otras frente a los procesos de evaporación y condensación.

Como norma general las moléculas de agua más ligeras pasan al estado de vapor antes que las moléculas más pesadas. Cuando el agua de los océanos se evapora, los isótopos más pesados se condensan primero y caen en forma de lluvia antes que los más ligeros. Es en los océanos donde se genera la mayor parte del vapor de agua en la atmósfera, por consiguiente, mientras más alejada de la costa sea la precipitación, menor será la cantidad de isótopos pesados que contenga.

Como índice de orden de magnitud, en las latitudes frías disminuye la δ de la lluvia en un 0,5% por cada grado que aumenta la latitud.

Las aguas oceánicas enriquecidas en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ y las correspondientes a lluvia de regiones cálidas o de latitudes bajas, tenderán a situarse por encima de la línea de aguas meteóricas y lejos del origen de coordenadas.

Dentro de una latitud parecida, en las zonas costeras se produce un vapor de agua de una δ ligeramente negativa (la radiación solar es suficiente como para que se evaporen las moléculas de ^2H y ^{18}O). A medida que aumenta la lejanía a la costa δ se hace más negativa. Esto implica que la lluvia es tanto más ligera cuanto más lejos del mar se origina el vapor que la produce.

Por tanto, las desviaciones con respecto al SMOW de muestras de aguas subterráneas informarán sobre la climatología de la época en la que se infiltraron esas aguas, o sobre las características climáticas del área donde se produjo la lluvia que dio lugar a la recarga de los acuíferos.

En cada etapa del ciclo hidrológico, se registra un pequeño cambio consistente en una diferencia en la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en el agua que están singular como una huella dactilar. Los isótopos de los contaminantes, como trazas metálicas o compuestos químicos disueltos también ofrecen pistas cerca de los orígenes del agua.

Algunos isótopos del agua como ^2H y ^{18}O al ser particularmente estable, ofrecen la posibilidad de abarcar periodos prolongados de fenómenos meteorológicos de miles de años de duración. Sus firmas quedan preservadas donde quiera que se registra el ciclo del agua, en sedimentos de océanos, y lagos, en las incisiones anulares de los árboles, en glaciares y casquetes polares, en depósitos, en cuevas y en aguas subterráneas (**Cristancho & Barliza, 2007**)

2.1.6 Medición y estandarización de isótopos estables en el agua

Debido a la necesidad de comparar datos isotópicos a escala global fue necesario estandarizar las mediciones entre los laboratorios que realizan dichas investigaciones, siendo estos los laboratorios de dos organizaciones importantes; the International Atomic Energy Agency (IAEA) y the National Institute of Standards and Tegnology (NIST). Estas dos organizaciones colaboraron en la clasificación, calibración y distribución de referencias.

Fue en 1961 cuando Harmon introdujo el término “Standar Mean Ocean Water” (SMOW) como una medida estándar de la concentración de ^{18}O y ^2H del agua de mar, paradójicamente tomada en el río Potomac (USA). Tiempo después, la IAEA preparó agua oceánica destilada como patrón y la identificó como Viena Estándar Ocean Water (VSMOW), que ha sido una referencia internacionalmente aceptada de ^{18}O y ^2H para agua por más de tres décadas; y cuyos valores se muestran a continuación:

$$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}} = (2005,2 \pm 0,45) \times 10^{-6} \quad (\text{Baertschi, 1976})$$

$$\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{VSMOW}} = (155,76 \pm 0,05) \times 10^{-6} \quad (\text{Hageman et al., 1976})$$

Con el tiempo VSMOW es reconocida como SMOW. Actualmente la definición de las concentraciones de ^{18}O y ^2H del agua son expresadas mediante la diferencia en partes por mil de la relación D/H y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ respecto a las mismas relaciones en el agua del océano (SMOW). Esta diferencia es conocida como desviación isotópica y está representada por: δ .

$$\delta = \frac{C_{\text{MUESTRA}} - C_{\text{SMOW}}}{C_{\text{SMOW}}} \quad (1)$$

Donde δ es la desviación isotópica en ‰, C_{MUESTRA} es la concentración de isótopos de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ para el oxígeno y D/H para el deuterio, estas pueden determinarse generalmente con una exactitud entorno a $\pm 0,1\%$ y $\pm 1\%$ respectivamente, C_{SMOW} es la concentración de isótopos (SMOW).

2.1.7 Línea Meteórica o Recta de Craig

Harmon Craig, en 1961 después de numerosos estudios publicó su descubrimiento. Él, encontró una correlación lineal obtenida entre la desviación isotópica de ^{18}O VS la desviación isotópica del ^2H , desviación que la define la siguiente expresión:

$$\delta ^2\text{H} = a \delta ^{18}\text{O} + b \quad (2)$$

Tal como se muestra la ecuación 2 la línea de Craig es el valor de su pendiente “a” es igual a 8, e intercepta al eje de $\delta^2\text{H}$ con un valor igual a “b” de 10 conocido como exceso de deuterio. Los valores “a y b” pueden variar de acuerdo a cada región y a la procedencia del vapor atmosférico, pero siempre conservando la misma tendencia lineal de la ecuación (**Camacho & Guzmán, 2005**).

Si existiera un equilibrio termodinámico entre las fases líquida – vapor en el agua de mar, las desviaciones de ^{18}O y ^2H se modificarían en cualquiera de las fases a lo largo de una línea que obedecerá a la ecuación:

$$\delta^2 H = 8 \delta^{18} O \quad (3)$$

En esta ecuación no existe exceso de Deuterio, sin embargo, el proceso de evaporación del agua del océano no tiene lugar en condiciones de equilibrio debido al déficit de humedad de la atmósfera con respecto al valor de saturación, contrario a la condensación, la cual ocurre en la naturaleza en condiciones muy próximas al equilibrio. Por lo tanto una vez formada la nube, el valor de la pendiente igual a 8, se mantiene constante. La mayor parte de las precipitaciones en el mundo se sitúan alrededor de la línea meteórica, $\delta^2 H = 8 \delta^{18} O + 10$. (Rozanski & Froehlich, 2002).

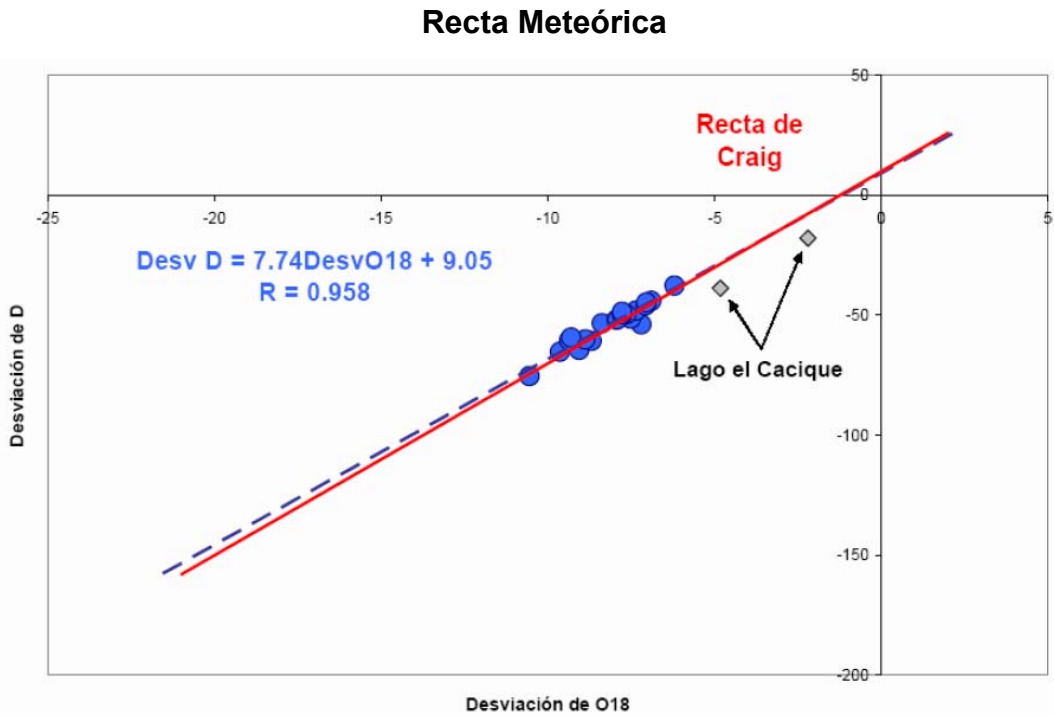


Fig. (6) Línea de Craig y línea Meteórica local de la Cuenca Superior del Río Lebrija
Fuente: **Camacho & Guzmán, 2005**

2.2 HIDROGRAMA

El hidrograma es una importante grafica que representa el comportamiento del rio a lo largo del tiempo y sirve para estudiar las componentes que aportan agua al afluente tales como la componente superficial y la componente subterránea, además esta grafica relaciona la precipitación con los caudales, y si se tiene una serie histórica de datos representativos de crecientes, se puede deducir avenidas máximas y caudales mínimos, información útil para acueductos y entidades que estudien las variables hidroclimáticas; la forma que tome la grafica depende de ciertas variables físicas características de cada cuenca como su forma, representado en el tiempo de concentración, su topografía, tipos y formas de cultivos así como la variabilidad espacial y temporal de la lluvia entre otros.

2.2.1 Definición

Es una gráfica o una tabla que muestra la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. En efecto, el hidrograma es “Una expresión integral de las características fisiológicas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular” (**Chow, Ven T.**, 1959).

Permite observar:

- Las variaciones en la descarga a través de una tormenta, o a través del año hidrológico
- El pico de escorrentía (caudal máximo de la avenida)
- El flujo base o aporte de las aguas subterráneas al flujo
- Las variaciones estacionales de los caudales si se grafica un periodo de tiempo de uno o varios años

La forma del hidrograma depende de:

- Variabilidad espacial y temporal de la lluvia
- Forma de la cuenca (Tiempo de concentración)
- Características superficiales del terreno
- Tipos y formas de cultivo (terrazas, bancales, etc.)
- Estado inicial de la cuenca

2.2.2 Componentes del Hidrograma

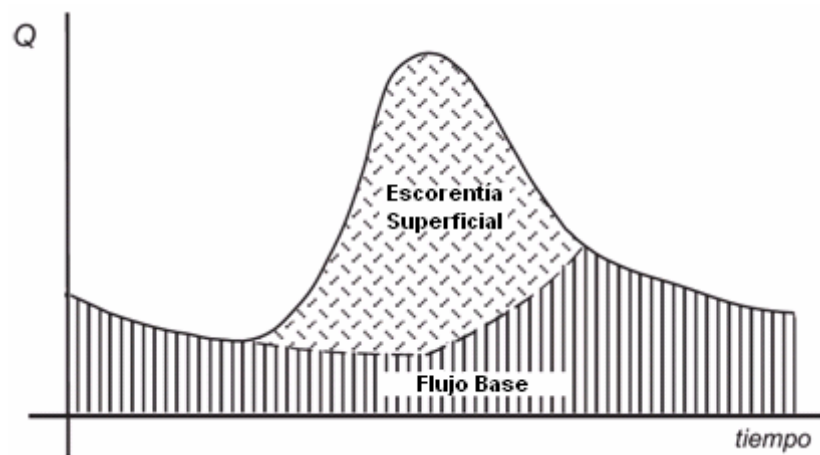


Fig. (7) Componentes básicos del hidrograma

2.2.2.1 Escorrentía Superficial

Se denomina escorrentía superficial al agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. La escorrentía superficial es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la cuenca.

Descripción del proceso de escorrentía

Para que sea más claro supongamos que en una cuenca se inicia un proceso de lluvia. Las primeras gotas de lluvia son retenidas y almacenadas por las hojas y tallos de la cubierta vegetal, a partir de un cierto límite las gotas

comienzan a alcanzar el suelo y después de un breve período de tiempo, casi todas las gotas alcanzan el suelo.

Luego, el suelo a través de sus capas de depósitos de restos vegetales y sobre todo en sus depresiones, almacena una cierta cantidad de agua. Es decir, se inicia el proceso de percolación del agua a las capas inferiores (infiltración).

Cuando la capacidad de almacenamiento del suelo, ya descontada la infiltración, está en el límite, se inicia el proceso de circulación superficial del agua. En esta circulación superficial se pueden distinguir dos partes:

- Una correspondiente al flujo subsuperficial, que corresponde a la capa de agua que circula próxima al suelo
- Y otra al flujo superficial propiamente dicho, que circula con mayor velocidad. Es este último el que genera realmente lo que se entiende en ingeniería como escorrentía propiamente dicha.

2.2.2.2 Flujo Base

Ya se sabe que una parte del agua escurre superficialmente, pero hay otra parte que se infiltra hasta los niveles inferiores al freático, este proceso se denomina escurrimiento subterráneo. El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años en llegar), y, en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable. Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el Flujo base. (**Aparicio**, 1992)

Este escurrimiento sale al exterior, teniendo en cuenta los siguientes caminos:

- Ser extraídas artificialmente, mediante pozos o sondeos. En zonas de topografía plana y superficie freática profunda, la extracción por captaciones casi la única salida del agua subterránea.
- Salir al exterior como manantial. Los contextos hidrogeológicos que dan lugar a un manantial son variados.
- Evapotranspiración, por plantas freatofitas o si la superficie freática está próxima a la superficie. En laderas que cortan la superficie freática se genera una abundante vegetación.
- Alimentar un cauce subrepticamente. Es normal que un río aumente paulatinamente su caudal abajo aunque no reciba afluentes superficiales.
- En zonas costeras: Afluye subterráneamente al mar. Esta pérdida es necesaria para mantener estable la “interfase” agua dulce-agua salada. (**Sánchez, S.**, 2004)

2.3 MÉTODO DE SEPARACIÓN DEL HIDROGRAMA UTILIZANDO ISÓTOPOS ESTABLES

La separación de las componentes de flujo es sin duda una de las tareas más complejas y dispendiosas ya que no se puede asegurar con total certeza en qué punto del hidrograma se comienza a presentar la escorrentía subterránea.

Cabe aclarar que los ríos más pequeños responden más rápidamente a los cambios en la composición isotópica de la precipitación que los ríos grandes. Ya que la composición isotópica de los ríos pequeños varía sustancialmente con la mezcla de este que con el agua lluvia. Esto se debe a que el componente de la escorrentía superficial en el caudal es más directo y prominente (**Ronzaski K. & Froehlich K.**, 2002).

2.3.1 Principios y suposiciones

La primera suposición que se hace, es que la escorrentía total se divide en dos componentes, los cuales son agua nueva y agua vieja, donde el agua nueva está identificada como el agua que proviene de la precipitación (escorrentía superficial) y el agua vieja está compuesta por el agua subterránea (flujo base).

El principio de la separación del hidrograma utilizando isótopos estables se basa en la diferencia de firmas isotópicas (composición isotópica) de los componentes del hidrograma. Si no hay ninguna diferencia entre las firmas isotópicas de los componentes, la separación por medio de isótopos estables no se podrá realizar.

2.3.2 Determinación de la desviación isotópica

El primer paso para poder realizar la separación del hidrograma utilizando isótopos estables, es determinar la desviación isotópica, por lo cual se recurre a la ecuación

$$\delta = \frac{C_{MUESTRA} - C_{SNOW}}{C_{SNOW}} \quad (1)$$

2.3.3 Separación de dos componentes

Los primeros estudios de separación de flujo base mediante técnicas isotópicas asumieron la participación única de los dos componentes más importantes del hidrograma: El flujo base y la Escorrentía superficial. Actualmente se ha demostrado que dicha aproximación es correcta y que es posible involucrar más componentes mediante la utilización de trazadores químicos (**Clark I. & Fritz P.**, 1997).

La separación del flujo base puede ser descrita de la siguiente manera:

$$Q_T = Q_S + Q_0 \quad (4)$$

La ecuación (4) se basa en la ecuación de continuidad, es decir: “La razón con la cual un fluido entra en un volumen de control debe ser igual a la razón con la que el fluido sale del mismo volumen”. Donde Q_T representa la escorrentía total, Q_S la componente de escorrentía superficial y Q_0 la componente del flujo base.

Si se supone una mínima variabilidad de la composición isotópica del agua subterránea y se tiene en cuenta la conservación del flujo de masa, suponiendo que no hay pérdidas, se considera que la densidad del sistema representado por la ecuación 4 es constante. Entonces se le aplica este principio a la ecuación 4, denominado balance de masas, que relaciona cada componente con su respectiva concentración isotópica. La ecuación 4 se convierte en:

$$Q_T \bar{\delta}_T = Q_S \bar{\delta}_S + Q_0 \bar{\delta}_0 \quad (5)$$

Donde Q_T , Q_S , Q_0 , son la escorrentía total, escorrentía superficial y flujo base respectivamente y $\bar{\delta}_T$, $\bar{\delta}_S$, $\bar{\delta}_0$, corresponden a las desviaciones isotópicas de la escorrentía total, escorrentía superficial y flujo base respectivamente.

Despejando Q_S en (4) y Q_0 en (5), tenemos:

$$Q_S = Q_T - Q_0 \quad (6)$$

$$Q_0 = \frac{Q_T \bar{\delta}_T - Q_S \bar{\delta}_S}{\bar{\delta}_0} \quad (7)$$

Finalmente se obtiene:

$$Q_0 = Q_T \left(\frac{\bar{\delta}_T - \bar{\delta}_S}{\bar{\delta}_0 - \bar{\delta}_S} \right) \quad (8)$$

Las desviaciones isotópicas requeridas por la ecuación (9) son: δ_T = Desviación isotópica de la esorrentía total; δ_0 = Desviación isotópica del flujo base, compuesta por el agua subterránea y el agua subsuperficial y δ_S = Desviación isotópica de la esorrentía superficial), demandan la realización de muestreos que permitan la caracterización de los tres componentes involucrados.

2.3.4 Determinación de las concentraciones de los componentes del hidrograma

A continuación se presenta las diferentes formas de muestreo que se debe realizar para cada uno de los componentes del hidrograma y así poder determinar las concentraciones isotópicas de cada uno de los componentes.

- **Precipitación.** En la mayoría de las separaciones isotópicas, la mayor parte de la precipitación se recoge y se analiza para rendir un solo valor isotópico al mes. Por esta razón, no es representativo de la precipitación efectiva. Puede ser más realista recoger más de una muestra de la precipitación durante un periodo del acontecimiento y obtener el promedio cargado de las concentraciones isotópicas, este valor será calculado como:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (9)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación en mm y δ_i es la desviación isotópica recogida de la precipitación. Este medio cargado representa la composición isotópica media del agua nueva que entra a la cuenca pero no se toma dentro de la variabilidad isotópica de la tormenta (*Mcdonnell J.J y Bonell M.*, 1991).

- **Flujo Base.** Para la determinación de la concentración isotópica del flujo base se tendrá que muestrear la corriente del río, en varios veranos o épocas de estiaje; con una regularidad de una a dos semanas. Para luego poder determinar su comportamiento promedio mensual o estacional y así poder conocer la concentración isotópica en cualquier época del año. La determinación de la concentración isotópica del flujo base es afectada por el movimiento del flujo.

Flujo Lento: Para la firma isotópica del agua subterránea con flujo lento, se muestrea mensualmente durante todo el año en los piezómetros de los acuíferos alrededor de la zona de estudio de los cuales aportan agua al río, para así conocer el comportamiento mensual del flujo lento.

Flujo Rápido: Para la determinación de la composición isotópica del agua subterránea de flujo rápido, se tendrá que hacer el muestreo en la zona no saturada a diferentes profundidades, para así poder conocer su comportamiento isotópico promedio mensual (**Laudon H. y Hemond H.**, 2002).

- **Escorrentía Total.** Para determinar la concentración de la escorrentía total se debe hacer el muestreo durante el evento con intervalos pequeños, dependiendo de la duración de la precipitación y del comportamiento de la cuenca, se recomienda intervalos de una hora o más cortos, donde debe hacerse el mayor número de muestreo en intervalos más cortos en la rama ascendente del hidrograma, disminuyendo el número de muestreos durante la curva de recesión (**Tekeli Y. y Sorman A.**, 2003).

3. ANÁLISIS DE LOS DATOS EXISTENTES

La cuenca se encuentra bajo el permanente monitoreo de las estaciones meteorológicas, las cuales están a cargo de las diferentes autoridades ambientales. Gracias a estas, se obtienen los datos necesarios para realizar la presente investigación, aportando información de isótopos estables de la Cuenca Superior del río Lebrija. El último estudio de isótopos estables en esta zona fue realizado en el trabajo de grado de Barliza y Cristancho, 2007. Por lo tanto, para darle continuidad y una mejor solución a esta investigación, es importante para el GPH de la UIS, utilizar los datos más recientes en los muestreos de isotopos estables en la C.S.R.L., siendo estos los que se utilizaron.

3.1 Escorrentía Superficial

“Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Este escurrimiento, llamado flujo en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (es decir, que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas)” (**Aparicio**, 1992, pag.27).

Según lo anterior se puede decir que la escorrentía superficial esta directamente ligada a la precipitación, debido a esto en la presente investigación se utilizarán los datos de la precipitación para analizar la escorrentía superficial.

3.1.1 Información de la precipitación

En el estudio realizado por Carrillo y Soto (2009) se tomaron datos de precipitación correspondientes a un periodo comprendido entre los años 2004 – 2007, y este se conservó para todas las estaciones de la red pluviométrica, los cuales se encuentran consignados en el **anexo 1**.

Debido al manejo de información de precipitación, se decide tomar datos correspondientes a las épocas donde se presentan mayores registros de lluvias en Colombia. En nuestro país se presentan dos épocas de lluvia y dos épocas de estiaje en el año, a esto se le llama bimodalidad anual o comportamiento estacional. (**Poveda, G.**, 2000). Las épocas en las que se presenta el ciclo anual en la parte alta de la C.S.R.L. son las siguientes:

- Época seca 1: Compreendida por los meses diciembre, enero y febrero.
- Época húmeda 1: Compreendida por los meses marzo, abril y mayo.
- Época seca 2: Compreendida por los meses junio, julio y agosto.
- Época húmeda 2: Compreendida por los meses septiembre, octubre y noviembre.

Los periodos de lluvia corresponden a las épocas húmedas y fue éstas épocas las se escogen para el desarrollo de este proyecto, cabe aclarar que se toma la información de las épocas húmedas de cada año, además se decide disminuir el periodo de estudio a los años comprendidos entre 2004-2006 ya que en el 2007 no hay registro de datos isotópicos; en el **anexo 1 y 2** se presentan los datos que se tuvieron en cuenta para el estudio.

Además, dentro de las estaciones de la red pluviométrica hay una estación que se decidió agregar debido a que es una fuente de obtención de datos isotópicos, esta estación llamada “La casita”, no posee registros de precipitación por lo que se decide darle como valor, el promedio de dos estaciones aledañas a esta, siendo estas, picacho y Tona.

Estos datos ya se han sometido a análisis más profundos, los cuales se pueden visualizar en el proyecto de grado de Carrillo y Soto, 2009. De hecho el estudio que ellos realizaron son base fundamental y gran aporte, para la realización de la presente investigación.

A continuación, se observa la cantidad de datos de precipitación existentes en cada una de las estaciones en el periodo comprendido entre los años 2004-2007.

Tabla (2). Numero de datos pluviométricos de tipo mensual.

AÑO	MES	BERLIN	EL BRASIL	EL PICHACHO	EL PAJAL	EL RASGON	GRANJA PIEDECUESTA	LA GALVICIA	LA LORA	LA MARIANA	MATAJIRA	SAN ANTONIO	SEVILLA	TONA
2004	Ene	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x
	Feb	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x
	Mar	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x
	Abr	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	May	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Jun	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Jul	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Ago	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Sep	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		x
	Oct	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Nov	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Dic	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
2005	Ene	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Feb	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Mar	x	x			x	x	x	x		x	x	x	
	Abr	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	May	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Jun	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Jul	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
	Ago	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Sep	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Oct	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Nov	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Dic	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabla (3). Numero de datos pluviométricos de tipo mensual.

AÑO	MES	BERLIN	EL BRASIL	EL PICHACHO	EL PAJAL	EL RASGON	GRANJA PIEDECUESTA	LA GALVICIA	LA LORA	LA MARIANA	MATAJIRA	SAN ANTONIO	SEVILLA	TONA
2006	Ene	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Feb	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Mar	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Abr	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	May	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Jun		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
	Jul		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
	Ago		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
	Sep		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	Oct		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Nov		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
	Dic		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
2007	Ene	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Feb			x	x	x	x		x	x		x	x	x
	Mar	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Abr	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	May	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Jun	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Jul	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Ago	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Sep	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Oct	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Nov	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Dic	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
Nº Datos		40	47	46	46	36	47	47	45	47	47	48	40	46

3.1.2 Información isotópica de la precipitación

Como se había mencionado en el numeral anterior el periodo de estudio se redujo por falta de información isotópica en el 2007, es decir que el periodo de estudio depende de los datos isotópicos existentes, para este caso. La red isotópica es menos densa que la pluviométrica ya que se cuenta con 8 estaciones que recolectan la información pertinente. En la tabla 4 y 5 se pueden observar el número de datos isotópicos de cada estación.

Tabla (4). Numero de datos isotópicos de la lluvia.

AÑO	MES	LA CASITA		GRANJA PIEDECUESTA		BERLIN		SAN ANTONIO		LA GALVICIA		LA MARIANA		EL PICACHO		TONA	
		² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O
2004	Ene																
	Feb																
	Mar																
	Abr																
	May																
	Jun																
	Jul																
	Ago																
	Sep																
	Oct	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Nov	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Dic	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
2005	Ene	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Feb	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Mar			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Abr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	May	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Jun	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Jul	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Ago	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Sep	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X
	Oct																
	Nov																
	Dic																

Tabla (5). Numero de datos isotópicos de la lluvia.

AÑO	MES	LA CASITA		GRANJA PIEDECUESTA		BERLIN		SAN ANTONIO		LA GALVICIA		LA MARIANA		EL PICACHO		TONA	
		² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O
2006	Ene																
	Feb																
	Mar	X	X			X	X	X	X			X	X	X	X	X	X
	Abr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	May			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Jun	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X		
	Jul																
	Ago	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Sep																
	Oct	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Nov																
	Dic	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2007	Ene																
	Feb	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Mar																
	Abr																
	May																
	Jun																
	Jul																
	Ago																
	Sep																
	Oct																
	Nov																
	Dic																
Nº datos		18	18	14	14	19	19	20	20	19	19	20	20	19	19	19	19

Además, para verificar la confiabilidad de los datos se utilizó la recta de Craig, esta recta muestra la tendencia lineal que deben tener la relación entre oxígeno 18 y deuterio, a continuación la figura (11) permite observar dicho comportamiento.

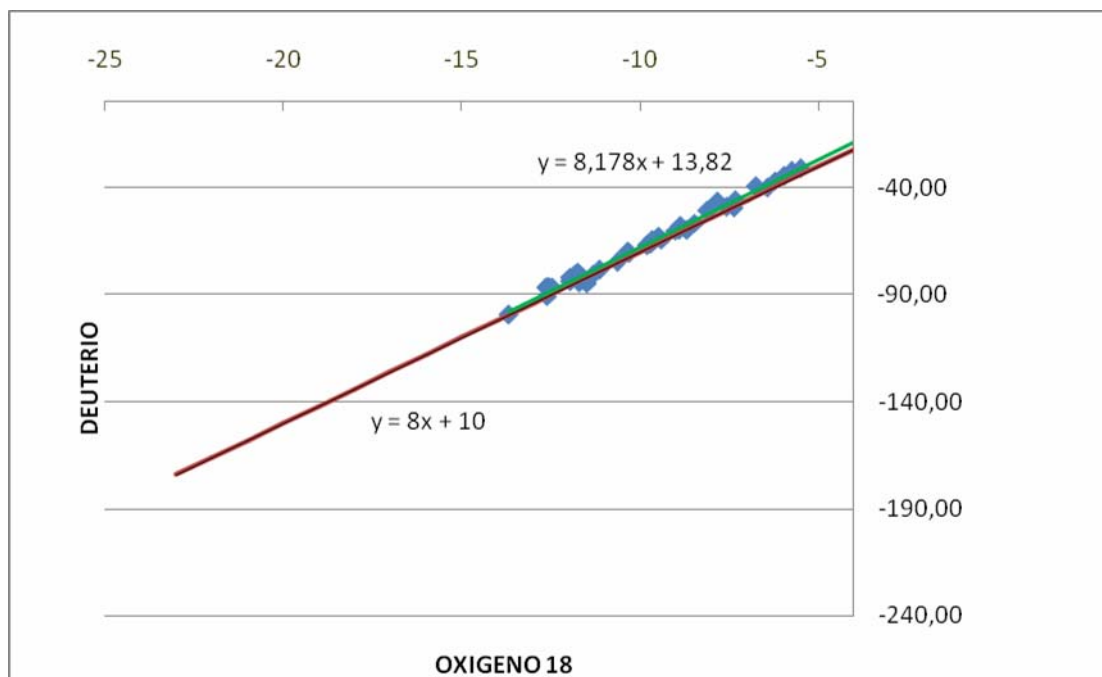


Fig. (8) Recta meteórica de Craig para Escorrentía Directa

Dentro del análisis de los datos de las épocas húmedas de cada año, se observó una alteración en el comportamiento de los datos de la época húmeda 2 del año 2005, esto es a que solo se registró uno de los tres meses que comprende esta época, que corresponde a septiembre, por ende se puede decir que debido a que este mes es cercano a una época seca, la evaporación hace que la concentración de isótopos aumente enriqueciendo las muestras.

3.2 Escorrentía total

El punto de análisis clave para el estudio de esta variable es el cierre de la C.S.R.L. en donde se encuentra la estación Café Madrid esta estación está a cargo del IDEAM, este instituto recopila y almacena información relacionada con los caudales de forma diaria. Los resultados del trabajo de grado de Barliza y Cristancho, 2007 presentan datos isotópicos de este afluente en un periodo comprendido entre agosto del 2005 y abril de 2006 de forma semanal.

Para poder operar los datos entre si es necesario tener los dos datos (caudales y desviaciones isotópicas) en la misma escala temporal, por esto es necesario pasar los datos de caudales proporcionados por el IDEAM a una escala semanal, esto se realizo teniendo en cuenta la siguiente consideración: la muestra escogida para el análisis isotópico correspondía al día en que se presentaba el caudal mínimo en la semana, en los anexos 4 y 5 se presentan los datos utilizados para el estudio de esta variable.

3.3 Flujo base

El flujo base está directamente relacionado con el agua subterránea; en la cuenca la zona en la cual se encuentran los acuíferos más representativos es en la parte aluvial en donde están ubicados los principales centros urbanos.

La información que se tuvo en cuenta para la investigación proviene de una recopilación de datos producto de muestreos hechos en trabajos de grado anteriores, además se incluyo datos provenientes de muestreos a ríos, en épocas de verano en donde el aporte de escorrentía directa es muy poco dejando como principal fuente de abastecimiento hídrica del rio al flujo subterráneo, en la **tabla (6)** se observa los puntos de muestreo y su respectiva coordenada, en la **figura (12)** se presenta la ubicación espacial de dichos puntos .

Tabla (6). Número de datos y ubicación de los puntos de muestreo de flujo base.

DESCRIPCION	ESTE	NORTE	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{2}\text{H}$	COTAS m
barrio Argelia	1103920	1279722	x	x	900
barrio galán	1100750	1277250	x	x	650
barrio independencia	1105090	1281620	x	x	865
ciudad norte	1105350	1282260	x	x	830
estación oriental T	1109328	1275468	x	x	898
jardín la colina	1108271	1278069	x	x	1030
lav, San francisco	1105000	1280651,25	x	x	961
Lavadero Calle 48-33	1106794	1278819	x	x	976
lavadero la cumbre	1109558	1274832	x	x	1000
lavadero la rosita	1105699	1278878	x	x	950
nac, Conucos	1106934	1277488	x	x	930
Nazaret	1104241,28	1281022,35	x	x	880
piezómetro la flora	1107460,49	1277883,35	x	x	1027
Terpel- Chimita	1100458	1276737			676,1
vivero la rosita	1105251	1278261	x	x	893,9
café Madrid	1102861,31	1284359,66	x	x	600
conquistador	1114839,03	1265267,21	x	x	1000
majadas	1106388,88	1282832,29	x	x	760
la esperanza	1111267,07	1273791,47	x	x	1050
rio Tona en surata	1108525,006	1283394,938	x	x	800
rio Charta sobre rio surata	1115843,368	1297071,274	x	x	1360,9
golondrinas sobre Tona	1116195,175	1285283,808	x	x	1380
sobre oro antes rio lato	1109077,419	1262840,8	x	x	850
vereda barrobalnco	1111120,399	1262734,687	x	x	881,8
después de rio lato	1108766,437	1262588,173	x	x	847
bahondo	1100568,283	1271194,314	x	x	750
después de rio frio	1100709,216	1273333,733	x	x	659,4
antes de rio frio	1100382,762	1273161,393	x	x	706,6
después de quebrada zapamanga	1105845,017	1273094,728	x	x	776,42
antes de quebrada zapamanga	1105983,407	1273058,045	x	x	780,9
antes de PTAR	1105376,469	1273181,309	x	x	760,1
después de PTAR	1103926,469	1272863,309	x	x	748
Q, Malaña	1108835	1282674	x	x	1100
Q, La Flora	1107521	1280726	x	x	1160
Q, La Aurora	1109138,68	1279757,001	x	x	1380
Km 11	1110955	1279158	x	x	1580

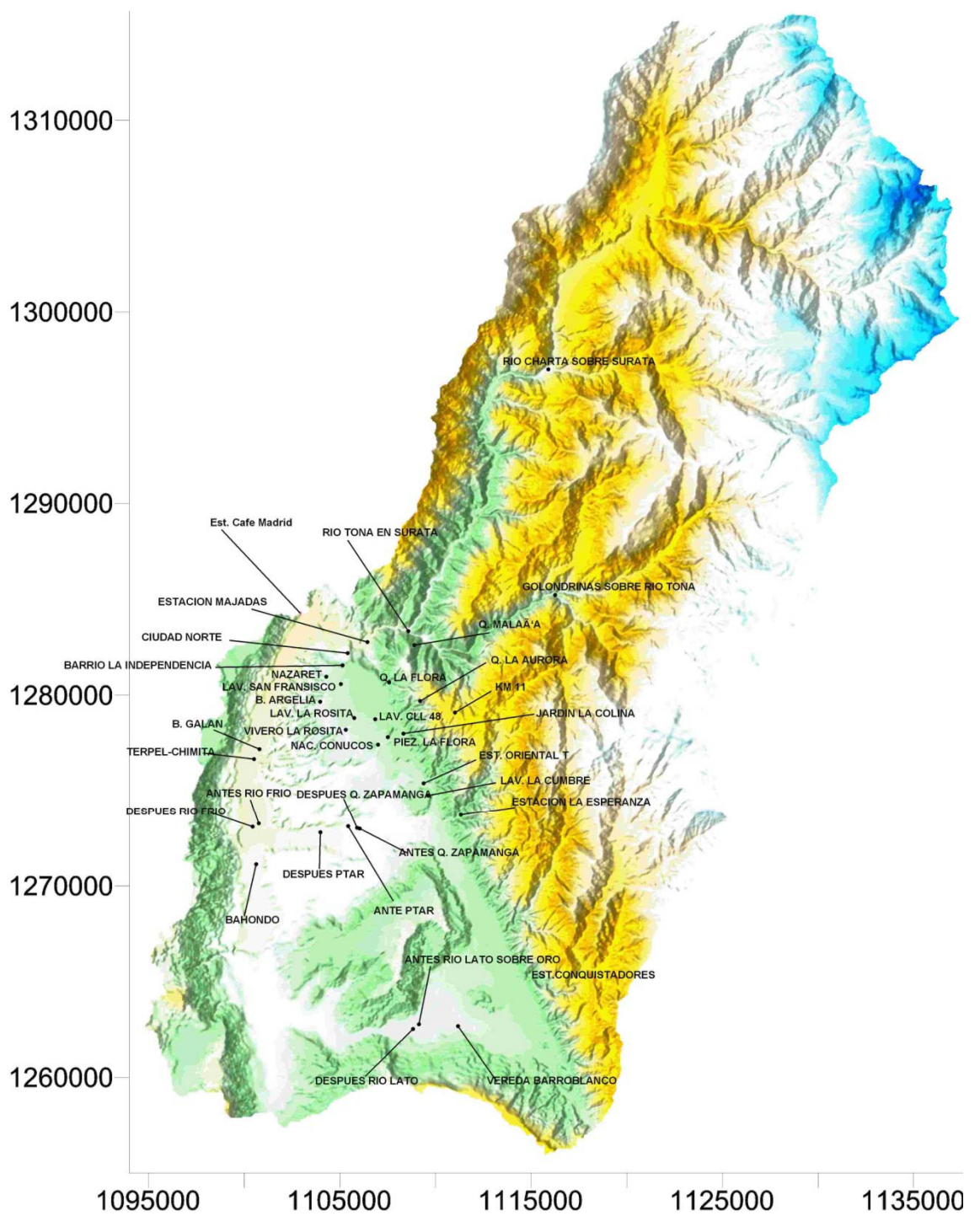


Fig. (9) Ubicación de los puntos de muestreo de aguas subterráneas

A la hora de espacializar los datos se encontró que las coordenadas de algunos puntos estaban aproximadas al kilometro produciendo desfases considerables en la espacialización, estos puntos eran: lavadero san Francisco, piezómetro la flora, la estación Majadas y lavadero la rosita; cuando se espacializan desviaciones isotópicas se espera que el comportamiento sea suave y no haya cambios bruscos, pues esto son síntomas de que las muestras fueron alteradas; luego de espacializar los datos se decidió quitar el punto Terpel – chimita ya que en este punto los valores de desviación estaban muy enriquecidos y no concordaba con el comportamiento isotópico normal de la zona, esto sucede cuando la muestra se evapora por estar mal empacadas. Para verificar la confiabilidad de los datos se utilizó la recta de Craig la cual muestra la tendencia lineal que deben tener la relación entre oxígeno 18 y deuterio, en la siguiente grafica podemos observar dicho comportamiento.

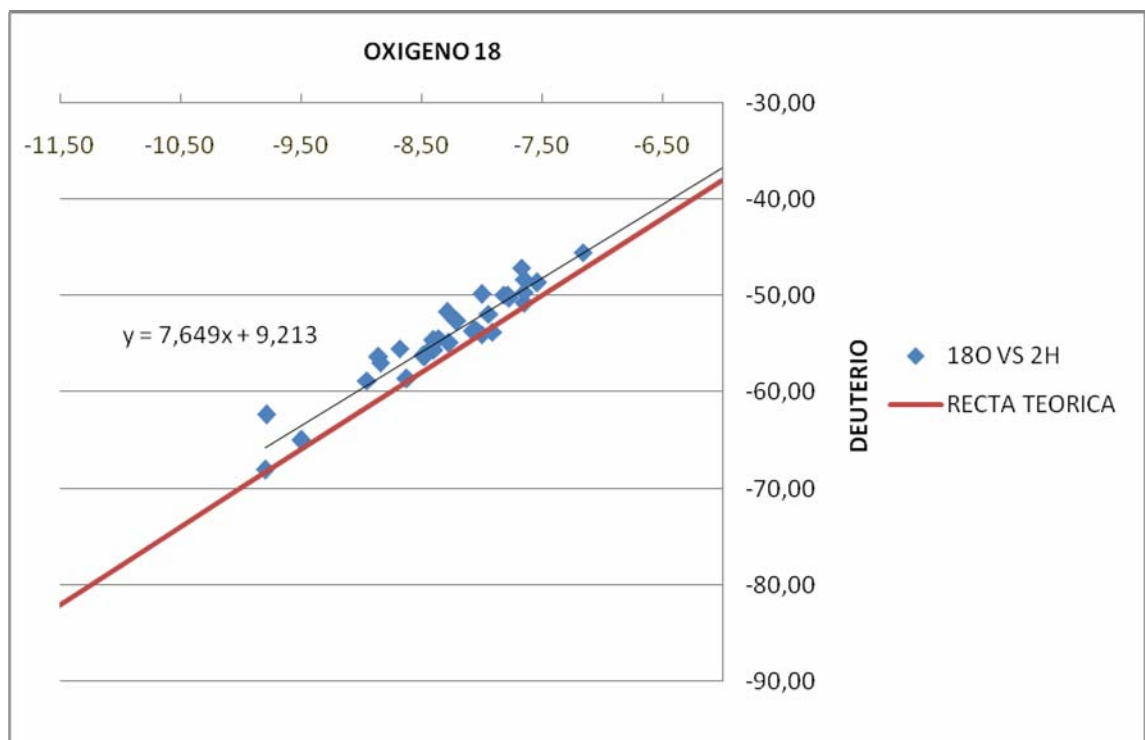


Fig. (10) Recta meteórica de Craig para isotopos de flujo base

4. SEPARACION DEL FLUJO BASE

En este capítulo se presenta el proceso que conlleva la obtención del valor de las desviaciones isotópicas promedio de cada componente del hidrograma para realizar la separación del flujo base en la C.S.R.L. Por lo que se tiene en cuenta el análisis desarrollado en el capítulo anterior, en el cual se realizó la recopilación de los datos y se estableció la información a utilizar realizando una depuración de los datos, así mismo se determinó el periodo de estudio. Posteriormente, se espacializa la información analizada: precipitación, isótopos de la lluvia y agua subterránea, por medio del método Kriging de interpolación del software SURFER.

4.1 OBTENCIÓN DE LAS DESVIACIONES ISOTÓPICAS PROMEDIO

Para realizar la separación de flujo base es necesario tener datos isotópicos puntuales de las diferentes componentes asociadas al proceso, como lo es la desviación isotópica de la escorrentía superficial, de la escorrentía total y del flujo base; ahora bien, la escorrentía superficial y el flujo base están asociados a fenómenos que se distribuyen en el espacio como las lluvias y la formación de acuíferos, lo que sugiere el estudio de una zona específica ya que su comportamiento es anisotrópico, se requiere entonces recolectar información en diferentes puntos dentro de dicha área para poder obtener un valor representativo del fenómeno; una de las formas para obtener este valor representativo es promediar la información recolectada dentro del área de estudio.

Cada dato correspondiente a desviación isotópica y precipitación está ubicado en el espacio mediante una coordenada geográfica, que pertenece al punto en donde se realizó el muestreo; la presente investigación cuenta con una serie de datos correspondientes a desviación isotópica de cada componente así como

precipitaciones; los cuales se utilizaron para interpolar datos faltantes en las zonas de estudio de cada componente. Para realizar dicha interpolación, es necesario espacializar los datos con ayuda de un software llamado SURFER, el cual trabaja con diferentes métodos para interpolar los datos suministrados. Algunos de los métodos que se utilizan son: RBF, IDQ y Kriging, siendo este último el utilizado en la presente investigación, pues representa mejor la realidad teniendo en cuenta su proceso matemático. Además este método permite correlacionar los datos espacialmente mediante a un variograma, los utilizados en este proyecto son: variograma de gauss, exponencial y potencial.

En la siguiente gráfica se presenta la espacialización del isótopo de deuterio correspondiente al flujo base, utilizando los métodos de interpolación: IDQ, RBF y Kriging. Gracias a esta espacialización, se confirmó que el mejor método para el estudio de los isótopos es Kriging.

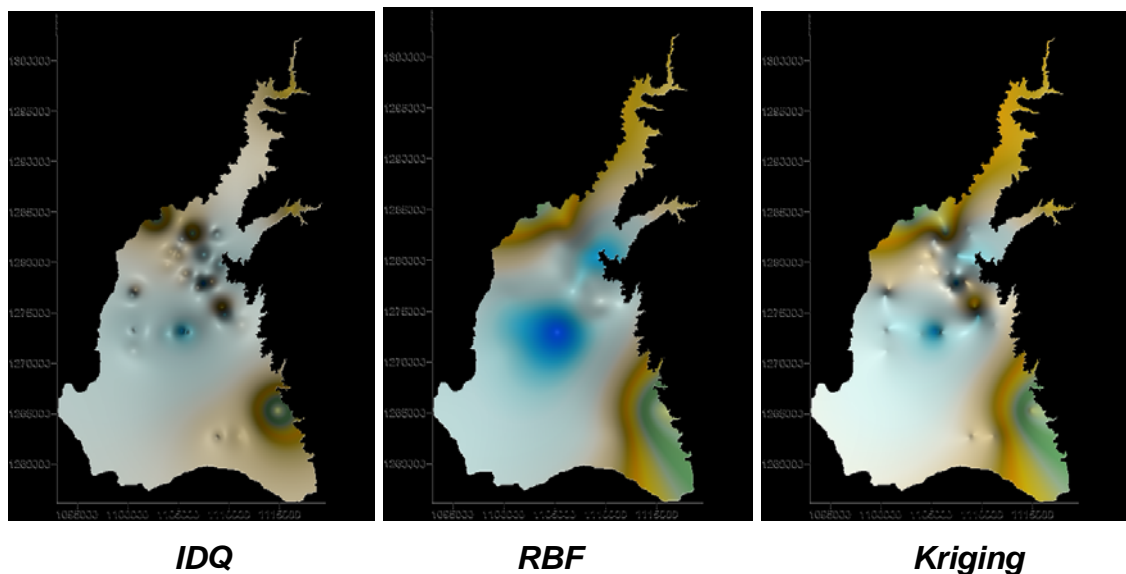


Fig. (11). Distribución espacial utilizando los métodos de interpolación: IDQ, RBF y Kriging

Método Kriging de Interpolación

Kriging es un método geoestadístico de interpolación de datos que utiliza un modelo de variograma para el cálculo de los datos faltantes. Este método se

basa en la premisa de que la variación espacial sigue un mismo patrón, su creador fue Danie G. Krige (1951) y fue publicada Matheron G. (1962).

La formula general que utiliza este interpolador es la siguiente:

$$\Sigma(s_0) = \Sigma_{n=1}^N \lambda_i \cdot Z(s_i) \quad (10)$$

Donde:

$Z(s_i)$ = es el valor medido en la localización i

λ_i = es la ponderación desconocida para el valor medido en la localización i

s_0 = es la predicción para la localización

N = es el numero de valores medidos

En este método λ_i depende de la distancia hacia la localización a predecir, además considera la forma en cómo se organiza espacialmente la totalidad de los puntos en la superficie, para esto es preciso cuantificar la correlación espacial o variograma.

Variograma

El variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, es también llamado análisis estructural de una variable. El variograma actúa como un coeficiente de correlación en una interpolación normal, utiliza un principio básico de la geografía. “las cosas que están más cercanas entres si, poseen una similitud mayor que aquellas ubicadas a una distancia mayor”. Normalmente el variograma utiliza la mitad de la esperanza entre la diferencia de dos datos separados un distancia h.

Para la investigación se utilizaran 3 modelos de variogramas:

- Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - e^{-\frac{sh}{a}} \right] \quad (11)$$

Este modelo es asintótico y tiene un comportamiento lineal en el origen como se muestra en la figura (8).

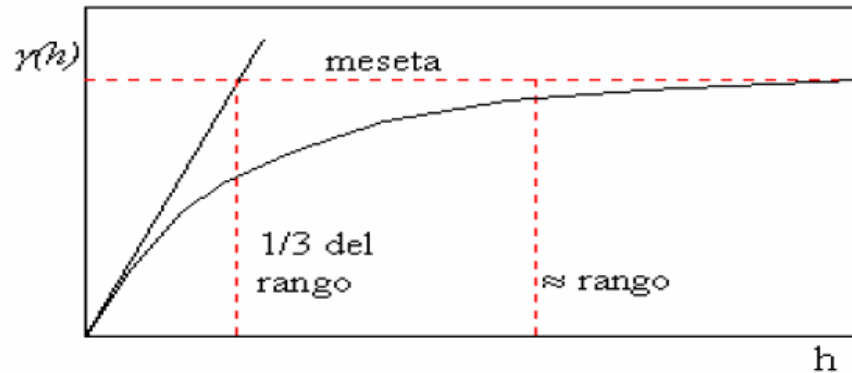


Fig. (12) Comportamiento de un modelo de variograma exponencial

Fuente: (Corvalán y Hernández, 2000)

- Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - e^{-\frac{sh^2}{a^2}} \right] \quad (12)$$

Este modelo también alcanza asintóticamente la meseta y tiene la forma típica de curva Gaussiana como se ilustra en la figura (9).

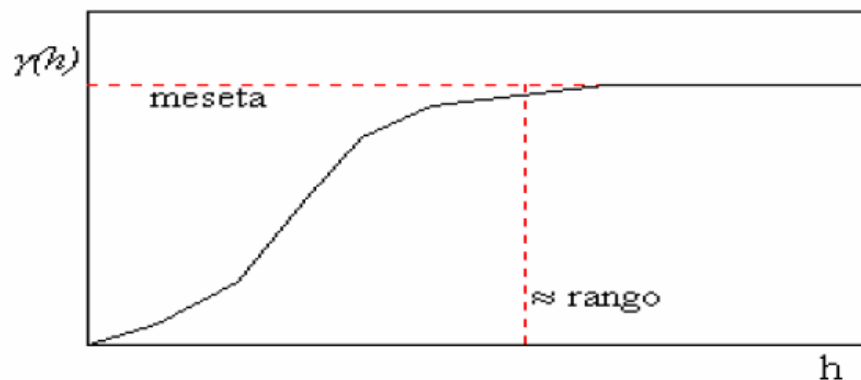


Fig. (13) Comportamiento de un modelo de variograma exponencial

Fuente: (Corvalán y Hernández, 2000)

En los dos caso anteriores c es la varianza es decir el pico, a es el rango, es decir, la distancia en la que el valor del variograma alcanza el 95% del valor del pico.

- Modelo potencial:

$$\gamma(h) = c \cdot (h)^a \quad (13)$$

Donde c es la varianza y a es una potencia entre 0 y 2, este modelo interesante ya que adopta formas diferentes al variar el valor de a como se presenta en la figura (10).

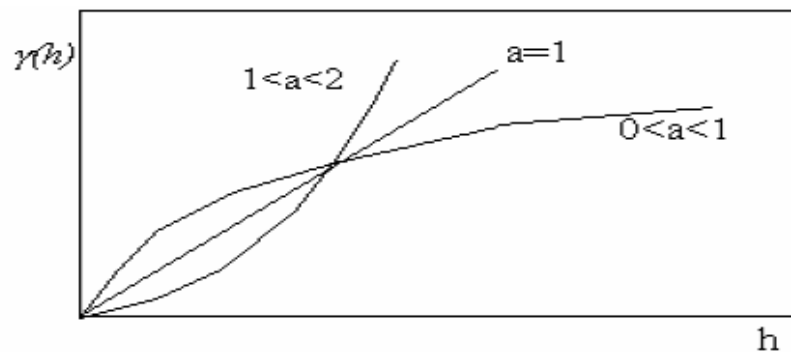


Fig. (14) Comportamiento de un modelo de variograma exponencial

Fuente: (Corvalán y Hernández, 2000)

4.1.1 Espacialización de la Escorrentía Superficial

Para espacializar la precipitación y los isótopos correspondientes a ésta, es importante definir el área en la cual se va a distribuir la información, por lo que se tuvieron en cuenta dos consideraciones: en primera instancia, la ubicación de las estaciones y posteriormente la importancia de la zona en donde se concentra mayor parte de las lluvias y la manera en que éstas afectan la recarga de los acuíferos. Debido a las anteriores consideraciones, se escogió la parte alta de la C.S.R.L. dicha área está limitada hacia el Norte por la divisoria entre la sub-cuenca del río Tona y la de la sub-cuenca del río Suratá,

hacia el sur su limitante es la falla Bucaramanga – Santa Marta; y hacia sus costados es limitada por la divisoria de la C.S.R.L.

En este caso se supone que la precipitación es representativa de la escorrentía superficial, para lo cual se debe hacer un análisis a los datos de precipitación y a las desviaciones isotópicas correspondientes de esta. Dicho análisis se representa mediante la ecuación 9:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (9)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación en mm y δ_i es la desviación isotópica recogida de la precipitación. Este medio cargado representa la composición isotópica media del agua nueva que entra a la cuenca pero no se toma dentro de la variabilidad isotópica de la tormenta (*Mcdonnell J.J y Bonell M.*, 1991).

4.1.1.1 Espacialización de la Precipitación

Como se mencionó en el numeral 3.1.1.1, los datos de precipitación corresponden al muestreo realizado por las distintas estaciones que proporcionaron información mensual, y por ende es útil para su distribución espacial. Se toma como periodo, el comprendido por los años entre 2004 hasta el año 2006.

Para la espacialización se utilizó el software SURFER que trae consigo diferentes métodos de interpolación, entre los cuales están: RBF, IDQ, Polinomial, Kriging, entre otros. Inicialmente se consideró la espacialización de los datos con tres de estos métodos (RBF, IDQ y Kriging) utilizados en el proyecto de grado de Barliza & Cristancho, 2007; pero al ver la espacialización de los datos se constató que Kriging es el que representa mejor la realidad,

deducción a la que han llegado estudios realizados anteriormente (Maldonado & Velasco, 2005), (Barliza & Cristancho, 2007) y (Carrillo & Soto, 2009).

El método Kriging trae consigo la opción de ajustar los datos a un variograma específico, esto nos permite de cierta forma representar mejor la realidad. En el caso de la precipitación el variograma que mejor se ajusta el Gaussiano o variograma de Gauss.

A continuación, se presenta una muestra del ajuste a los datos de precipitación al variograma de Gauss:

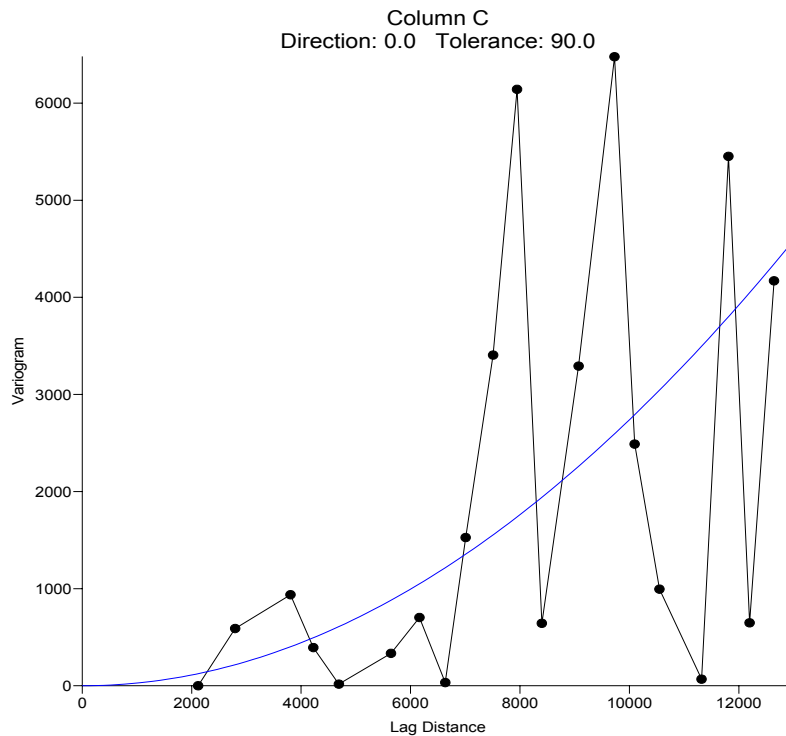


Fig. (15) Variograma Gaussiano ajustado a datos de precipitación

4.1.1.1 Mapas de espacialización de la precipitación

Como se había dicho anteriormente, para obtener los mapas de precipitación, se utiliza la herramienta informática SURFER, y cuyo método de interpolación a utilizar es Kriging, ajustado al variograma Gaussiano.

Se crea un archivo .txt con la información de las coordenadas (x, y) de cada estación y la precipitación (z). Posteriormente, se establece el método de interpolación (Kriging) con el variograma de mejor ajuste (Gaussiano) y adicionando las coordenadas máximas y mínimas del área a espacializar, el programa crea una representación gráfica en 3D, que permite visualizar la distribución de los datos.

Los mapas de precipitación de las épocas húmedas de cada año, con el método de interpolación Kriging y el variograma Gauss, se presentan en el **anexo 6**.

4.1.1.2 Espacialización de Isótopos de llluvias

Como se mencionó en el numeral 3.1.2, se toma como periodo, el comprendido por los años entre 2004 hasta el año 2007. Se realizó la espacialización correspondiente a los isótopos (deuterio y oxígeno 18) cada uno por separado.

Al igual que en la precipitación, para la espacialización de los isótopos se utilizó el software SURFER y también se trabajó con el método Kriging. Como en este método se puede ajustar los datos a un variograma específico, en el caso de los isótopos el variograma que mejor se ajusta el Gaussiano o variograma de Gauss.

A continuación, se presenta una muestra del ajuste a los datos de precipitación al variograma de Gauss:

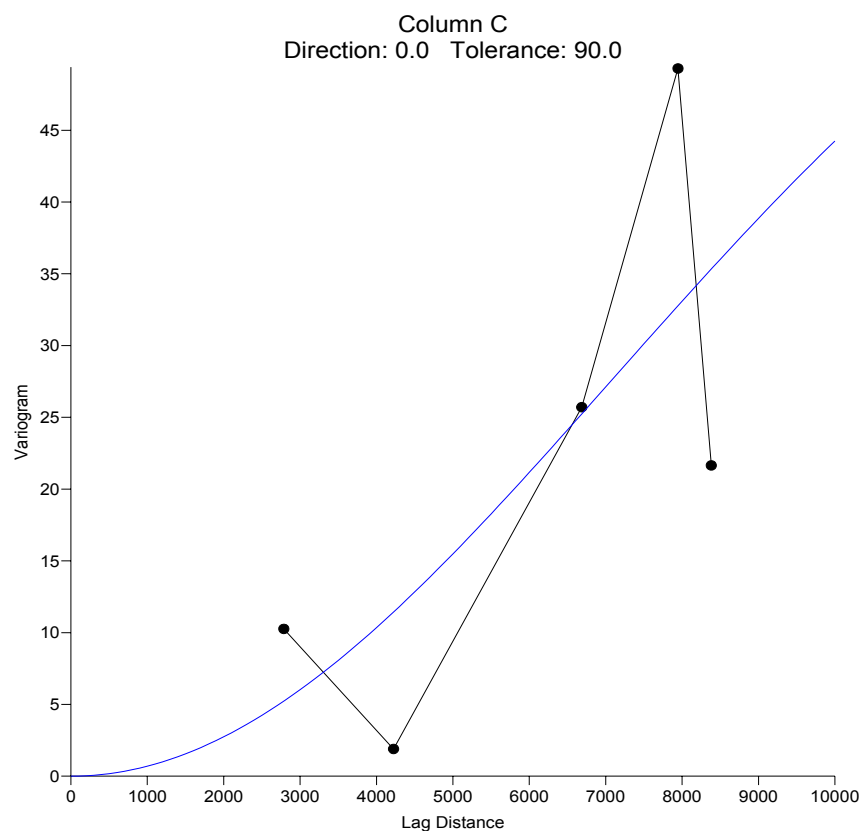


Fig. (16) Variograma Gaussiano ajustado a datos de precipitación

4.1.1.2.1 Mapas de distribución espacial de Isótopos de la precipitación

Como se había dicho anteriormente, para obtener los mapas de precipitación, se utiliza la herramienta informática SURFER, y cuyo método de interpolación a utilizar es Kriging, pues es el método que representa con mejor claridad la realidad, ajustado al variograma Gaussiano, siendo éste el variograma que mejor se ajusta al comportamiento de los datos.

Se crea un archivo .txt con la información de las coordenadas (x, y) de cada estación y la precipitación (z). Posteriormente, se establece el método de interpolación (Kriging) con el variograma de mejor ajuste (Gaussiano) y adicionando las coordenadas máximas y mínimas del área a espacializar, el programa crea una representación gráfica en 3D, que permite visualizar la distribución de los datos.

Los mapas de distribución isotópica de la precipitación de las épocas húmedas de cada año, con el método de interpolación Kriging y el variograma Gauss, se encuentran consignados en el **anexo 12**.

4.1.1.3 Desviación isotópica promedio de la escorrentía superficial

De la espacialización de la precipitación y de las desviaciones isotópicas de oxígeno 18 y deuterio de la lluvia, se obtuvieron los valores promedios para cada época de cada año, utilizando la base de datos que posee el software SURFER, y cuya obtención se realiza mediante un promedio aritmético. A continuación se pueden observar los valores promedios consignados en la siguiente tabla:

ESCORRENTIA DIRECTA			
DATOS TOMADOS EN SURFER POR METODO KRIGING Y VARIOGRAMA GAUSSIANO			
	¹⁸ O	² H	PRECIP.
HM2-04	-11.56335848	-77.3213997	166.5647696
HM1-05	-10.96742848	-62.56342511	129.3498606
HM2-05	-7.375082646	-41.61900532	164.8174569
HM1-06	-10.18754509	-68.92918792	182.548355
HM2-06	-10.80941444	-71.17661954	180.9619624

Dato dudoso

Tabla. (7) Promedios de desviación isotópica y precipitación de cada época húmeda para escorrentía directa

Con los estos datos promedio, y utilizando la ecuación (9), obtendremos el promedio general de cada una de las desviaciones (deuterio e oxígeno 18).

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{(\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i)_{M=2-2004} + (\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i)_{M=1-2005} + (\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i)_{M=2-2005} + (\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i)_{M=1-2006} + (\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i)_{M=2-2006}}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (14)$$

δ_{18O}	-10.8586974
δ_{2H}	-70.4170539

Tabla. (8) Promedios de desviación isotópica para escorrentía directa

4.1.2 Espacialización del flujo base

Una vez se tienen los datos correspondientes a las desviaciones isotópicas de cada punto de muestreo de agua subterránea y sus respectivas coordenadas, se procede a distribuirlos en la zona donde se encuentran los principales acuíferos de la C.S.R.L.

Se decidió que la zona en la que se espacializarían los datos sería la definida por la cota 1500 hacia abajo de la cuenca, ya que como se sabe la zona aluvial está separada por la falla Bucaramanga - Santa Marta, pero se decidió tomar dicha zona para incluir también parte de la subcuenca del río Surata el cual es uno de los ríos más representativos de la C.S.R.L.

El procedimiento es muy parecido al que se siguió en la espacialización de la precipitación, se genera un archivo .txt. Con las coordenadas (x,y) de los puntos de muestreo y la desviación isotópica (z), con este archivo el software SURFER lo que hace es graficar en tercera dimensión, teniendo en cuenta que esto lo hace en un rectángulo definido por las coordenadas mínimas y máximas de la zona de estudio, esto asegura que el plano generado contenga la zona que se quiere, luego se recorta dicha zona con un archivo .bln. Y el resultado es la espacialización de los datos en la zona de estudio, en píxeles de 50x50 m.

Como se decidió anteriormente, el método de interpolación a utilizar es el método Kriging, pero a diferencia de la precipitación el variograma que más se ajusta a los datos isotópicos del agua subterránea es un variograma

exponencial o potencial como se muestra en las figuras 31 y 32; la espacialización se realizó teniendo en cuenta estos dos variogramas.

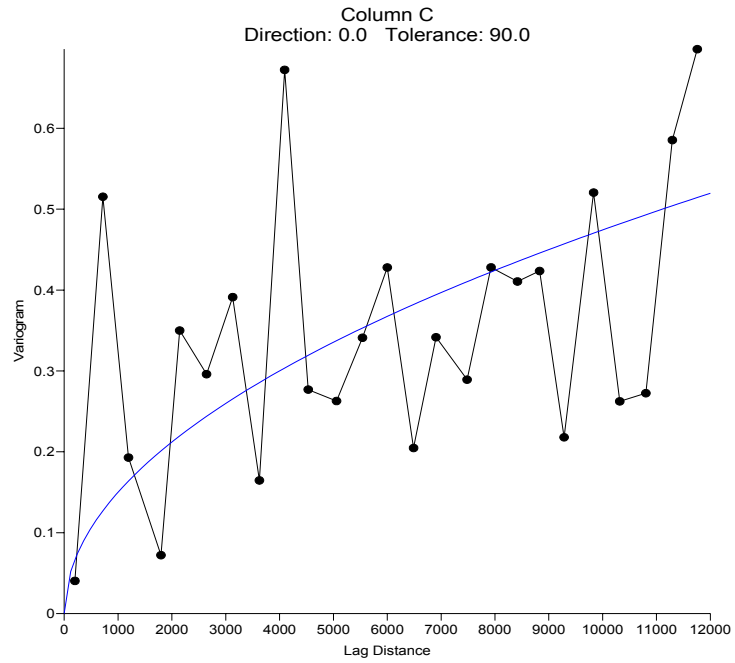


Fig. (17) Variograma potencial ajustado a datos de ^{18}O

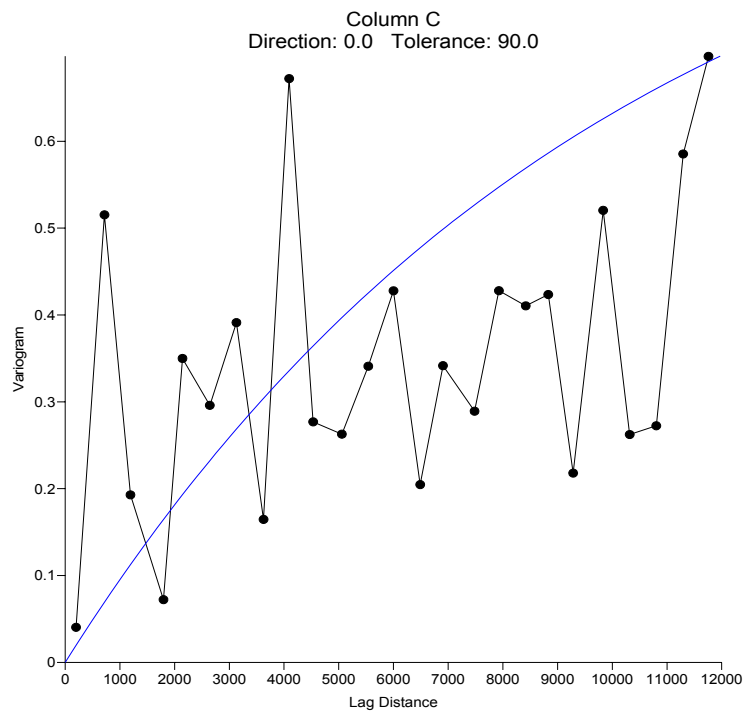


Fig. (18) Variograma exponencial ajustado a datos de ^{18}O

4.1.2.1 Mapas de distribución espacial de isotopos del flujo base

Los mapas de la distribución espacial de la desviación isotópica del flujo base se presentan en el **anexo 22**.

4.1.2.2 Desviación isotópica promedio del Flujo base

De esta espacialización se obtuvieron los valores de los promedios isotópicos haciendo uso de la base de datos que posee el software la cual se comparara con la base de datos del software Access, realizando un promedio aritmético de todos los datos producto de la distribución espacial, los cuales se pueden observar en la siguiente tabla (9).

FLUJO BASE		
DATOS TOMADOS EN SURFER		
VARIOGRAMA	δ 18O	δ 2H
Potencial	-8,5	-55,72
Exponencial	-8,53	-56,018

Tabla. (9) Promedios de desviación isotópica para flujo base

4.1.3 Obtención del promedio isotópico de la escorrentía total

Para la obtención del promedio isotópico de la escorrentía total no es necesario espacializar los datos, ya que esta información es recolectada en un único punto correspondiente al cierre de la cuenca, en donde está ubicada la estación café Madrid; basta con tener los datos de caudales y de desviación isotópica en la misma escala temporal.

Tekeli y Sorman, 2003 presentan en su investigación "Separation of Hydrograph Components Using Stable Isotopes Case Study: The G"uven_c

Basin, Ankara”, una expresión que relaciona el caudal del río con su respectiva componente isotópica, la cual se uso para el desarrollo de la presente investigación.

$$\delta_T = \frac{\sum \delta_i \cdot Q_i}{\sum Q_i} \quad (14)$$

Dónde δ_T representa la desviación isotópica promedio para la escorrentía total, δ_i representa la desviación isotópica correspondiente al día en que se presenta el caudal mínimo y Q_i el caudal mínimo semanal. Una vez se tienen los datos en la misma escala temporal, se procede a utilizar la ecuación (15) obteniendo los siguientes resultados.

ESCORRENTIA TOTAL	
DATOS TOMADOS DE CAUDALES	
δ 18O	δ 2H
-9,2	-63,77

Tabla. (10) Promedios de desviación isotópica para escorrentía total

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez, obtenidas las desviaciones isotópicas necesarias para la separación del flujo base como son; desviación isotópica de la escorrentía total (δ_T), de la escorrentía superficial (δ_S) y desviación isotópica del flujo base (δ_O) promedio representativas para la C.S.R.L., nos remontamos a la ecuación (8), nombrada en el numeral 2.3.4 del presente trabajo, que corresponde a la separación de las componentes del hidrograma mediante isótopos en dos componentes.

$$Q_0 = Q_T \left(\frac{\delta_T - \delta_S}{\delta_O - \delta_S} \right) \quad (8)$$

Se utilizó el método de interpolación, Kriging para la espacialización de la información, utilizando tres formas de correlación espacial de los datos. Dos de estas aplicadas al flujo base (variograma exponencial y potencial) y una aplicada a la escorrentía directa (variograma de Gauss).

Se presenta a continuación, el cálculo tipo mediante ^{18}O , con valores correspondientes a las desviaciones isotópicas promedio obtenidas con el método Kriging, utilizando el variograma exponencial para el flujo base y el variograma Gaussiano para la escorrentía directa:

$$\frac{Q_0}{Q_T} = \left(\frac{\delta_T - \delta_S}{\delta_O - \delta_S} \right) = \left(\frac{(-9,2) - (-10,8586)}{(-8,53) - (-10,8586)} \right) = 71,228\%$$

Se presenta a continuación, el cálculo tipo mediante ^2H , con valores correspondientes a las desviaciones isotópicas promedio obtenidas con el método Kriging, utilizando el variograma exponencial para el flujo base y el variograma Gaussiano para la escorrentía directa:

:

$$\frac{Q_0}{Q_T} = \left(\frac{\delta_T - \delta_S}{\delta_0 - \delta_S} \right) = \left(\frac{(-63,77) - (-70,417)}{(-56,018) - (-70,417)} \right) = 46,163\%$$

Se presenta a continuación, el cálculo tipo mediante ^{18}O , c con valores correspondientes a las desviaciones isotópicas promedio obtenidas con el método Kriging, utilizando el variograma potencial para el flujo base y el variograma Gaussiano para la escorrentía directa:

$$\frac{Q_0}{Q_T} = \left(\frac{\delta_T - \delta_S}{\delta_0 - \delta_S} \right) = \left(\frac{(-9,2) - (-10,8586)}{(-8,5) - (-10,8586)} \right) = 70,32\%$$

Se presenta a continuación, el cálculo tipo mediante ^2H , con valores correspondientes a las desviaciones isotópicas promedio obtenidas con el método Kriging, utilizando el variograma potencial para el flujo base y el variograma Gaussiano para la escorrentía directa:

$$\frac{Q_0}{Q_T} = \left(\frac{\delta_T - \delta_S}{\delta_0 - \delta_S} \right) = \left(\frac{(-63,77) - (-70,417)}{(-55,72) - (-70,417)} \right) = 45,227\%$$

A continuación se muestra una tabla resumen de los resultados obtenidos de la separación del flujo base mediante promedios obtenidos con las diferentes técnicas de interpolación a partir de datos de isotopos estables de los distintos componentes del agua disponibles en la C.S.R.L.

SEPARACION DE FLUJO BASE (%Q_T)		
Variograma Flujo base	¹⁸O	²H
Potencial	70.3226021	45.22711781
Exponencial	71.2285498	46.16312939

Tabla (11). Valores de flujo base a partir de distintas técnicas de interpolación

Para la obtención del flujo base en este trabajo, se hizo necesario implementar las siguientes consideraciones:

- Se tomaron los datos de ^{18}O y deuterio, representativos de la precipitación y de los caudales, en un mismo lapso de tiempo en lo posible, con el fin de ser coherentes en la investigación y que el resultado arrojado se asemeje más a la realidad.
- El análisis de la información isotópica correspondiente a las aguas subterráneas, se realizó teniendo en cuenta los datos más empobrecidos, ya que el flujo subterráneo es menos propenso a evaporarse.
- El análisis de la escorrentía directa, se basa en la información de la precipitación y para analizar este fenómeno se hace importante estudiarlo en épocas donde exista mayor registro de lluvias, las cuales son las épocas húmedas comprendidas entre marzo-mayo y septiembre-noviembre, que son producto de un comportamiento estacional o bimodalidad anual que se presenta en la C.S.R.L.

La separación del flujo base en la cuenca ha sido estudiada desde 2003 utilizando métodos gráficos y algorítmicos, todos ellos arrojan resultados entre 50% - 72% presentados en el trabajo de grado “separación de flujo base en las estación café Madrid” realizado por Balaguera y Serrano, 2006.

La última aproximación de la separación de flujo base utilizando métodos isotópicos fue expuesta en el trabajo de grado de Barliza y Cristancho (2007) donde se obtuvo un valor de 42 - 44% para el flujo base utilizando el método Kriging, aunque en este trabajo se obtuvieron valores de flujo base más altos utilizando otros métodos (IDQ Y RBF), se hace referencia al método Kriging ya que la distribución espacial obtenida mediante este método representa mejor la realidad del comportamiento de los datos.

El valor de flujo base presentado en Barliza y Cristancho (2007), mediante el método Kriging, se sale del intervalo ya estudiado por otros métodos teniendo en cuenta que este método de interpolación es uno de los más robustos del programa SURFER.

Ahora bien, después de la presente investigación podemos observar que el valor del flujo base vuelve a estar dentro del primer rango presentado, lo que ratifica la veracidad de los estudios mediante método gráficos y algorítmicos, se puede decir que Barliza en su estudio despreció ciertas herramientas que hacen que la interpolación se acerque más a la realidad como es el uso de variogramas, también hay que resaltar que en la actualidad se cuentan con muchos más datos de desviaciones isotópicas.

Se puede ver que la separación de flujo base por medio del deuterio y del ^{18}O difieren de forma considerable. Lo cual crea incertidumbre ya que la información de la desviación isotópica del deuterio fue obtenida de la misma manera en la que fue obtenida la información de ^{18}O .

De los resultados podemos observar que el aporte del flujo base sigue siendo importante, a tal punto que representa el 70% aproximadamente de la escorrentía total del río, es decir, que el aporte del flujo base es mayor que el aporte de la escorrentía directa.

Aunque las herramientas de espacialización son poderosas para el cálculo promedio de las desviaciones isotópicas, se debe hacer uso de ellas con cautela, ya que si no son usadas correctamente, pueden llegar a alterar de forma considerable los resultados de una investigación.

Es evidente la importancia del aporte del flujo base al río y de la utilización de métodos isotópicos para el estudio de la separación del hidrograma, dado que este método puede proporcionar una comprensión más cercana a la realidad, pues se tiene información de parámetros físicos de la zona en estudio. Por

ende, se debe dar continuidad al estudio de isótopos estables del agua, para hacer un seguimiento de la principal fuente hídrica que abastece los ríos que es el agua subterránea.

6. CONCLUSIONES

En la presente investigación se obtuvo un valor de flujo base del 70,32 - 71,23% con oxígeno 18 y un valor del flujo base del 45,23 - 46,16% con deuterio, utilizando datos de desviación isotópica de aguas subterráneas pertenecientes a una recopilación de muestreos a pozos, cisternas, drenes y muestreos en ríos que fueron tomados en un periodo comprendido entre noviembre del 2002 y febrero del 2003. Los datos de precipitación y desviación isotópica utilizados corresponden a un periodo comprendido entre los años 2004 – 2006 producto del monitoreo de la red pluviométrica e isotópica en la C.S.R.L.

Para determinar la desviación isotópica promedio de la escorrentía superficial (δ_s) se tuvieron en cuenta diferentes consideraciones que conllevan a un valor aproximado a la realidad. En primera instancia se estableció que la mejor zona para estudiar la componente de la escorrentía directa en la separación del hidrograma corresponde a la parte alta del macizo de Santander y descrita en el presente trabajo, ya que esta zona es la que presenta mayor influencia en la recarga de los acuíferos. Además se tuvieron en cuenta los datos de las épocas húmedas que están comprendidas entre los meses de Marzo – Mayo y Septiembre – Noviembre, de cada año del periodo de estudio, debido al comportamiento estacional que presenta la C.S.R.L., además es en esta época en que se presenta la mayor recarga a los acuíferos.

Para la espacialización de los datos correspondientes a la precipitación y sus desviaciones isotópicas, se analizaron algunos de los diferentes métodos de interpolación que utiliza el software SURFER y se determinó que el método Kriging es el que representa de mejor forma la realidad del comportamiento de los datos, para ello es indispensable hacer una correlación espacial de los datos utilizando variogramas. El que mejor se ajusta a los datos de

precipitación y de sus desviaciones isotópicas correspondientes, es el variograma de gauss. De esta manera se obtuvo un valor para $\delta_s^{18O} = -10,86$ y un valor de $\delta_s^{2H} = -70,42$

En el caso del agua subterránea, el análisis de la información isotópica, se realizó teniendo en cuenta los datos más empobrecidos que corresponden a 36 puntos de muestreo, siendo estos pozos drenes y cisternas, ya que el flujo subterráneo es menos propenso a evaporarse. Además la zona de estudio más idónea es la comprendida desde la cota 1500 hacia el cierre de la cuenca, siendo ésta en la cual se encuentran los principales acuíferos de la cuenca. Se utilizó el método de interpolación Kriging, pero ajustando los datos a los variogramas Exponencial y potencial; obteniendo un valor de $\delta_0^{18O} = -8,5$ y $\delta_0^{2H} = -55,72$ utilizando el variograma potencial y $\delta_0^{18O} = -8,53$ y $\delta_0^{2H} = -56,018$ utilizando el variograma exponencial.

Para el análisis de la esorrentía total no es necesario espacializar los datos ya que la información es recopilada en un único punto, perteneciente al cierre de la cuenca en donde está ubicada la estación café Madrid. Esta estación recopila información diaria de los caudales de este afluente, en la investigación se utilizó la información correspondiente a los años 2005 y 2006, ya que se tienen registros de datos de desviación isotópica en este periodo producto del último muestreo realizado. Es importante tener la información de caudales y de desviación isotópica en una misma escala temporal para que puedan ser operables entre sí. Teniendo en cuenta lo anterior se obtuvo un valor de $\delta_T^{18O} = -9,2$ y de $\delta_T^{2H} = -63,77$

En esta investigación se observa una diferencia considerable entre los valores de flujo base obtenidos utilizando ^{18}O y los obtenidos utilizando 2H , ya que el análisis de los datos de desviación isotópica de las lluvias por medio de la ecuación obtenida con la recta de Craig, presenta un exceso de deuterio ($\delta_{2H} = 8,178 \delta_{18O} + 13,82$), comparado con la ecuación de la recta de Craig teórica ($\delta_{2H} = 8 \delta_{18O} + 10$), por lo tanto se considera como dato confiable de la separación del flujo base, el obtenido utilizando ^{18}O .

En el estudio realizado por Balaguera y Serrano (2006) se presenta un intervalo de valores de flujo base entre 50 – 72% utilizando métodos algorítmicos, pero existe una aproximación de la separación de flujo base utilizando métodos isotópicos que fue expuesta en el trabajo de grado de Barliza y Cristancho (2007) donde se obtuvo un valor de 42 - 44% para el valor de flujo base utilizando el método Kriging, aunque en este trabajo se obtuvieron valores de flujo base más altos utilizando otros métodos (IDQ Y RBF), se hace referencia al método Kriging ya que la distribución espacial obtenida mediante este método representa mejor la realidad del comportamiento de los datos.

La presente investigación arroja resultados confiables que oscilan entre 70,32 - 71,23% utilizando el método Kriging de interpolación y haciendo uso de correlaciones espaciales, por lo tanto, se puede decir que Barliza en su estudio despreció ciertas herramientas que hacen que la interpolación se acerque más a la realidad como es el uso de variogramas, también hay que resaltar que en la actualidad se cuentan con muchos más datos de desviaciones isotópicas que los utilizados en el proyecto de grado de Barliza. El rango de valores de flujo base obtenidos mediante métodos algorítmicos ofrece una buena representación de la realidad, aunque estos no sean los más apropiados, debido a que no consideran parámetros físicos de la cuenca para la separación de los componentes del hidrograma.

RECOMENDACIONES

Se debe estudiar más a fondo la separación del flujo base utilizando deuterio, ya que los resultados de la separación de los componentes del hidrograma con este isótopo difieren de forma considerable de los resultados obtenidos con oxígeno 18, creando incertidumbre dado que los datos del deuterio fueron obtenidos de la misma forma que los datos de oxígeno 18 y fueron analizados por medio de la recta de Craig, presentando en ella un comportamiento coherente; además se sale del rango del valor del flujo base obtenido mediante distintos métodos presentados en proyectos anteriores.

Es recomendable ampliar la cobertura de las estaciones que puedan tomar muestras isotópicas para la precipitación y así aumentar la densidad de los datos en forma espacial, para obtener espacializaciones más cercanas a la realidad.

Es indispensable tomar muestras en la parte baja de la cuenca hacia el municipio de Girón, ya que por falta de datos la espacialización en esta zona se pierde debido a las grandes distancias que hay entre un punto a analizar y los puntos que contienen los datos.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio, F., 1987. Fundamentos de hidrología de superficie., Noriega editores Limusa. p. 27-35.

Baertschi, P., 1976. Absolute ^{18}O content of Standard Mean Ocean Water. Earth and Planetary Science Letters, 31:341-344.

Balaguera, G., Serrano, A., 2006. Separación del Flujo base en la estación Café Madrid. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Barliza, T. & Cristancho, T., 2007. Muestreo de isótopos estables en la escorrentía total de eventos y otros muestreos complementarios. Tesis de grado para optar por el título ingeniero civil. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.

Camacho, H., Guzmán, D., 2005. Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables para obtener la recta meteórica local. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Carrillo, P. y Soto, G., 2009. Comportamiento isotópico de las aguas lluvias en la cuenca superior del río Lebrija. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Chapman, T., 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrologic al Processes.

Chow, Ven Te., 1994. Hidrología aplicada. Editorial McGraw-Hill.

Clark, I., Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. En Hydrograph Separation in Catchment Studies. Lewis Publishers. p. 99-102.

Gómez, S., Colegial, J., 2003. Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el macizo de Santander e identificación de acuíferos. Informe de Investigación.

Gómez, S., Anaya, A., 2004 Acercamiento a un modelo Conceptual de Recarga de los Acuíferos de la Región de Bucaramanga. En Revista Avances en Recursos Hídricos. Número 11. ISSN 0121-5701.

Gómez, I. y Ulloa, 2007. Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central del departamento de Santander. Informe de investigación. Instituto colombiano de geología y minería (INGEOMINAS).

Hageman, R., Nief, G., Roth, E., 1970. Absolute isotopic scale for deuterium analysis of natural waters. Absolute D/H ratio for SMOW. Tellus, 22:712-715.

Hernández, J. y Corvalán, P., 2000. Uso de variogramas para la determinación del tamaño medio de las copas de pino silvestre en imágenes aéreas satelitales. Informe de investigación. Universidad de Chile.

Laudon H., Hemond H., 2002. Oxygen 18 fractionation during snowmelt: Implications for spring flood hydrograph separation. En: Water Resources Research, VOL. 38, NO. 11, ISSN: 10.1029/2002WR001510.

McBratney, A. y Webster, R., 1983. Optimal estimation and Isarithmic Mapping of soil properties V. regionalization and multiple sampling strategy. Journal. King saud University.

McDonnell, J.J., Bonell, M., 1991. Deuterium Variations in Storm Rainfall: Implications for Stream Hydrograph Separation. En: Water Resources Research.

Maldonado, J., Velasco, W. 2005. Implementación de una Metodología para el Muestreo de Isótopos Estables y Aplicación a la Separación de Flujo Base. Bucaramanga, 141p. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

Navia, M., Suárez, M., 1994. Aplicación de isótopos en Hidrología. Bucaramanga, 140p. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

Rozanski, C., Froehlich, K., Mook, W., 2002. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico, Principios y Aplicaciones. Sección III, Agua Superficial, Madrid.

Sánchez, S., 2004. El ciclo hidrológico. Departamento de geología. Universidad de Salamanca. España.

Tekeli, Y., Sorman, A., 2003. Separation of Hydrograph Components Using Stable Isotopes Case Study: The Guvenc Basin Ankara. Journals Tubitak.

Werner, R.A., 2003. The online $18\text{O}/16\text{O}$ analysis: development and application. *Isotopes Environ. Health Stud.* 39, 2, 85-104.

Werner, R., Brand, W., 2001. Referencing strategies and technologies in stable ratio analysis. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 15,501-519.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de Precipitación

PRECIPITACION								
HUMEDA 2 DE 2004	ESTACION	ESTE	NORTE	Sep.	Oct.	Nov.	Prom.	ELEVACION
	LA CASITA	1126368.78	1288792.49				219.33333	2110
	BERLIN-COL	1133945.00	1286396.00	156.1	108.4	61	108.5	3306.7
	PIEDRECUESTA	1111958.00	1264897.00	122.7	261.9	195.8	193.46667	1000.0
	SAN ANTONIO	1111733.00	1276956.00	119.1	182.2	211.9	171.06667	1531.6
	LA GALVICIA	1113124.00	1279371.00	175	220	263	219.33333	1848.0
	LA MARIANA	1116900.00	1281200.00	183	183.5	177.8	181.43333	2481.2
	EL PICACHO	1123563.00	1277828.00	272	171	180	207.66667	3435.4
	TONA	1122281.00	1287627.00	218	239	236	231	1795.9
	SEVILLA	1119263.00	1266801.00		41.5	118	79.75	1907.0
	RASGON	1119914.00	1270294.00				0	1950.0
	EL PAJAL	1119017.79	1281171.15	144.1	172.7	228.7	181.83333	2096.0
	BRASIL	1114643.13	1282860.24	145.4	132.9	249.8	176.03333	1090.0
	LA LORA	1123203.84	1297166.31	111	100.5	113	108.16667	2200.0
	MATAJIRA	1112243.00	1289201.00	96.3	124.8	124.8	115.3	996.0
HUMEDA 1 DE 2005	ESTACION	ESTE	NORTE	Mar.	Abril	Mayo	Prom.	ELEVACION
	LA CASITA	1126368.78	1288792.49				193.5	2110
	BERLIN-COL	1133945.00	1286396.00	5.4	34.9	134.9	58.4	3306.7
	PIEDRECUESTA	1111958.00	1264897.00	19.3	69.3	242.1	110.23333	1000.0
	SAN ANTONIO	1111733.00	1276956.00	11.3	97.6	134.5	81.133333	1531.6
	LA GALVICIA	1113124.00	1279371.00	15	167	191	124.33333	1848.0
	LA MARIANA	1116900.00	1281200.00		112.5	191.2	151.85	2481.2
	EL PICACHO	1123563.00	1277828.00		123	243	183	3435.4
	TONA	1122281.00	1287627.00		99	309	204	1795.9
	SEVILLA	1119263.00	1266801.00	9.4	154.8	159.3	107.83333	1907.0
	RASGON	1119914.00	1270294.00	18.7	92.8	187.7	99.733333	1950.0
	EL PAJAL	1119017.79	1281171.15		56.6	231.2	143.9	2096.0
	BRASIL	1114643.13	1282860.24	20.5	119.5	140.2	93.4	1090.0
	LA LORA	1123203.84	1297166.31	11.2	102.7	120.5	78.133333	2200.0
	MATAJIRA	1112243.00	1289201.00	5.6	86.1	105.3	65.666667	996.0

HUMEDA 2 DE 2005	ESTACION	ESTE	NORTE	Sep.	Oct.	Nov.	Prom.	ELEVACION
	LA CASITA	1126368.78	1288792.49				194.5	2110
	BERLIN-COL	1133945.00	1286396.00	62.7	145.9	119.1	109.23333	3306.7
	PIEDRECUESTA	1111958.00	1264897.00	132.2	156.4	117.4	135.33333	1000.0
	SAN ANTONIO	1111733.00	1276956.00	175.1	149.8	154.7	159.86667	1531.6
	LA GALVICIA	1113124.00	1279371.00	233	217	204	218	1848.0
	LA MARIANA	1116900.00	1281200.00	108.2	222.4	204.7	178.43333	2481.2
	EL PICACHO	1123563.00	1277828.00	150	200	162	170.66667	3435.4
	TONA	1122281.00	1287627.00	80	291	284	218.33333	1795.9
	SEVILLA	1119263.00	1266801.00	132.6	198.5	191	174.03333	1907.0
	RASGON	1119914.00	1270294.00	173.2	159.6	173.5	168.76667	1950.0
	EL PAJAL	1119017.79	1281171.15		190.2	229.5	209.85	2096.0
	BRASIL	1114643.13	1282860.24	186.2	155.2	169.8	170.4	1090.0
	LA LORA	1123203.84	1297166.31	67.4	133.5	133.6	111.5	2200.0
MATAJIRA	1112243.00	1289201.00	67.7	122.9	137.8	109.46667	996.0	
HUMEDA 1 DE 2006	ESTACION	ESTE	NORTE	Mar.	Abril	Mayo	Prom.	ELEVACION
	LA CASITA	1126368.78	1288792.49				217.15	2110
	BERLIN-COL	1133945.00	1286396.00	56	117.2	180.6	117.93333	3306.7
	PIEDRECUESTA	1111958.00	1264897.00	142.6	106.4	200.2	149.73333	1000.0
	SAN ANTONIO	1111733.00	1276956.00	154.7	151.7	176.5	160.96667	1531.6
	LA GALVICIA	1113124.00	1279371.00	162.2	208.9	216.8	195.96667	1848.0
	LA MARIANA	1116900.00	1281200.00	65.4	222.7	201.7	163.26667	2481.2
	EL PICACHO	1123563.00	1277828.00	168	189	261.9	206.3	3435.4
	TONA	1122281.00	1287627.00	173	270	241	228	1795.9
	SEVILLA	1119263.00	1266801.00	156.9	187.8	170.9	171.86667	1907.0
	RASGON	1119914.00	1270294.00	253.45	229.2	212.49	231.71333	1950.0
	EL PAJAL	1119017.79	1281171.15	93.9	206.7	144	148.2	2096.0
	BRASIL	1114643.13	1282860.24	114.9	219.1	154.7	162.9	1090.0
	LA LORA	1123203.84	1297166.31	92.7	102.5	125.5	106.9	2200.0
MATAJIRA	1112243.00	1289201.00	105.6	181.6	138.9	142.03333	996.0	
HUMEDA 2 DE 2006	ESTACION	ESTE	NORTE	Sep.	Oct.	Nov.	Prom.	ELEVACION
	LA CASITA	1126368.78	1288792.49	150.1	295.5	322.9	256.16667	2110
	BERLIN-COL	1133945.00	1286396.00				167.39286	3306.7
	PIEDRECUESTA	1111958.00	1264897.00	125.9	236.9	174.4	179.06667	1000.0
	SAN ANTONIO	1111733.00	1276956.00	106.4	146.9	184.0	145.76667	1531.6
	LA GALVICIA	1113124.00	1279371.00	113.4	160.9	212	162.1	1848.0
	LA MARIANA	1116900.00	1281200.00	121.6	129.5	166.6	139.23333	2481.2
	EL PICACHO	1123563.00	1277828.00	119.7	160.7	75	118.46667	3435.4
	TONA	1122281.00	1287627.00		164.1	177.8	170.95	1795.9
	SEVILLA	1119263.00	1266801.00		153		153	1907.0
	RASGON	1119914.00	1270294.00	163.5	148.99	133.2	222.845	1950.0
	EL PAJAL	1119017.79	1281171.15	97.9	165.4	142.4	202.85	2096.0
	BRASIL	1114643.13	1282860.24	88.2	196.8	201.8	243.4	1090.0
	LA LORA	1123203.84	1297166.31	72.2	106.4	84.8	131.7	2200.0
MATAJIRA	1112243.00	1289201.00	47.4	178.4	143.1	184.45	996.0	

Anexo 2. Datos de isótopos de la precipitación

				18O				2H			
	ESTACION	ESTE	NORTE	Sept.	Oct.	Nov.	Prom	Sept.	Oct.	Nov.	Prom
	HUMEDA 2 DE 2004	LA CASITA	1126237.017	1288712.327		-13.54	-9.09	-11.32		-100.39	-61.06
BERLIN-COL		1133576.695	1286641.787		-14.47	-12.88	-13.67		-105.62	-93.18	-99.40
PIEDRECUESTA		1111958.000	1264897.000		-10.83	-8.11	-9.47		-73.64	-51.15	-62.39
SAN ANTONIO		1111748.439	1276941.177		-11.25	-8.13	-9.69		-79.46	-52.49	-65.97
LA GALVICIA		1112786.282	1279524.359		-12.25	-9.02	-10.64		-87.41	-62.08	-74.75
LA MARIANA		1118279.979	1279536.798		-13.84	-9.78	-11.81		-97.83	-63.56	-80.70
EL PICACHO		1122764.334	1278133.996		-14.40	-10.90	-12.65		-101.35	-72.48	-86.92
TONA		1122281.092	1287627.108		-12.58	-8.10	-10.34		-89.09	-50.68	-69.88
HUMEDA 1 DE 2005	ESTACION	ESTE	NORTE	Marzo	Abril	Mayo	Prom	Marzo	Abril	Mayo	Prom
	LA CASITA	1126237.017	1288712.327	0	-9.09	-14.81	-11.95		-60.55	-107.26	-83.90
	BERLIN-COL	1133576.695	1286641.787	-3.58	-10.11	-14.54	-9.41	-13.84	-72.33	-106.50	-64.23
	PIEDRECUESTA	1111958.000	1264897.000	-1.59	-7.73	-12.77	-7.36	-2.50	-50.59	-95.13	-49.41
	SAN ANTONIO	1111748.439	1276941.177	-2.49	-7.29	-12.99	-7.59	-4.60	-47.66	-94.31	-48.86
	LA GALVICIA	1112786.282	1279524.359	-2.73	-8.34	-13.26	-8.11	-6.17	-52.64	-93.13	-50.65
	LA MARIANA	1118279.979	1279536.798	-4.09	-9.38	-13.15	-8.87	-15.27	-64.65	-94.53	-58.15
	EL PICACHO	1122764.334	1278133.996	-6.50	-12.33	-14.55	-11.13	-38.43	-88.56	-107.96	-78.32
TONA	1122281.092	1287627.108	-4.61	-8.15	-13.25	-8.67	-25.31	-57.44	-96.57	-59.77	
HUMEDA 2 DE 2005	ESTACION	ESTE	NORTE	Sept.	Oct.	Nov.	Prom	Sept.	Oct.	Nov.	Prom
	LA CASITA	1126237.017	1288712.327	-7.82			-7.82	-46.62			-46.62
	BERLIN-COL	1133576.695	1286641.787	-8.47			-8.47	-56.55			-56.55
	PIEDRECUESTA	1111958.000	1264897.000	-6.43			-6.43	-40.18			-40.18
	SAN ANTONIO	1111748.439	1276941.177	-5.75			-5.75	-32.09			-32.09
	LA GALVICIA	1112786.282	1279524.359	-6.22			-6.22	-36.62			-36.62
	LA MARIANA	1118279.979	1279536.798	-6.74			-6.74	-39.26			-39.26
	EL PICACHO	1122764.334	1278133.996								
TONA	1122281.092	1287627.108	-7.32			-7.32	-45.84			-45.84	
HUMEDA 1 DE 2006	ESTACION	ESTE	NORTE	Marzo	Abril	Mayo	Prom	Marzo	Abril	Mayo	Prom
	LA CASITA	1126237.017	1288712.327	-5.06	-6.86		-5.96	-27.94	-40.97		-34.46
	BERLIN-COL	1133576.695	1286641.787	-5.62	-7.67	-22.60	-11.96	-31.90	-47.37	-165.89	-81.72
	PIEDRECUESTA	1111958.000	1264897.000		-4.78	-18.66	-11.72		-29.55	-139.20	-84.37
	SAN ANTONIO	1111748.439	1276941.177	-2.69	-15.49	-19.61	-12.60	-10.09	-115.55	-146.58	-90.74
	LA GALVICIA	1112786.282	1279524.359		-3.54	-7.47	-5.50		-15.11	-46.85	-30.98
	LA MARIANA	1118279.979	1279536.798	-4.81	-7.86	-16.49	-9.72	-27.82	-51.52	-119.05	-66.13
	EL PICACHO	1122764.334	1278133.996	-7.05	-9.00	-21.64	-12.57	-41.36	-58.92	-157.31	-85.86
TONA	1122281.092	1287627.108	-3.76	-8.76	-18.42	-10.31	-16.73	-59.75	-135.04	-70.51	

HUMEDA 2 DE 2006	ESTACION	ESTE	NORTE	Sept.	Oct.	Nov.	Prom	Sept.	Oct.	Nov.	Prom
	LA CASITA	1126237.017	1288712.327		-		-11.48		-84.59		-84.59
	BERLIN-COL	1133576.695	1286641.787		11.48		-12.47		-86.72		-86.72
	PIEDRECUESTA	1111958.000	1264897.000		12.47						
	SAN ANTONIO	1111748.439	1276941.177			-8.91	-8.91		-59.70		-59.70
	LA GALVICIA	1112786.282	1279524.359			-9.00	-9.00		-60.08		-60.08
	LA MARIANA	1118279.979	1279536.798			-9.79	-9.79		-67.08		-67.08
	EL PICACHO	1122764.334	1278133.996				-11.73		-79.36		-79.36
	TONA	1122281.092	1287627.108			11.73			-64.75		-64.75
						-9.65	-9.65				

Anexo 3. Datos de isótopos del flujo base.

DESCRIPCION	ESTE	NORTE	18O	2H	COTAS (m)
barrio Argelia	1103920	1279722	-8,42	-55,50	900
barrio galán	1100750	1277250	-8,40	-55,60	650
barrio independencia	1105090	1281620	-8,40	-54,60	865
ciudad norte	1105350	1282260	-8,07	-53,70	830
estación oriental T	1109328	1275468	-9,79	-62,30	898
jardín la colina	1108271	1278069	-8,48	-56,30	1030
lav, San francisco	1105000	1280651,25	-8,48	-56,30	961
Lavadero Calle 48-33	1106794	1278819	-8,05	-53,50	976
lavadero la cumbre	1109558	1274832	-7,54	-48,60	1000
lavadero la rosita	1105699	1278878	-8,41	-55,50	950
nac, Conucos	1106934	1277488	-8,36	-54,40	930
nazaret	1104241,28	1281022,35	-8,49	-56,20	880
piezómetro la flora	1107460,49	1277883,35	-7,16	-45,50	1027
Terpel- Chimita	1100458	1276737			676,1
vivero la rosita	1105251	1278261	-8,27	-54,90	893,9
café Madrid	1102861,31	1284359,66	-9,50	-65,00	600
conquistador	1114839,03	1265267,21	-9,80	-68,00	1000
majadas	1106388,88	1282832,29	-9,50	-65,00	760
la esperanza	1111267,07	1273791,47	-8,00	-54,00	1050
rio Tona en surata	1108525,006	1283394,94	-7,91	-53,75	800
rio Charta sobre rio surata	1115843,368	1297071,27	-8,95	-58,79	1360,9
golondrinas sobre Tona	1116195,175	1285283,81	-8,62	-58,62	1380

sobre oro antes rio lato	1109077,419	1262840,8	-8,86	-56,35	850
vereda barrobalnco	1111120,399	1262734,69	-8,84	-56,91	881,8
después de rio lato	1108766,437	1262588,17	-8,68	-55,47	847
bahondo	1100568,283	1271194,31	-8,21	-52,65	750
después de rio frio	1100709,216	1273333,73	-7,65	-50,76	659,4
antes de rio frio	1100382,762	1273161,39	-8,29	-51,69	706,6
después de quebrada zapamanga	1105845,017	1273094,73	-7,65	-48,37	776,42
antes de quebrada zapamanga	1105983,407	1273058,05	-8,00	-49,81	780,9
antes de PTAR	1105376,469	1273181,31	-7,67	-47,10	760,1
después de PTAR	1103926,469	1272863,31	-7,82	-49,91	748
Q, Malaña	1108835	1282674	-7,94	-51,90	1100
Q, La Flora	1107521	1280726	-7,65	-49,60	1160
Q, La Aurora	1109138,68	1279757	-7,78	-49,90	1380
Km 11	1110955	1279158	-7,77	-50,20	1580

Anexo 4. Datos de isótopos de la escorrentía total.

	CAFÉ MADRID	
	18O	H2
6-ene-05	-8,36	-56,4
10-ene-05	-8,31	-55,3
23-ene-05	-8,06	-53,5
27-ene-05	-8,26	-54,7
2-feb-05	-7,48	-48,6
7-feb-05	-7,94	-52,6
15-feb-05	-6,99	-45,2
24-feb-05	-7,62	-50,7
4-mar-05	-7,03	-46,0
13-mar-05	-7,60	-50,0
19-mar-05	-7,57	-50,2
25-mar-05	-7,85	-51,9
31-mar-05	-7,33	-48,0
5-abr-05	-7,58	-50,6
17-abr-05	-8,46	-57,3
19-abr-05	-8,17	-55,0
29-abr-05	-8,20	-54,7
2-may-05	-8,16	-54,7
13-may-05	-8,98	-61,3

16-may-05	-9,25	-63,1
27-may-05	-8,75	-60,6
30-may-05	-8,76	-60,1
14-jun-05	-9,76	-67,0
23-jun-05	-9,06	-61,3
3-jul-05	-8,91	-59,7
5-jul-05	-8,76	-59,0
15-jul-05	-8,94	-60,7
24-jul-05	-8,86	-60,7
28-jul-05	-8,32	-56,3
8-ago-05	-8,26	-57,5
20-ago-05	-8,87	-61,3
24-ago-05	-8,81	-60,6
31-ago-05	-8,64	-59,9
5-sep-05	-8,29	-56,3
18-sep-05	-7,94	-54,4
19-sep-05	-8,01	-53,9
2-oct-05	-8,92	-60,5
4-oct-05	-8,59	-58,6
10-oct-05	-8,21	-56,0
21-oct-05	-8,91	-61,9
26-oct-05	-8,93	-61,0
6-nov-05	-8,81	-60,4
9-nov-05	-8,85	-59,6
17-nov-05	-10,09	-68,0
22-nov-05	-9,00	-61,5
30-nov-05	-8,98	-61,7
11-dic-05	-8,63	-58,7
14-dic-05	-8,78	-59,5
20-dic-05	-8,66	-58,9
31-dic-05	-8,46	-56,6
06-ene-06	-9,00	-61,6
13-ene-06	-9,03	-60,3
21-ene-06	-9,06	-63,1
29-ene-06	-9,14	-63,2
31-ene-06	-9,13	-64,9
11-feb-06	-7,71	-51,5
19-feb-06	-7,92	-53,1
23-feb-06	-8,00	-52,5
02-mar-06	-7,98	-53,9
11-mar-06	-7,66	-52,1
17-mar-06	-7,49	-49,2
22-mar-06	-7,53	-49,3

02-abr-06	-8,19	-53,3
04-abr-06	-7,75	-51,6
11-abr-06	-7,61	-50,8
23-abr-06	-7,84	-51,7
25-abr-06	-8,50	-57,3
01-may-06	-9,13	-67,29
14-may-06	-13,37	-98,06
21-may-06	-9,38	-66,12
24-may-06	-9,38	-65,72
29-may-06	-9,25	-67,53
07-jun-06	-10,36	-73,43
17-jun-06	-9,98	-68,26
24-jun-06	-10,2	-68,59
01-jul-06	-9,45	-66,08
03-jul-06	-10,77	-76,12
13-jul-06	-10,87	-76,09
22-jul-06	-9,9	-69,1
26-jul-06	-9,71	-66,31
31-jul-06	-9,65	-68,19
08-ago-06	-9,28	-65,28
17-ago-06	-9,71	-65,7
21-ago-06	-9,31	-62,75
04-sep-06	-9,5	-64,96
16-sep-06	-9,38	-67,56
24-sep-06	-9,76	-66,37
27-sep-06	-9,32	-65,71
02-oct-06	-9,42	-69,81
09-oct-06	-9,63	-65,76
21-oct-06	-10,05	-69,71
29-oct-06	-9,56	-66,24
04-nov-06	-9,56	-65,33
10-nov-06	-9,33	-64,74
13-nov-06	-9,08	-61,41
21-nov-06	-9,52	-63,52
02-dic-06	-9,3	-62,75
09-dic-06	-9,32	-63,12
11-dic-06	-9,32	-62,34
22-dic-06	-9,38	-62,04
31-dic-06	-9,06	-62,54

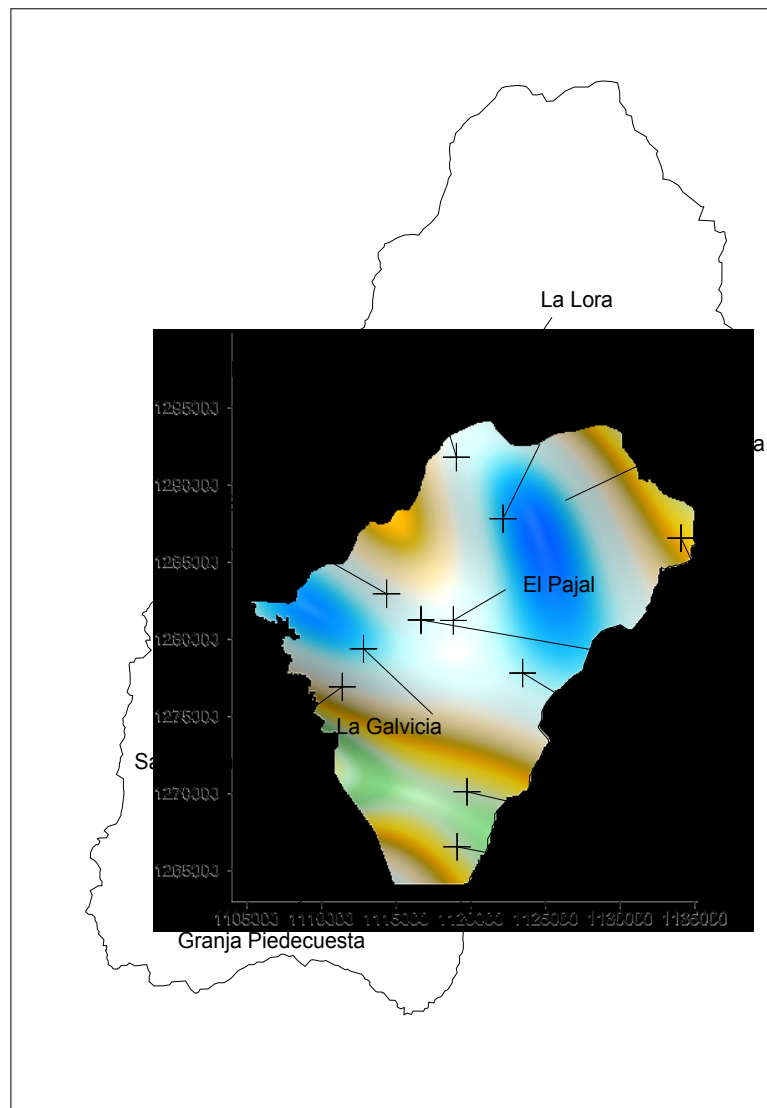
Anexo 5. Caudales diarios en la estación café Madrid año 2005.

ID E A M				S I S T E M A D E I N F O R M A C I O N				H I D R O M E T E O R O L O G I C A					
				C O N S U L T A D I A R I A				[2 0 0 5]					
Esta	cion	:	23	19729	CAFE	MADRI	D	Ins	talada	DI	C-196	8	
Para	metro	:	CA UD					Sus	pendid	a			
MEDI	OS	?	S					Cat	egoria	LG			
Peri	odo	:	20	may-20	6			Ent	idad		1		
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	13.35	14.78			5.86	11.78	10.45	11.64	9.42	9.2	18.1	30.06	40.14
2	12.97	13.75			5.81	7.15	11.33	10.69		9.12	17.69	26.22	42.21
3	12.42	12.99			10.26	19.27	11.33	10.14	11.72	9.12	14.74	26.9	39.59
4	12.2	13.16			5.95	19.29	10.14	10.69	11.3	9.58	15.2	23.95	39.08
5	12.4	12.97			5.77	18.36	15.09	9.9	10.29	9.23	14.35	18.46	43.82
6	12.04	13.13		7.32	9.98	20.68	17.89	10.45	9.9	10.24	13.36	17.1	53.5
7	13.1	12.67		7.23	6.47	13.91	25.3	14.39	10.16	19.86	13.33	16.71	39.46
8	12.69	28.27		6.49	5.77	10.14	22.76	16.65	10.18	11.59	17.98	14.96	38.88
9	12.26			10.42	5.68	11.33	23.15	17.04	9.97	9.82	33.54	15.38	38.22
10	12.04	32.75		7.15	5.95	18.12	31.13	16.65	9.9	9.71	21.35	27.96	37.65
11	12.59			6.65	6.82	14.15	21.36	13.92	10.21	19.66	35.83	35.58	36.27
12	13.6			6.49	6.32	9.18	21.61	16.65	10.33	10.3	20.48	32.86	36
13	12.92			6.32	11.48	7.81	16.26	13.6	10.42	9.24	22.01	73.83	34.8
14	12.69			6.23	6.65	14.37	13.22	12.9	10.08	9.42	18.6	46.28	36.46
15	24.43			6.32	7.32	12.27	19.29	12.58	11.28	9.87	28.16	44.23	36.45
16	26.24			6.14	7.15	11.64	16.65	14.19	12.18	8.76	36.78	49.32	17.37
17	34.74			5.86	6.14	18.36	15.87	12.58	19.18	8.91	29.61	39.07	16.37
18	42.98			6.04	5.81	26.91	15.48	12.74	11.74	8.6	31.44	43.73	16.07
19	28.4			5.95	5.58	44.27	14.31	12.27	10.63	8.96	19.68	47.6	15.88
20	20.9			6.23	8.7	26.37	13.6	12.11	10.21	9.35	16.25	44.27	16.6
31	13.16			5.49		13.22		9.66	9.56		35.65		12.29
MEDIA	17.09	17.16		6.31	6.99	16.22	15.8	12.18	10.94	12.67	25.58	40.24	26.91
MAXIMA	49.2	39.8		13.5	13.5	48.1	31.1	17.4	30.5	127.7	102.2	109.4	96.2
MINIMA	12.04	12.67		5.36	5.58	7.15	10.14	9.66	9.42	8.6	13.33	14.96	12.29
				**	* VAL	ORESA	NUALES	***					
				ME	DIA			17.341					
				MA	XIMA	ABSOLU	TA 1	27.7					
				MI	NIMA	MEDIA		5.36					

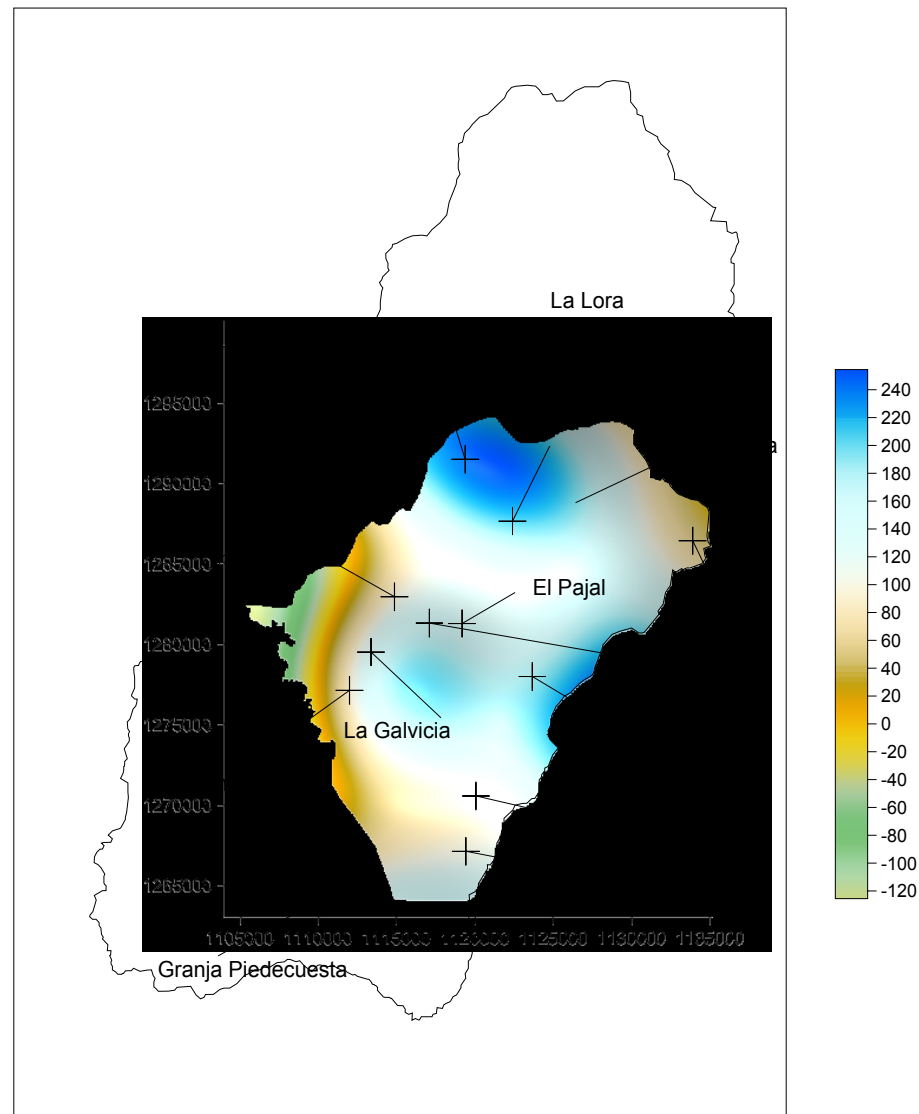
Anexo 6. Caudales diarios en la estación café Madrid año 2006.

ID E	A M	SIST EMA	D E INFOR C	MACIO ONSUL	N HIDR TA DIA	OMETEOR RIA [2	OLOGIC 006]	A					
Esta Para MEDI Peri	cion : 23 metro : CA OS ? S odo : 20	UD	19729 CAFE	MADRI	D		Ins Sus Cat Ent	talada pendid egoria idad	DI a LG	C-196	8		
			may-20	6						1			
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	11,9	18,4		15,8	13,6	33,4	28,6	11,9	13,4	21,1	13,6	20,5	16,5
2	11,5	11,1		13,6	8,4	36,1	43,8	11,3	15,5	22,9	13,9	18,5	15,3
3	16,3	10,7		21,8	14,5	39,7	30,1	11,3	13,3	18,8	14,5	17,2	14,5
4	12,1	18,8		14,9	13,6	45,9	29,9	10,8	11,9	17	28,5	16,2	14,3
5	18,9	14,1		14,9	24,1	41,1	58,9	11,9	14,5	16,6	19,8	15,4	21,7
6	14,8	10,3		15,4	24,8	75,2	34,6	12,3	12,2	18,3	17,3	14,9	18,5
7	24,8	10,3		35,2	26,4	64,2	36,4	12,4	10,9	19,2	16,1	14,8	17,3
8	15,5	19,4		20,4	16,3	78,2	43,2	13,8	9,7	21,2	15,2	20,3	16,2
9	12,9	15,8		20,9	16	83,7	32,4	12,9	9,2	20,9	14,4	22,2	14,8
10	11,8	19,6		15,4	17,2	79,6	67,4	12,1	9	19,2	14,1	19,8	13,8
11	11,5	9,6		13,6	16,3		49,3	11,4	9,6	17,7	18,9	18,6	13,1
12	11,4	13,1		20,7	17,4	100,9	32,5	10,8	12,6	17	18,9	17,1	12,6
13	11,4	8,6		14,3	54,4	74,4	29	10,6	10,4	21,2	44,1	16,9	12,6
14	10,9	11,1		13,1	54,4	81,8	36,9	24,6	8,9	20,4	34,7	28,5	13,7
15	11,6	14,9		26,3	38	52,2	34	21,8	8,3	17,9	38,3	25,3	13,9
16	10,6	13,6		14,5	76	45,7	33,6	16,9	7,9	16,3	37	32,3	14,4
17	10,3	7,4		15,8	29,4	54,2	21,2	17,3	7,9	16	76,2	25,5	14,3
18	10,2	8,4		26,7	26,4	55,3	21	17,6	11,4	24,3	35,6	21	13,1
19	10	7,4		14,1	38,4	42,7	21,6	16,8	17	43,7	56,7	40,7	12,2
20	9,7	7,4		13	37	37,8	20,1	15,8	21,4	27,8	49,8	21,1	11,8
21	9,7	8,4		12,4	29,4	34,9	19,9	14,4	20,4	23,3	38,7	18,9	11,3
22	9,5	8		14,1	27,8	32,6	19,9	13,4	18,5	20,7	56,3	18,7	11,1
23	9,6	6,8		23,8	26,3	30	17,1	12,6	17	18,7	31,9	20,1	10,6
24	12,6	7,1		17,8	27,1	29,3	14,7	12,1	18,7	17,3	26,7	21	10,2
25	9,8	8,4		32,5	28,4	28,6	13,9	11,9	23,7	16,7	25,2	39	10
26	9,4	8,8		27	27,5	28,6	13,9	11,4	42,3	16	25,2	28	9,9
27	11,4	20,9		17,3	38,8	27,9	14,8	16	34,1	15,6	24,2	22,3	9,3
28	11,1	15,4		15,2	31,1	27,9	13,7	14,7	23,2	14,8	23,1	20,1	9,3
29	9,9			13,6	32,7	27,9	13	15,3	19,5	14,1	22,1	18,1	9,3
30	9,7			12,3	31,3	28	12,5	14	19,6	13,5	21,6	17,7	8,7
31	10,5			11,5		31,2		13,1	19,2		24		8,7
MEDIA	12	11,9		18	28,8	48,3	28,6	14	15,8	19,6	28,9	21,7	13
MAXIMA	49,3	26,4		95,2	120,8	147,4	118,6	92,6	71,2	98,7	123,9	105,4	40,1
MINIMA	9,4	6,8		11,5	8,4	27,9	12,5	10,6	7,9	13,5	13,6	14,8	8,7
				**	* VAL	ORES A	NUALES		***				
				ME	DIA				21,717				
				MA	XIMA	ABSOLU	TA 1		47,4				
				MI	NIMA	MEDIA			6,8				

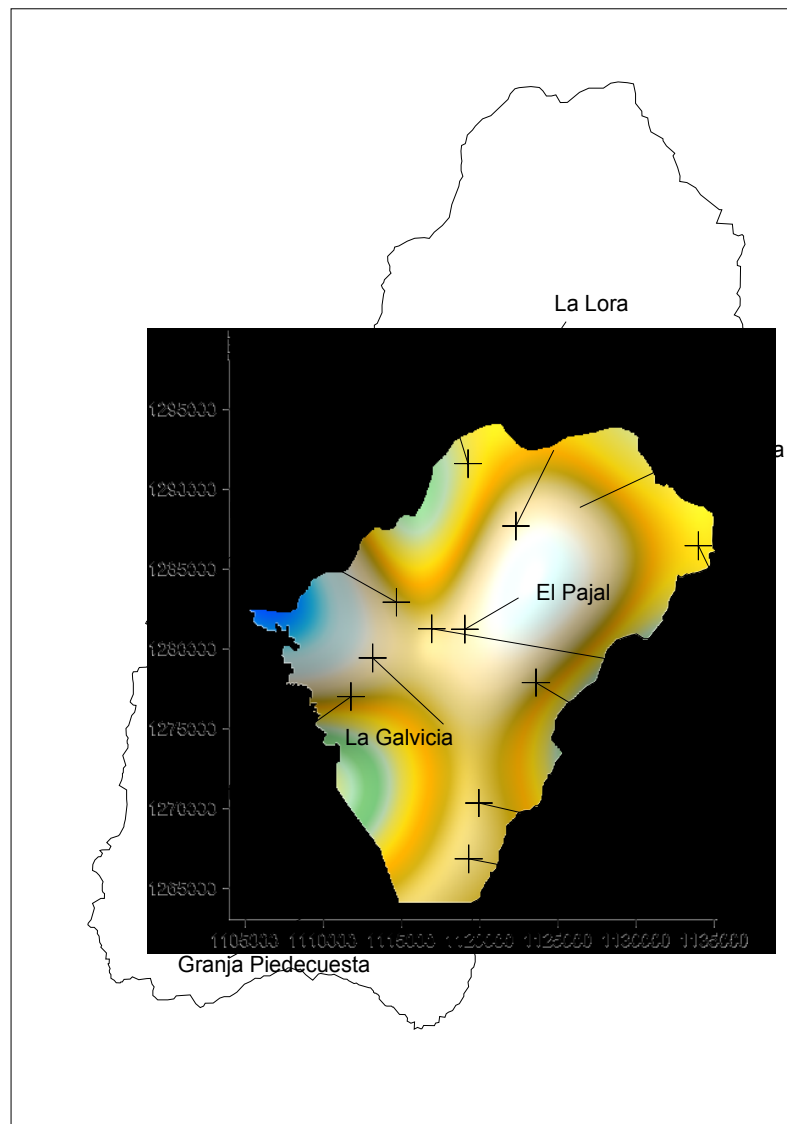
Anexo 7. Mapa de precipitación de Época Húmeda 2 de 2004



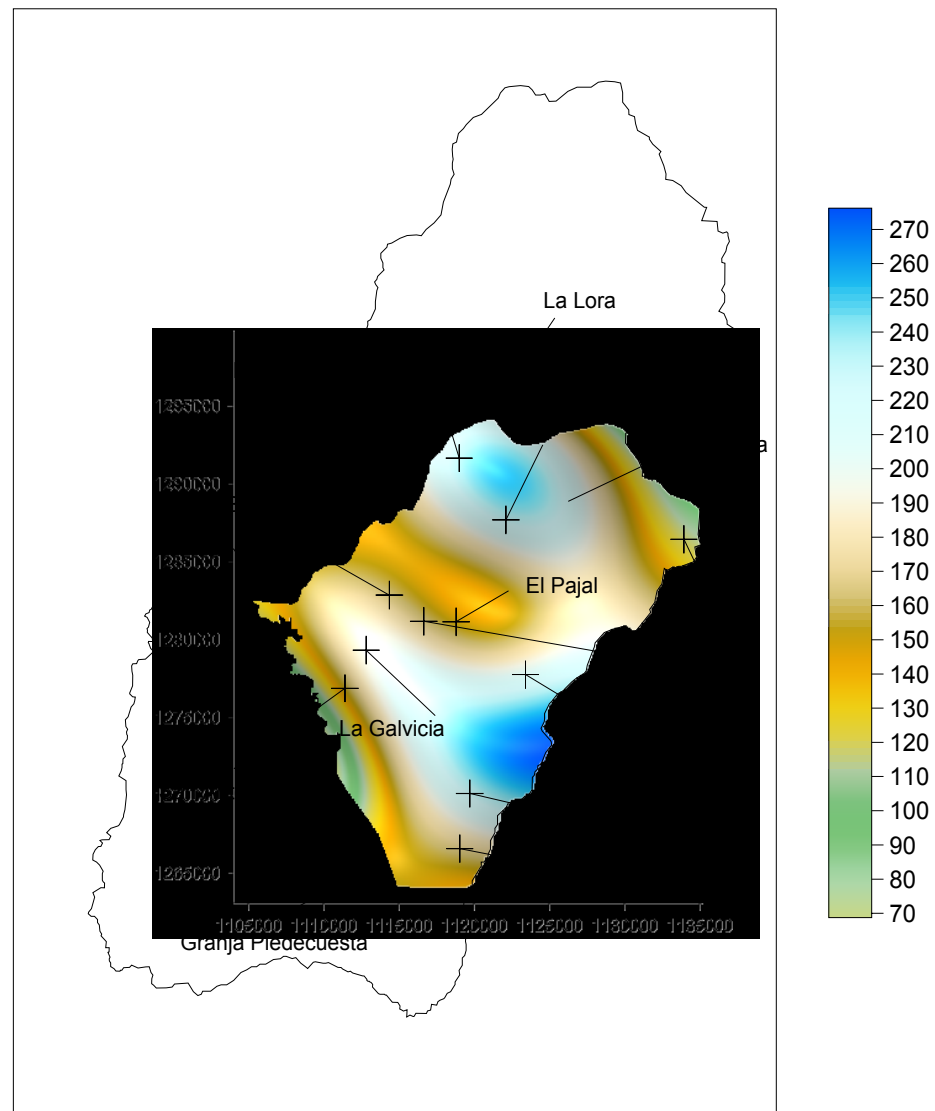
Anexo 8. Mapa de precipitación de Época Húmeda 1 de 2005



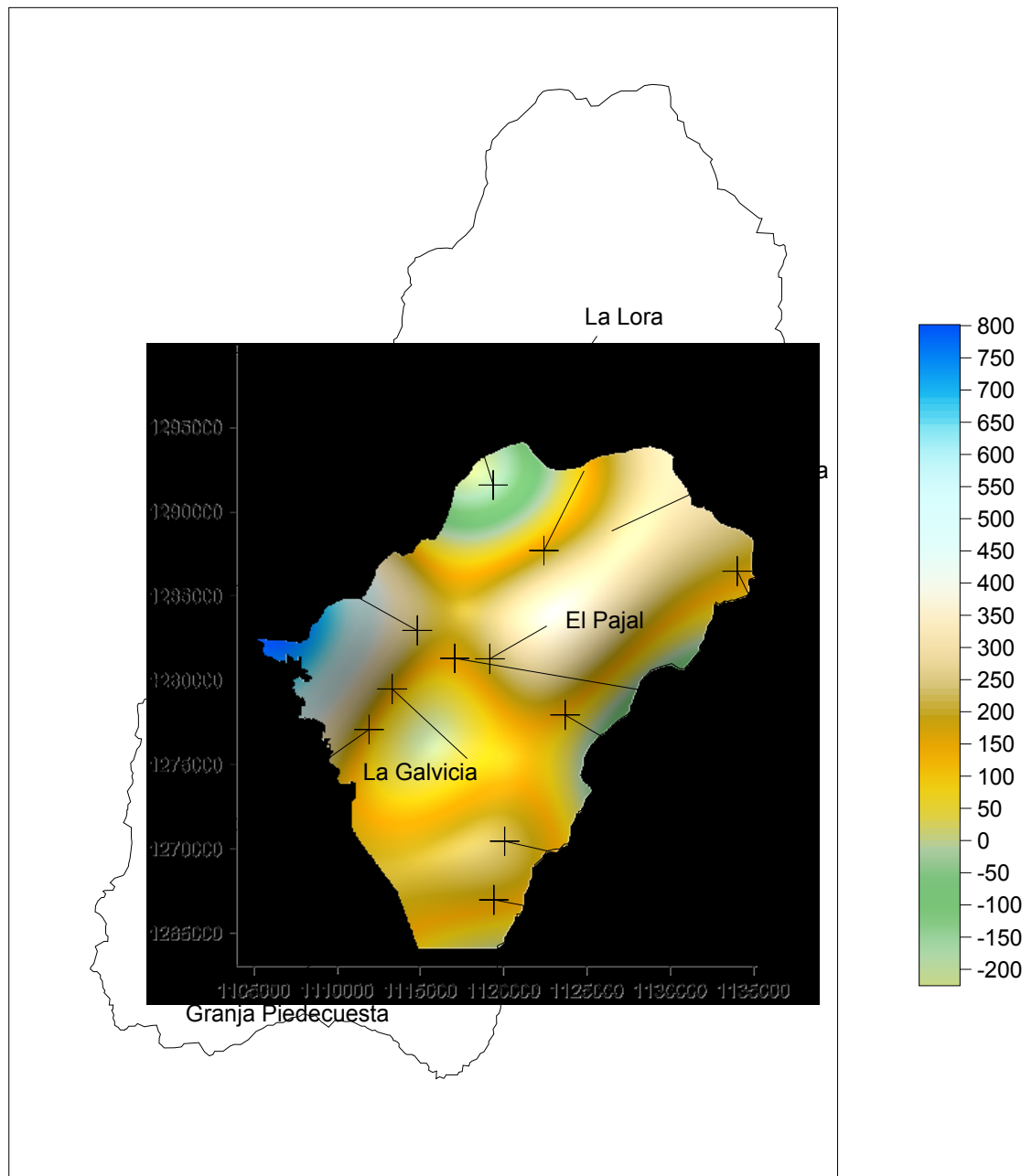
Anexo 9. Mapa de precipitación de Época Húmeda 2 de 2005



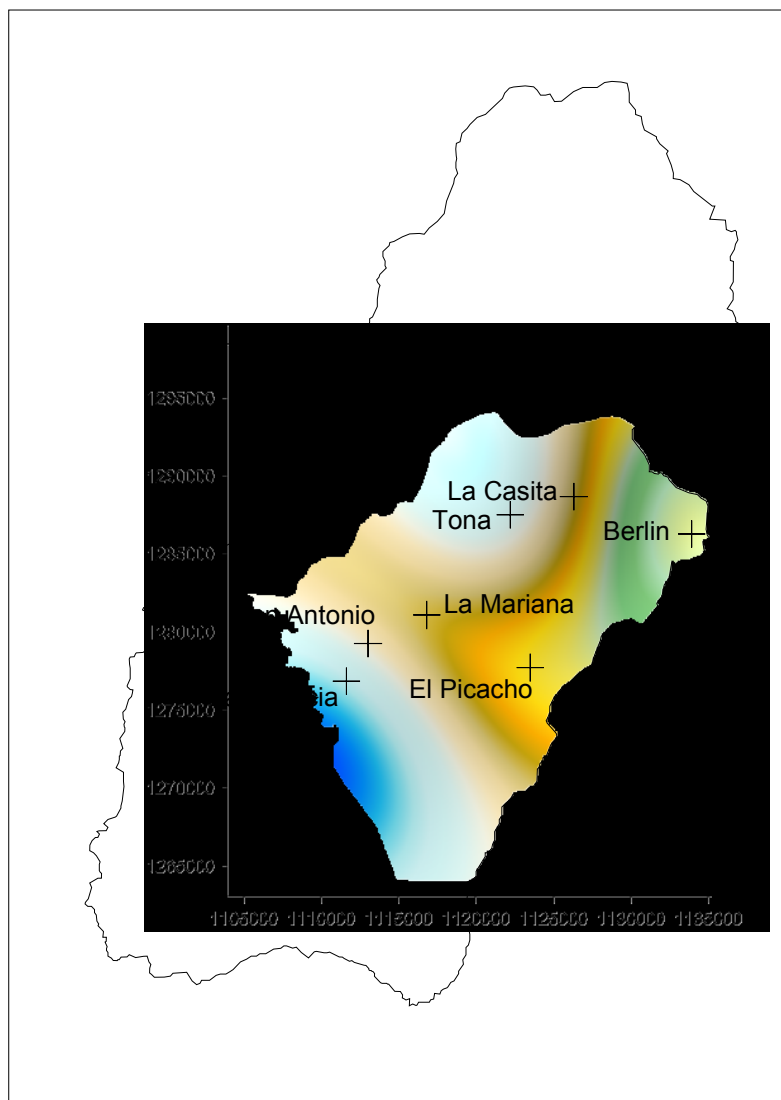
Anexo 10. Mapa de precipitación de Época Húmeda 1 de 2006



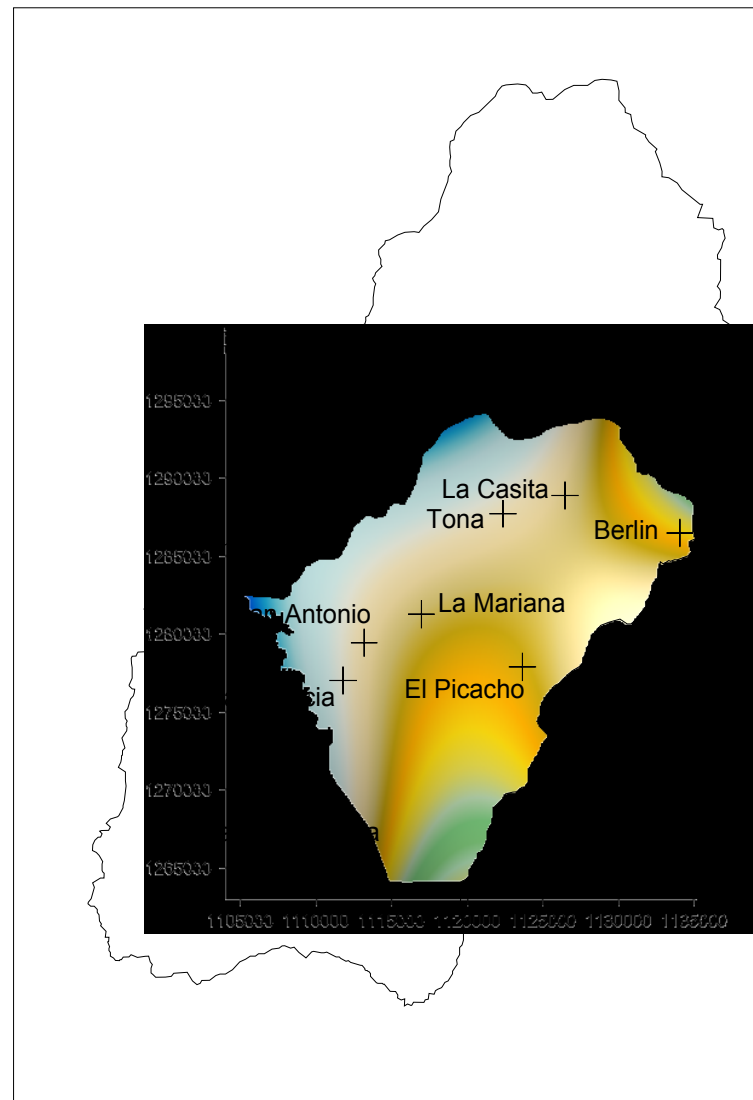
Anexo 11. Mapa de precipitación de Época Húmeda 2 de 2006



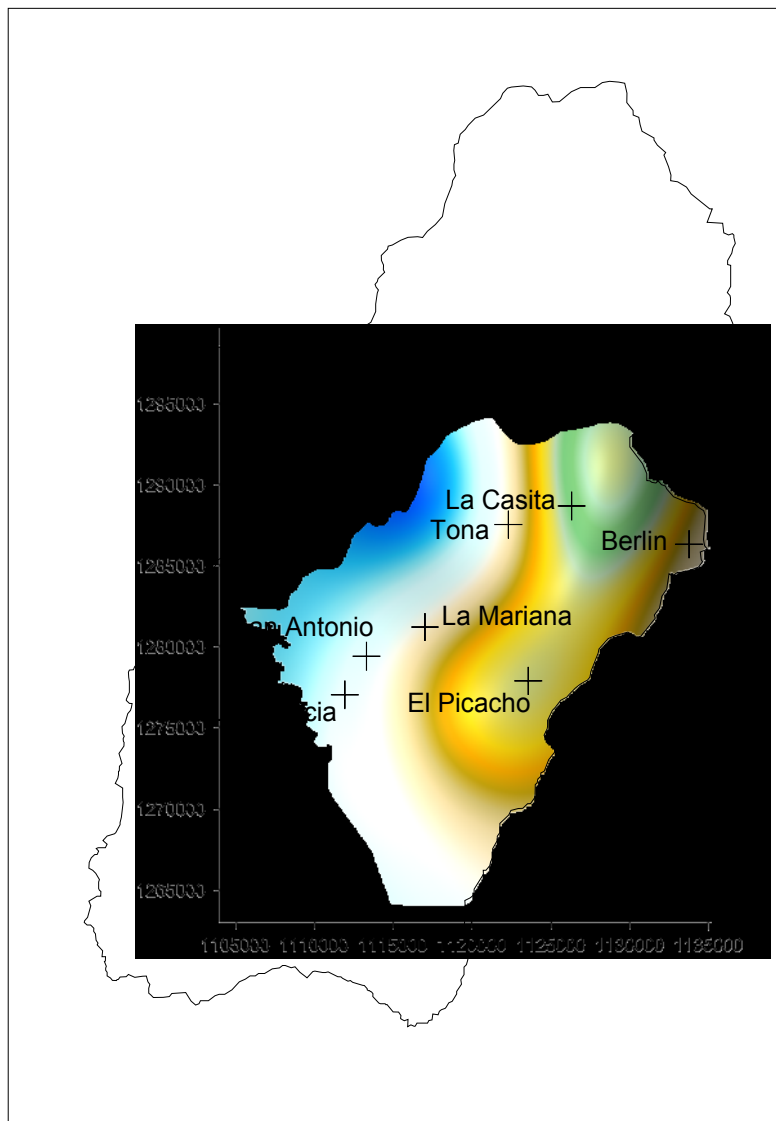
Anexo 12. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 2 de 2004



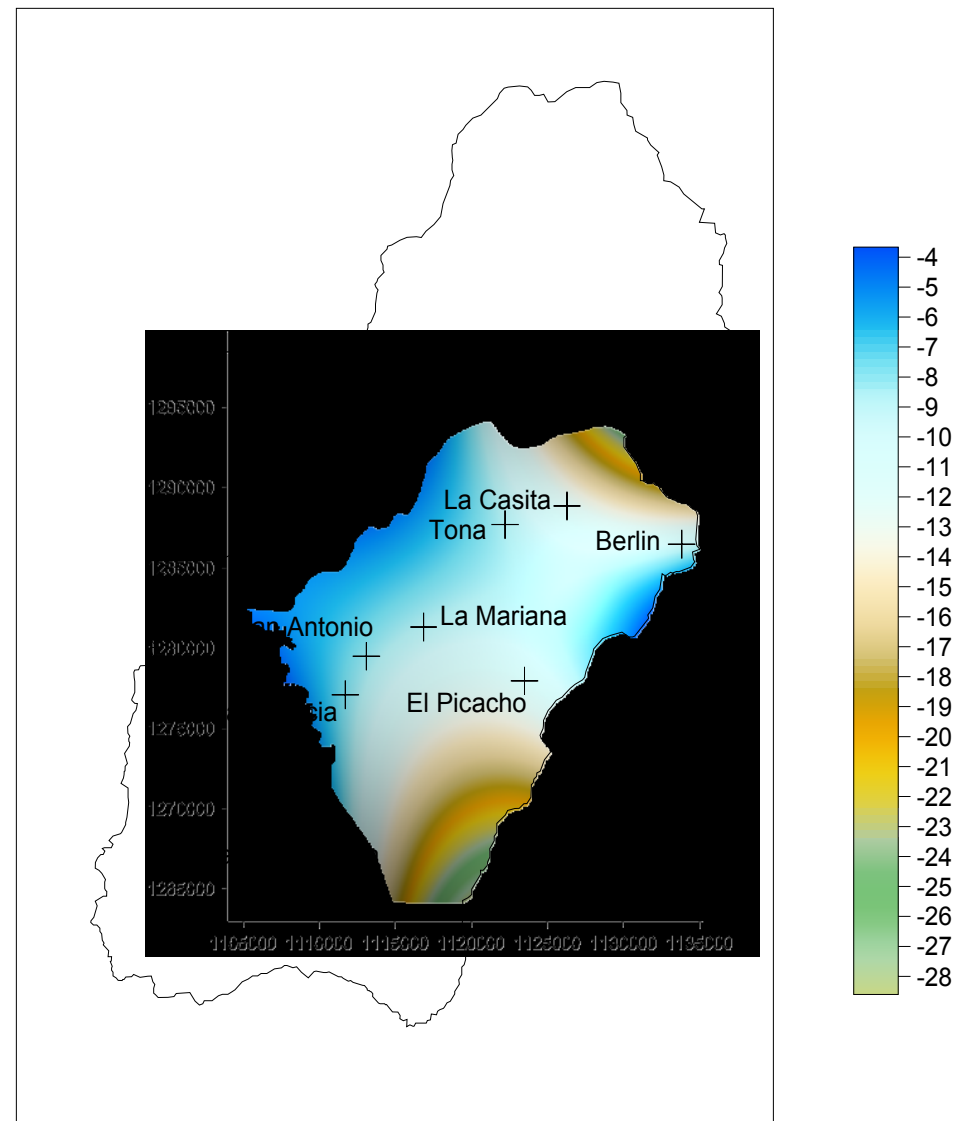
Anexo 13. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 2 de 2004



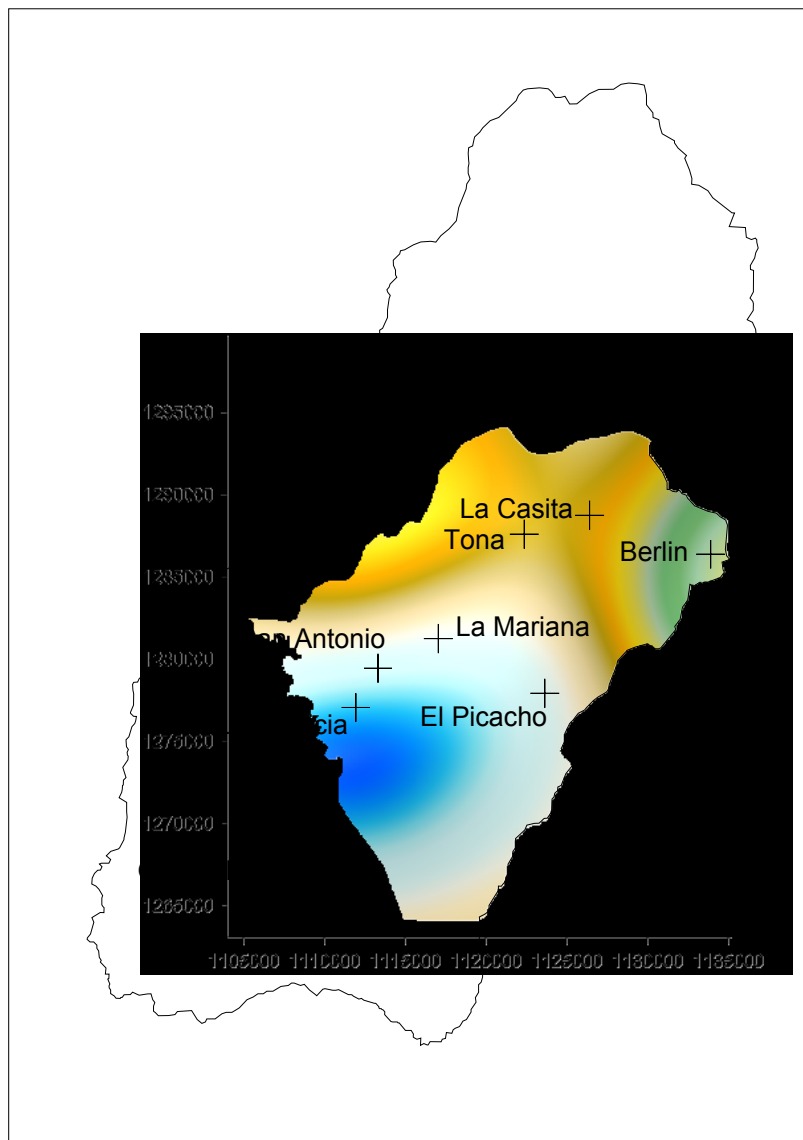
Anexo 14. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 1 de 2005



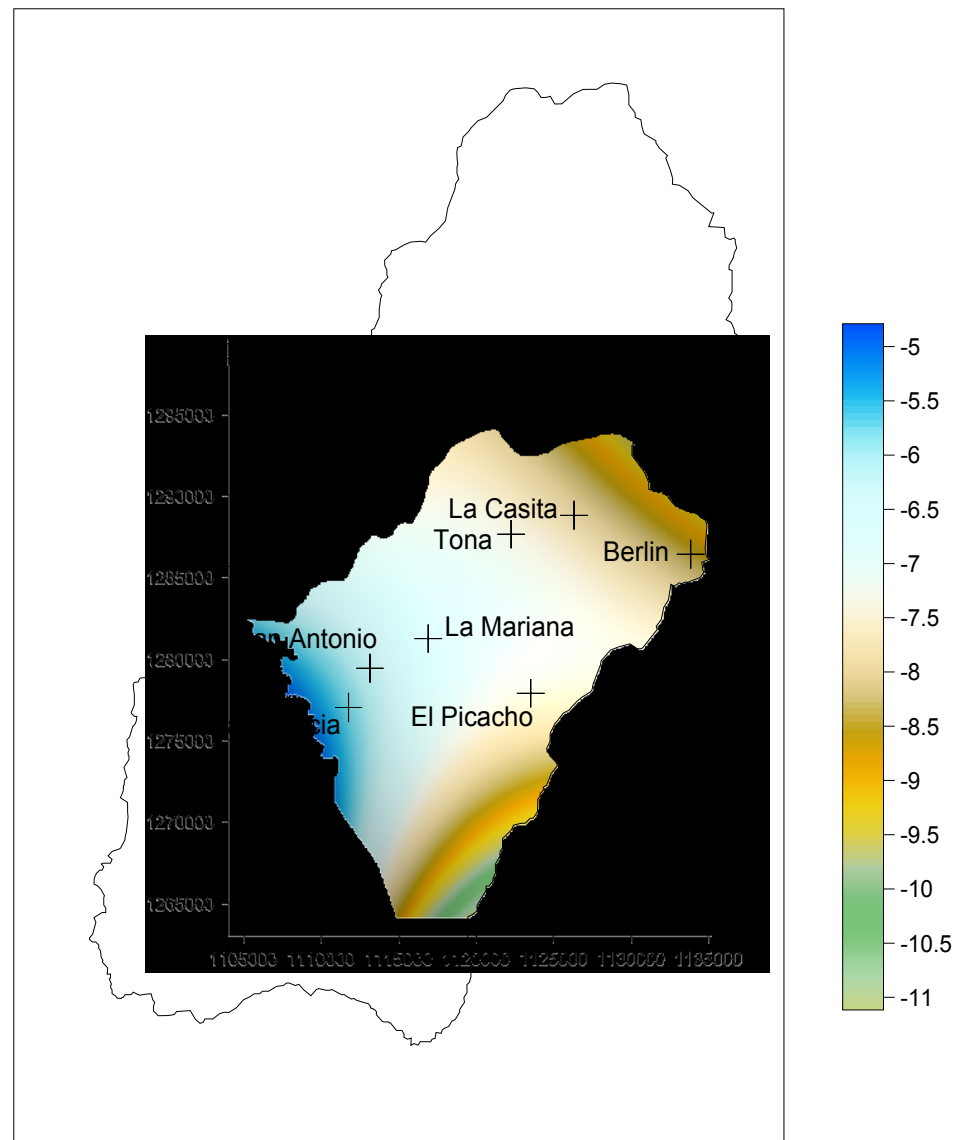
Anexo 15. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 1 de 2005



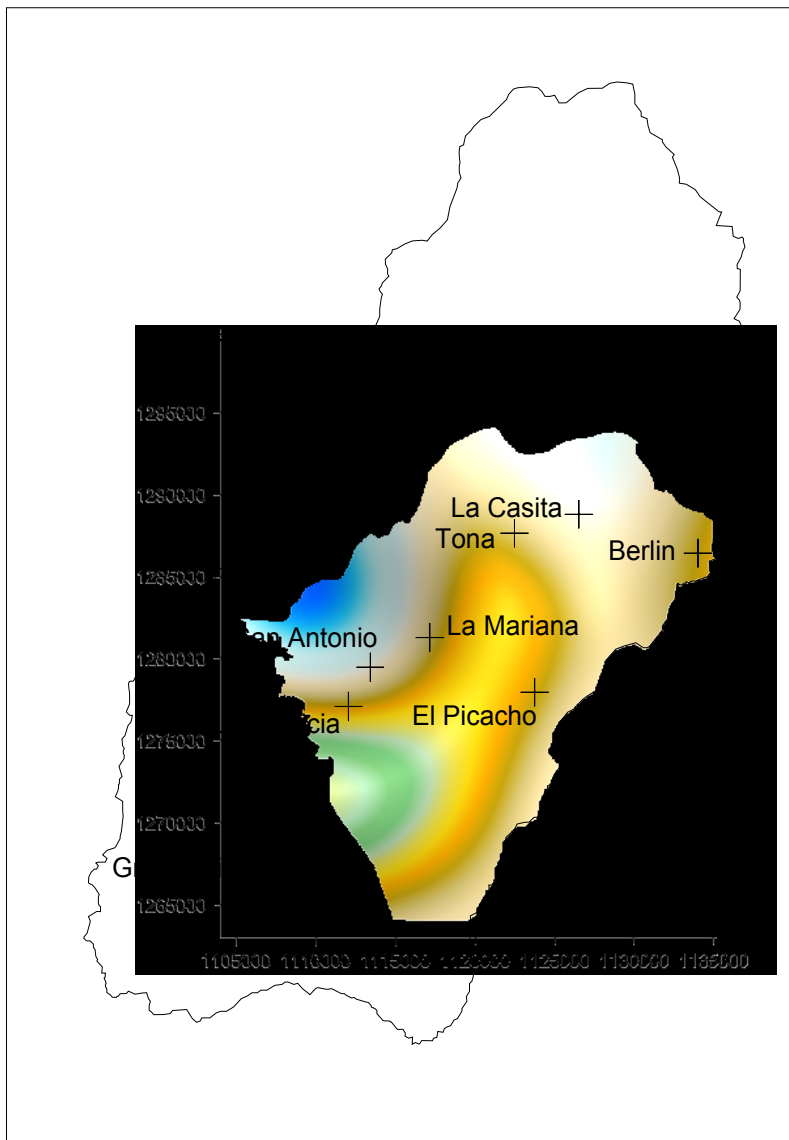
Anexo 16. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 2 de 2005



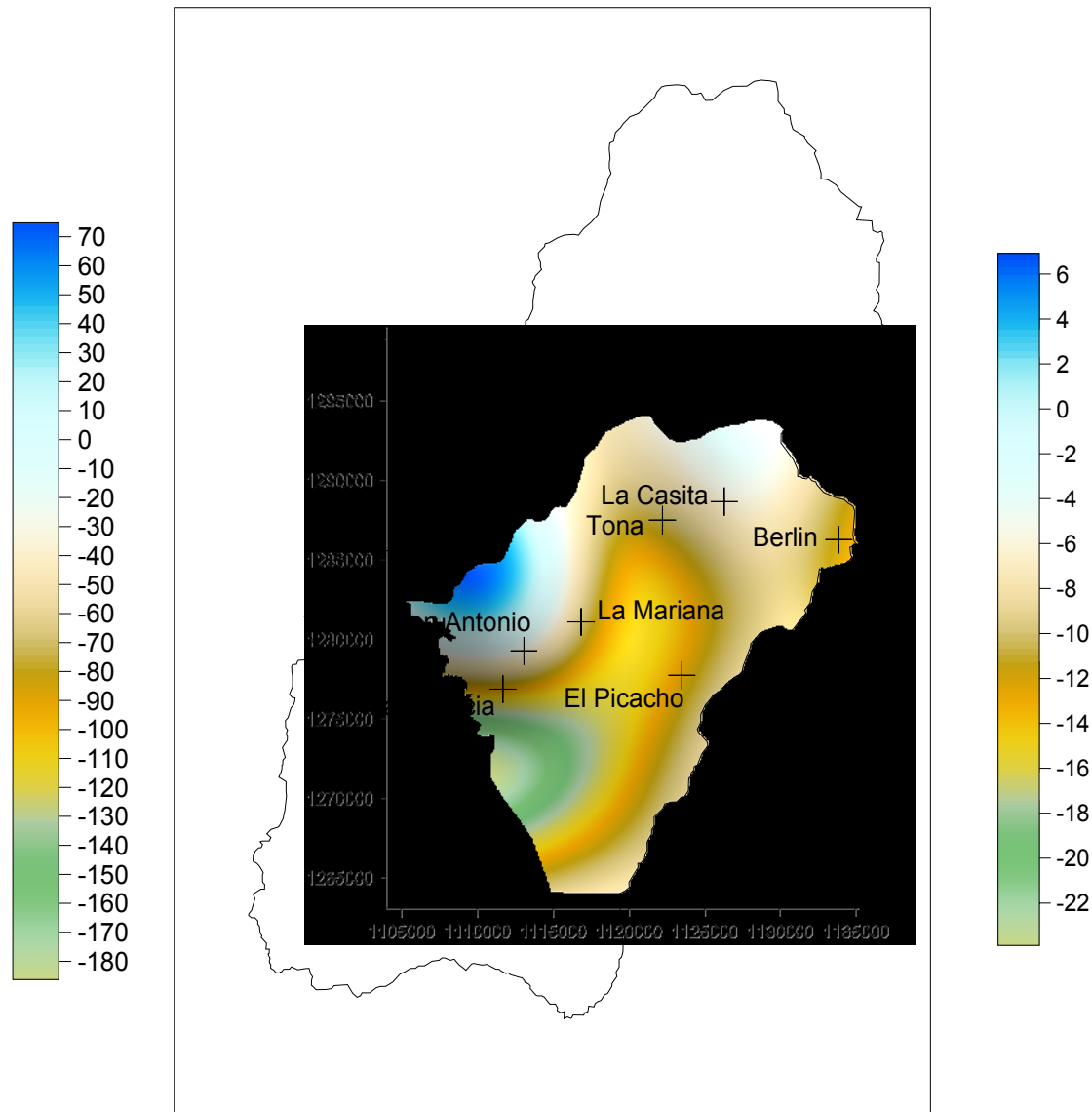
Anexo 17. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 2 de 2005



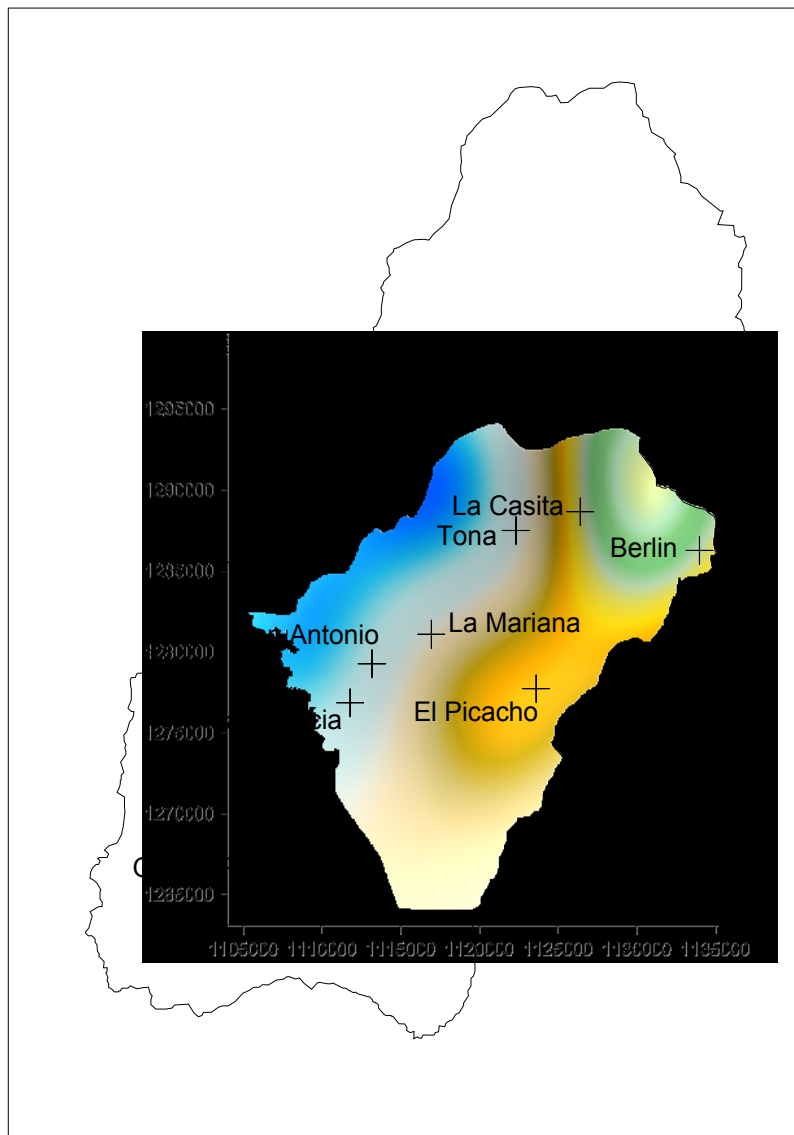
Anexo 18. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 1 de 2006



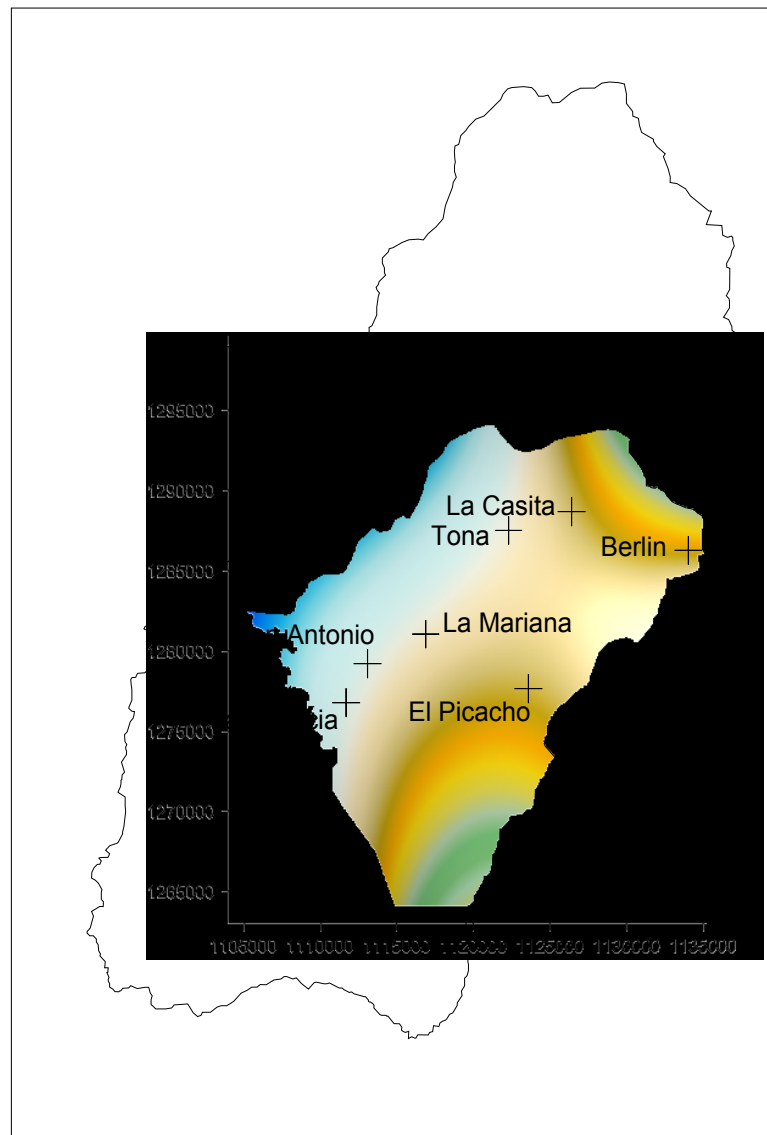
Anexo 19. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 1 de 2006



Anexo 20. Mapa de Deuterio de Época Húmeda 2 de 2006



Anexo 21. Mapa de Oxígeno 18 de Época Húmeda 2 de 2006



Anexo 25. Mapa de Deuterio utilizando variograma potencial

