

**COMPORTAMIENTO ISOTOPICA DE LAS AGUAS LLUVIAS
EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA**

**Rainerio Carrillo Pérez
Fabio Alexander Soto Guerrero**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2009**

**COMPORTAMIENTO ISOTOPICA DE LAS AGUAS LLUVIAS
EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA**

**Rainerio Carrillo Perez
Fabio Alexander Soto Guerrero**

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

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

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2009**

A Dios, por darme fortaleza y sabiduría

A mis padres, por su gran apoyo

A mis hermanos, por su confianza

A mis amigos, por su amistad

FABIO

A Dios por su infinita bondad,
A mis padres por su apoyo incondicional
A mi familia por su acogedora compañía
A mis amigos por su valiosa amistad
RAY

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora, doctora Sully Gómez por su apoyo, cooperación y su confianza.

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

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

A las entidades: IDEAM, AMB, CDMB Y CENICAFE, las cuales nos suministraron los datos de precipitación y las muestras de aguas lluvias en sus estaciones analizadas por la OIEA.

A los encargados de cada una de las estaciones.

TABLA DE CONTENIDO

Pág

<u>INTRODUCCION.....</u>	<u>1</u>
<u>1. CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA.....</u>	<u>2</u>
1.1 ASPECTOS GENERALES.....	2
1.2 LOCALIZACION DE LA CUENCA.....	2
1.3 ÁREA DE ESTUDIO.....	4
1.4 ESTUDIOS REALIZADOS.....	6
1.5 RED PLUVIOMETRICA.....	8
1.6 RED ISOTOPICA.....	10
<u>2. MARCO TEORICO ISOTOPOS ESTABLES.....</u>	<u>12</u>
2.1 DEFINICIÓN.....	12
2.1.1 Simbología.....	13
2.1.2 Los isotopos del hidrogeno y el oxigeno en el ciclo hidrológico.....	14
2.1.3 Medición y estandarización de isótopos estables en el agua.....	15
2.1.4 Línea meteórica o recta de Craig.....	17
2.1.5 Variación isotópica en la precipitación.....	18
<u>3. REVISION Y ANALISIS DE LA INFORMACION.....</u>	<u>21</u>
3.1 ANÁLISIS DE FENOMENOS GLOBALES QUE INFLUYEN EN LA PRECIPITACION DE LA C.S.R.L.....	21
3.1.1 Zona de convergencia intertropical.....	21
3.1.2 El niño / oscilación del sur.....	25
3.2 INFORMACION DE PRECIPITACION.....	28
3.2.1 Revisión de la información.....	28
3.2.2 Complementación de las series.....	29

3.2.3	Precipitación promedio mensual.....	30
3.2.4	Precipitación promedio estacional.....	32
3.3	INFORMACION DE ISOTOPÓS.....	34
3.3.1	Depuración de la información.....	36
3.3.2	Comportamiento estacional.....	36
3.3.3	Recta meteórica 2004 – 2007.....	40
3.3.4	Comparación con otras rectas meteóricas obtenidas en la C.S.R.L.....	41
3.3.5	Desviación isotópica promedio estacional.....	42
3.4	CICLO ANUAL DE PRECIPITACIÓN Y DESVIACIÓN ISOTOPICA.....	44
3.5	DESVIACION ISOTOPICA PROMEDIO vs ELEVACION.....	46
4.	<u>DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN Y DE LOS ISÓTOPOS EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA.....</u>	49
4.1	ESPACIALIZACION DE LA PRECIPITACION.....	49
4.1.1	Mapas de precipitación.....	50
4.2	ESPACIALIZACIÓN DE LOS ISOTOPOS.....	56
4.2.1	Mapas de desviación isotópica.....	56
4.3	COMPONENTES A UTILIZAR EN LA SEPERACION DE FLUJO BASE MEDIANTE TECNICAS ISOTOPICAS.....	62
5.	<u>ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS.....</u>	63
5.1	CICLO ANUAL DEL PERIODO 2004-2007.....	63
5.2	RECTA METEÓRICA LOCAL.....	64
5.3	COMPONENTES PROMEDIO DE PRECIPITACIÓN Y ISOTOPOS.....	66
5.4	DETERMINACION DE ZONAS DE RECARGA.....	67
6.	<u>CONCLUSIONES.....</u>	68
7.	<u>RECOMENDACIONES.....</u>	70

BIBLIOGRAFIA.....71

ANEXOS.....72

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Subcuencas que conforman la C.S.R.L.....	3
Figura 2. Ubicación de la cuenca en el departamento de Santander.....	4
Figura 3. Localización del área de estudio.....	5
Figura 4. Red pluviométrica.....	9
Figura 5. Red isotópica.....	11
Figura 6. Efecto continental.....	18
Figura 7. Efecto de latitud.....	19
Figura 8. Ciclo anual en la C.S.R.L.....	23
Figura 9. Ciclo anual Zona Metropolitana de la C.S.R.L.....	24
Figura 10. Graficas de precipitación promedio de la red pluviométrica.....	32
Figura 11. Graficas de precipitación promedio estacional de la red Pluviométrica.....	33
Figura 12. Relación ^{18}O vs. ^2H	36
Figura 13. ^{18}O vs. ^2H para todas las épocas del año.....	37
Figura 14. Recta meteórica local 2004 – 2007.....	40
Figura 15. Recta meteórica local vs recta meteórica de Craig.....	41
Figura 16. Rectas meteóricas locales para diferentes periodos de tiempo.....	42
Figura 17. Desviación isotópica obtenida en el cálculo 1.....	43
Figura 18. Desviación isotópica obtenida en el cálculo 2.....	44
Figura 19. Ciclo anual de precipitación vs isotopos 2004 – 2007.....	45
Figura 20: Desviación isotópica de ^2H vs. Elevación en cada una de las épocas.....	47
Figura 21: Desviación isotópica de ^{18}O vs. Elevación en cada una de las épocas.....	48
Figura 22. Mapa de precipitación en la época seca 1.....	52
Figura 23. Mapa de precipitación en la época húmeda 1.....	53
Figura 24. Mapa de precipitación en la época seca 2.....	54

Figura 25. Mapa de precipitación en la época húmeda 2.....	55
Figura 26. Mapa de desviación isotópica en la época seca 1.....	58
Figura 27. Mapa de desviación isotópica en la época húmeda 1.....	59
Figura 28. Mapa de desviación isotópica en la época seca 2.....	60
Figura 29. Mapa de desviación isotópica en la época húmeda 2.....	61
Figura 30. Estaciones con comportamiento no bimodal en la parte alta de la cuenca.....	64
Figura 31. Recta meteórica local preliminar.....	65
Figura 32. Promedio espacial y temporal de la precipitación y de la desviación isotópica.....	66

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Red pluviométrica.....	10
Tabla 2. Red isotópica de muestreo.....	12
Tabla 3. Numero de datos pluviométricos de tipo mensual.....	26
Tabla 4. Estadísticas de regresión multilineal.....	29
Tabla 5. Numero de datos isotópicos de tipo mensual.....	34
Tabla 6. Rango de desviación isotópica en cada época.....	39
Tabla 7. Precipitación y desviación isotópica promedio en cada época.....	62
Tabla 8. Precipitación y desviación isotópica promedio en el área de estudio.....	63
Tabla 9. Componentes promedio de la precipitación.....	66
Tabla 10. Información isotópica utilizada.....	71

LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO 1.....	72
ANEXO 2.....	74

RESUMEN

TITULO:

COMPORTAMIENTO ISOTÓPICO DE LAS AGUAS LLUVIAS SOBRE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA *

AUTORES:

Rainerio Carrillo Pérez

Fabio Alexander Soto Guerrero**

PALABRAS CLAVES:

Cuenca Superior del Rio Lebrija (C.S.R.L); Estaciones; Isótopos; Recta meteórica; Efecto Estacional; Bimodalidad; Componente de Precipitación

CONTENIDO

La investigación consignada en el presente documento se realizó en una zona de la parte alta de la Cuenca Superior del Rio Lebrija (C.S.R.L.) y tuvo como principal objetivo estudiar el comportamiento isotópico de la lluvia que se presenta en esta zona. Basados en información de precipitación se analizó el comportamiento mostrado por las aguas lluvias durante el periodo comprendido por los años 2004 – 2007; determinando, mediante mapas de precipitación, la manera en que dichas lluvias se distribuyen sobre la zona de estudio.

Se determinó la relación existente entre la precipitación ocurrida en el periodo de estudio, y el contenido isotópico existente en la misma; obteniéndose valiosas conclusiones acerca de este importante fenómeno. A partir de los datos isotópicos proporcionados por la red de muestreadores, establecida en estudios anteriores, se construyó la recta meteórica local para el periodo de estudio.

Al igual que en la precipitación, el contenido isotópico presente en la lluvia se distribuyó espacialmente sobre el área de estudio, generando una serie de mapas en los cuales se pone en evidencia las zonas en las cuales se presenta el mayor o menor contenido de isotopos pesados y/o livianos en el área estudiada.

Por último se determinaron las componentes promedio precipitación y de desviación isotópica, que servirán como valores representativos para el área considerada como de estudio en nuestra investigación.

* Proyecto de Grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Director. Ing., Msc, Ph.D. Sully Gómez Isidro.

ABSTRACT

TITLE:

SOTOPE BEHAVIOR OF RAIN WATER ON THE UPPER BASIN OF RIO LEBRIJA *

AUTHORS:

Rainerio Carrillo Pérez
Fabio Alexander Soto Guerrero**

KEY WORDS:

Upper Rio Lebrija (C.S.R.L); Stations; Isotopes; meteoric line; seasonal effects; bimodality; Component of Precipitation

CONTENT

The research contained in this document was conducted in an area of the upper part of the upper Rio Lebrija (C.S.R.L) and had as main objective to study the isotopic behavior of the rain that comes in the area. Based on information it was analyzed the precipitation behavior shown by the rainfall during the period covered by the years 2004 - 2007; determining, by maps of precipitation, the manner in which these rainfalls are distributed over the area of study.

We determined the relationship between the precipitation occurred during the study period, and the isotopic content in it, obtaining valuable conclusions about this important phenomenon. From the isotopic data provided by the network of samplers, established in previous studies, was built the local meteoric line for the study period.

As with precipitation, the isotopic content in rain is spatially distributed over the study area, generating a series of maps which shows the areas which are more or less the content of heavy or light isotopes in the study area.

Finally it was identified the components of deviation isotope and average precipitation that will serve as representative values for the area considered in our research study.

* Draft Grade

** Faculty of Physical and mechanical engineering. School of Civil Engineering. Manager. Ing, Msc, Ph.D. Sully Gomez Isidro.

INTRODUCCIÓN

Uno de los recursos naturales que han ocupado un papel preponderante, en cuanto su estudio, su cuidado y su preservación durante siglos en el planeta, ha sido el agua, quien con su vital importancia se ha convertido en objeto de numerosas investigaciones por parte de los seres humanos y que han conllevado a entender de alguna forma el comportamiento de este fundamental recurso una vez distribuido sobre toda la tierra.

La precipitación es la fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las escorrentías, superficiales y de tipo subterráneo, motivo por el cual su evaluación conocimiento, y forma de distribución, tanto en el tiempo como en el espacio se hacen necesarios.

La investigación desarrollada en el presente proyecto se centra básicamente en el estudio del comportamiento de los isótopos presentes en las aguas lluvias que ocurren en la Cuenca Superior del Río Lebrija, en especial la parte alta, analizando aspectos como la manera en que estos isótopos se distribuyen espacial y temporalmente en la cuenca, a partir de los datos recolectados en la red de muestreadores, la relación existente entre los isótopos y las precipitaciones ocurridas en el periodo señalado entre 2004 y 2007; adicionalmente se construye la línea meteórica local con los datos existentes en el periodo antes mencionado y se compara analíticamente con las rectas sugeridas por otros autores en estudios anteriores.

Por último se definen los valores que representa la componente de la desviación isotópica en la cuenca, para que sean utilizados en la aplicación del método de separación de flujo base, que se basan en técnicas isotópicas en estudios posteriores.

1. CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA

1.1 ASPECTOS GENERALES

La cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.) representa en la actualidad una de las principales fuentes de abastecimiento para la ciudad de Bucaramanga y toda su área metropolitana. La C.S.R.L. cuenta con una superficie de aproximadamente unos 1280 Km², lo cual la encasilla en una cuenca hidrológica de tamaño medio que a su vez está constituida por cuatro subcuencas que son: Río de oro, Río Tona, Río Frio y Río Suratá como se muestran en la figura 1.

Adicionalmente esta cuenca vincula en su superficie alrededor de diez municipios del departamento de Santander en los que se cuentan Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Suratá, Tona, California, Vetas, Matanza y Charta.

1.2 LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA

La Cuenca Superior del Río Lebrija se encuentra ubicada en la parte norte de la cordillera oriental, aproximadamente entre los 6° 54' y 7° 27' de latitud Norte y 73° 15' y 72° 15' de longitud al Oeste del meridiano de Greenwich.

La cuenca pertenece a la provincia de Soto y está delimitada aguas abajo por la unión de los ríos Oro y Suratá, al sur, a unos 1600 m. de altitud, la mesa de los santos por encima de la depresión de Piedecuesta; hacia el Este, la Mesa de los santos entra en contacto con la falla del macizo ígneo-metamórfico de Santander

que culmina en el páramo de Santurbán a poco mas de 4000 m: hacia el Oeste, a unos 1100 m.s.n.m. las mesetas de arenisca de Llano de Palmas y de Lebrija, que dominan al norte el gran valle del Magdalena y más al sur, el cañón del rio Suarez. La figura 1 muestra la ubicación de la Cuenca Superior del Rio Lebrija.

Figura 1. Subcuencas que conforman la C.S.R.L.

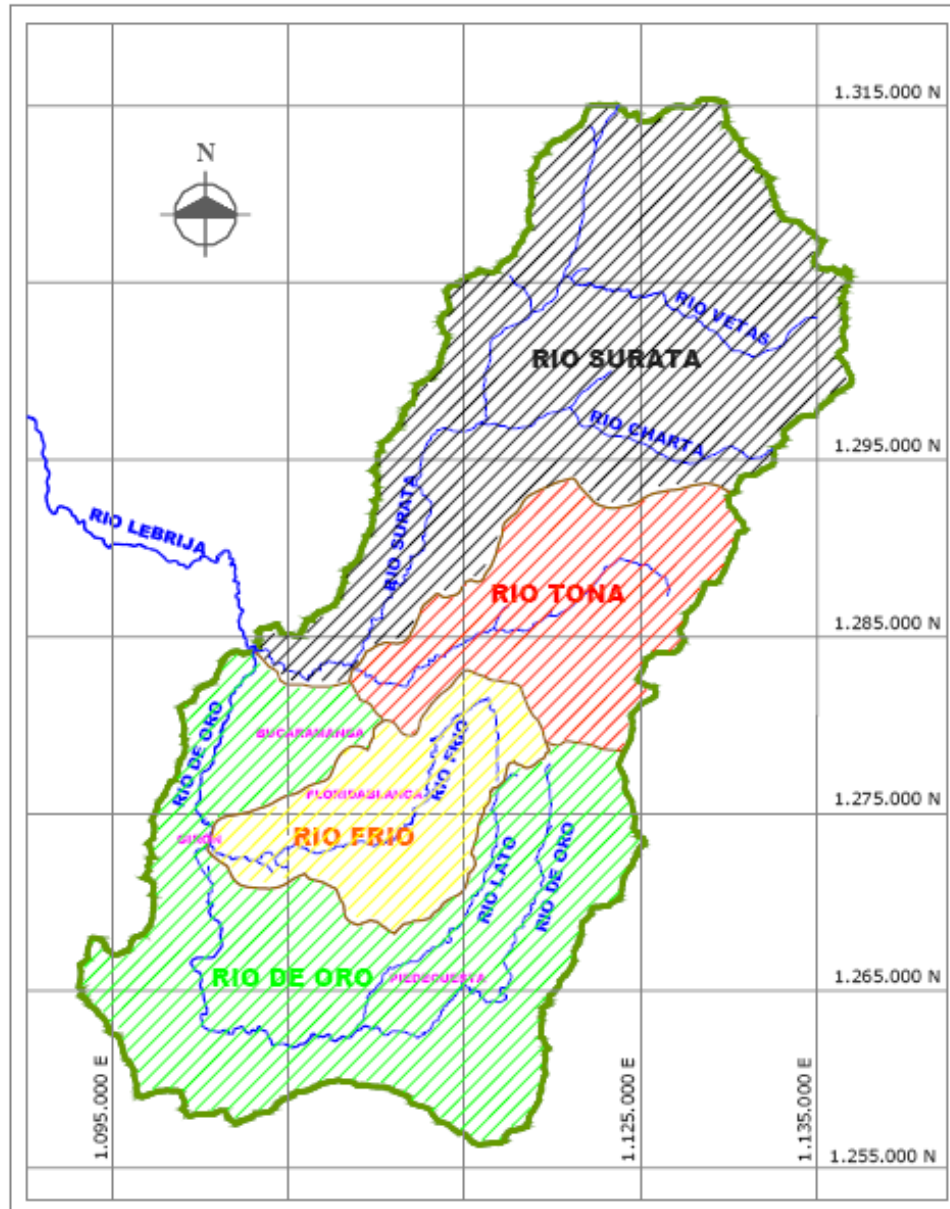
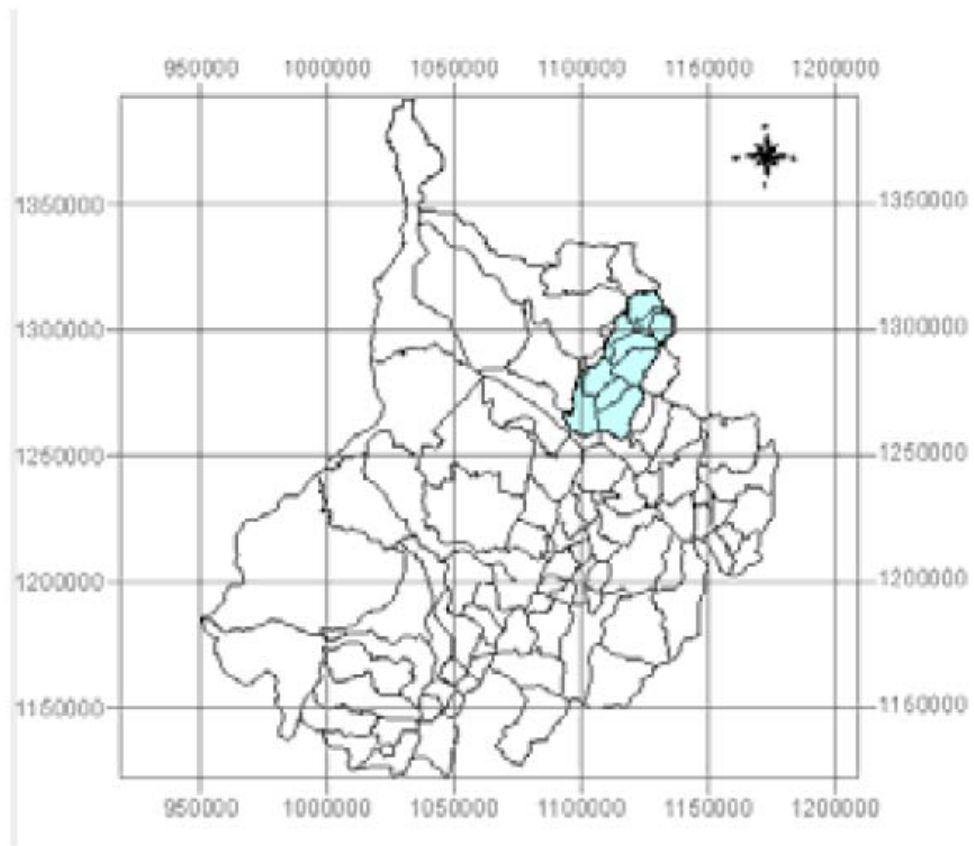


Figura 2. Ubicación de la cuenca en el departamento

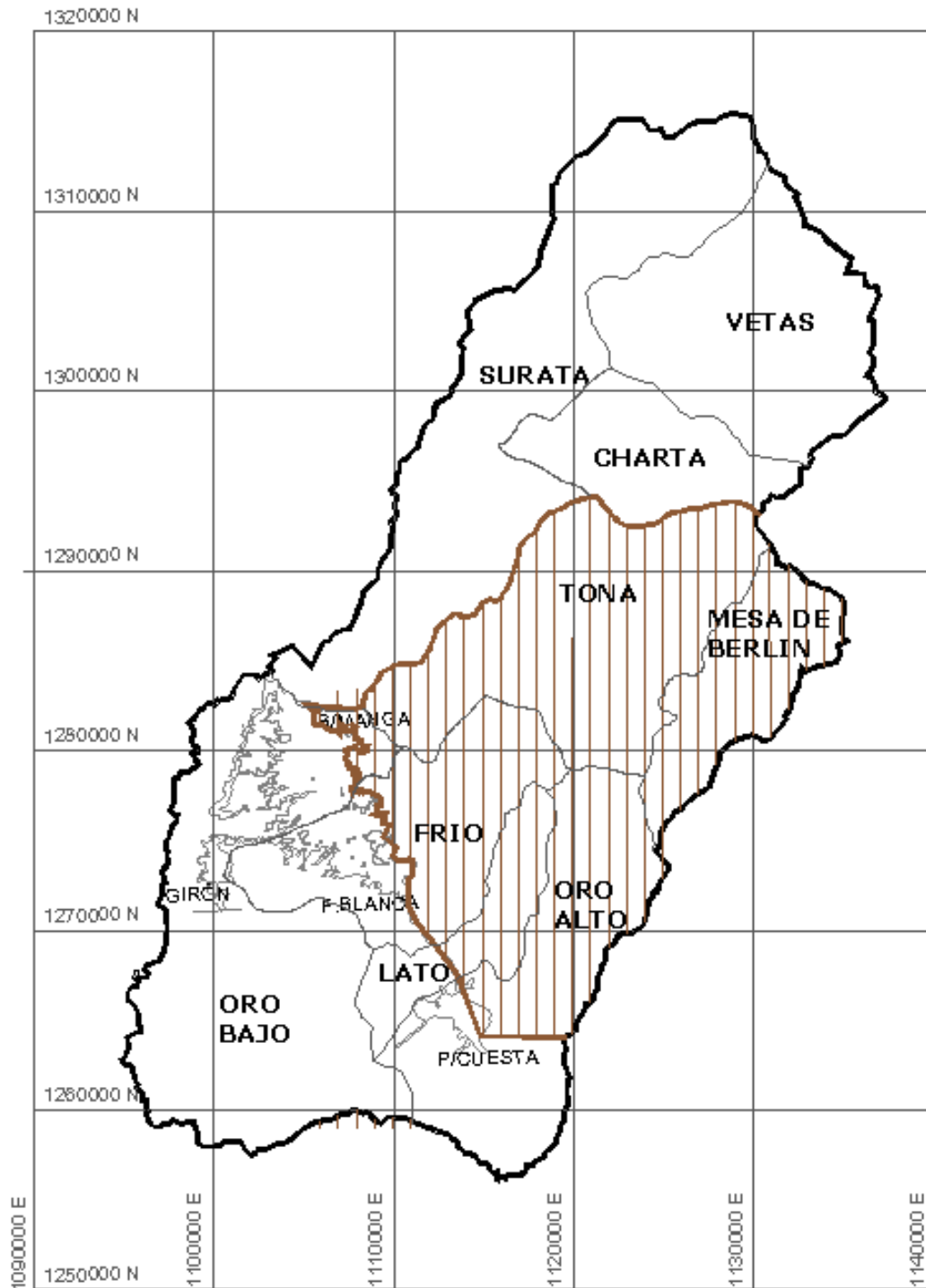


1.3 ÁREA DE ESTUDIO

Debido a la ubicación de las estaciones que ofrecen información isotópica dentro de la C.S.R.L. se decidió definir el área de estudio escogiendo la parte alta de la cuenca como está. El área de estudio está limitada hacia el Norte por la divisoria entre la subcuenca del río Tona y la de la subcuenca del río Suratá, hacia el Sur su limitante es la falla Bucaramanga – Santamarta; y hacia sus costados es limitada por la divisoria de C.S.R.L.

En la figura 3 se ilustra el área de estudio, y su ubicación con relación a la Cuenca Superior del Rio Lebrija.

Figura 3. Localización área de estudio



1.4 ESTUDIOS REALIZADOS

La creciente demanda de recursos hídricos ha despertado el interés en buscar otras alternativas que de alguna manera satisfagan esta necesidad, de manera tal que se han incrementado los estudios que permitan ampliar los conocimientos acerca de los factores que inciden en las variables hidrológicas y de esta forma poder controlarlas.

Pensando en lo anteriormente citado, estudios realizados en la parte de precipitación como el realizado por Barrera et. Al, (1998). Con su “Estudio de la precipitación para el departamento de Santander” quien analizó el comportamiento de la precipitación que se presentaba en el departamento de Santander, refleja el interés existente en este tipo de investigaciones.

Otros estudios un poco más recientes lograron arrojar resultados más acertados debido a la cantidad de información recopilada; como el realizado por Rojas et Al, (2002), mediante la construcción de mapas de distribución en los que se puede observar las variaciones de pluviosidad a medida que aumenta la altura del terreno, pero que el aumento de la precipitación no era lineal con respecto a la altura y que por el contrario llegaba hasta una altura determinada en la cual la precipitación, a partir de ese punto empezaba a decrecer. Fue en este mismo estudio en el cual se determinó el óptimo pluviométrico, definiéndose este como la altura donde se presenta la mayor precipitación en la cuenca, determinándose de esta forma que factores como el carácter convectivo de las lluvias tropicales generan variabilidad en el óptimo pluviométrico y que la disminución de humedad del aire con la altura a escala global, y la cantidad de agua precipitable en las nubes convectivas a escala local son los factores que explican la disminución de la precipitación con la altura.

El estudio realizado por Arenas (2005). "Estudio de la variación del régimen de lluvias en la Cuenca Superior del Rio Lebrija (C.S.R.L)" nos muestra la variabilidad del clima en la C.S.R.L. mediante el análisis de series de tiempo de precipitación en resolución diaria, que permitieron establecer una gran diferencia en el ciclo anual de las lluvias entre la parte alta de la cuenca y la zona metropolitana, atribuido en gran parte a la influencia que genera el fenómeno de ENSO en los volúmenes de precipitación que se aumentan durante los meses de abril, y presentan un ostensible disminución durante el periodo seco de mitad de año.

En la parte isotópica se han adelantado investigaciones de gran importancia como la realizada en el estudio de "La Implementación de una red de muestreadores de isotopos estables en la precipitación para obtener la recta meteórica local" realizado por Guzmán. & Camacho. (2005) quienes localizaron e implementaron una red de muestreadores de isotopos estables (Deuterio y Oxigeno 18) en la precipitación, cubriendo las zonas de variación orográfica más importantes de la cuenca, y siguiendo la variación isotópica de la precipitación. Además se propuso una recta meteórica local preliminar y tentativamente se propuso zonas de posible recarga para las aguas subterráneas en la meseta de Bucaramanga. Por último se propuso un protocolo para la toma, preservación y envío al laboratorio de muestras de precipitación para el análisis de isotopos estables (Deuterio y Oxigeno 18).

De los estudios más recientes sobre el tema de los isótopos se cuenta con el efectuado por Barliza & Cristancho., (2007). El cual se denominó "Muestreo de isotopos estables en la escorrentía total de eventos y otros muestreos complementarios" en este se implementó un muestreo de isotopos estables en un numero previamente escogido de estaciones preseleccionadas en diferentes ríos, los cuales se encontraban dentro de la cuenca superior del rio Lebrija; dicho estudio se realizó con el ánimo de estimar el valor del flujo base implementando

técnicas isotópicas y convencionales de separación, como la utilizada en "Implementación de una metodología para el muestreo de isotopos estables y aplicación a la separación de flujo base" realizado por Velazco & Maldonado, (2005).

1.5 RED PLUVIOMETRICA

La red hidroclimática presente en la C.S.R.L. está constituida por una serie de estaciones en las que se observan, miden y/o registran los diferentes fenómenos y componentes atmosféricos que son de gran utilidad para la estimación del estado del tiempo o el clima de la región, y de esta forma utilizarlo según la necesidad que se tenga de los mismos. El tipo de estaciones que constituyen la cuenca se encuentran estaciones climatológicas ordinarias, climatológicas principales, pluviográficas y pluviométricas.

Las estaciones pluviométricas utilizadas en este estudio se encuentran ubicadas dentro del área de estudio definida en el ítem 1.3 y que corresponde a una zona que se encuentra incluida dentro de la parte alta de la C.S.R.L. que se ilustra en la figura 4. Los registros corresponden a datos mensuales provenientes de estaciones de diferentes entidades, las cuales son las encargadas de su instalación, mantenimiento y toma de datos; dentro de estas empresas se encuentra EL IDEAM a quien pertenecen seis estaciones, AMB quien aporta cinco estaciones, LA CDMB que tiene a su cargo dos estaciones y CENICAFE a la cual le pertenece una estación, completando así las catorce estaciones utilizadas en este estudio y que se encuentran consignadas en la tabla 1, cuyo orden se presenta de la siguiente manera: nombre de la estación, municipio al cual pertenece la estación, coordenadas rectangulares de la estación y su elevación en metros con respecto al nivel del mar.

Figura 4. Red Pluviométrica.

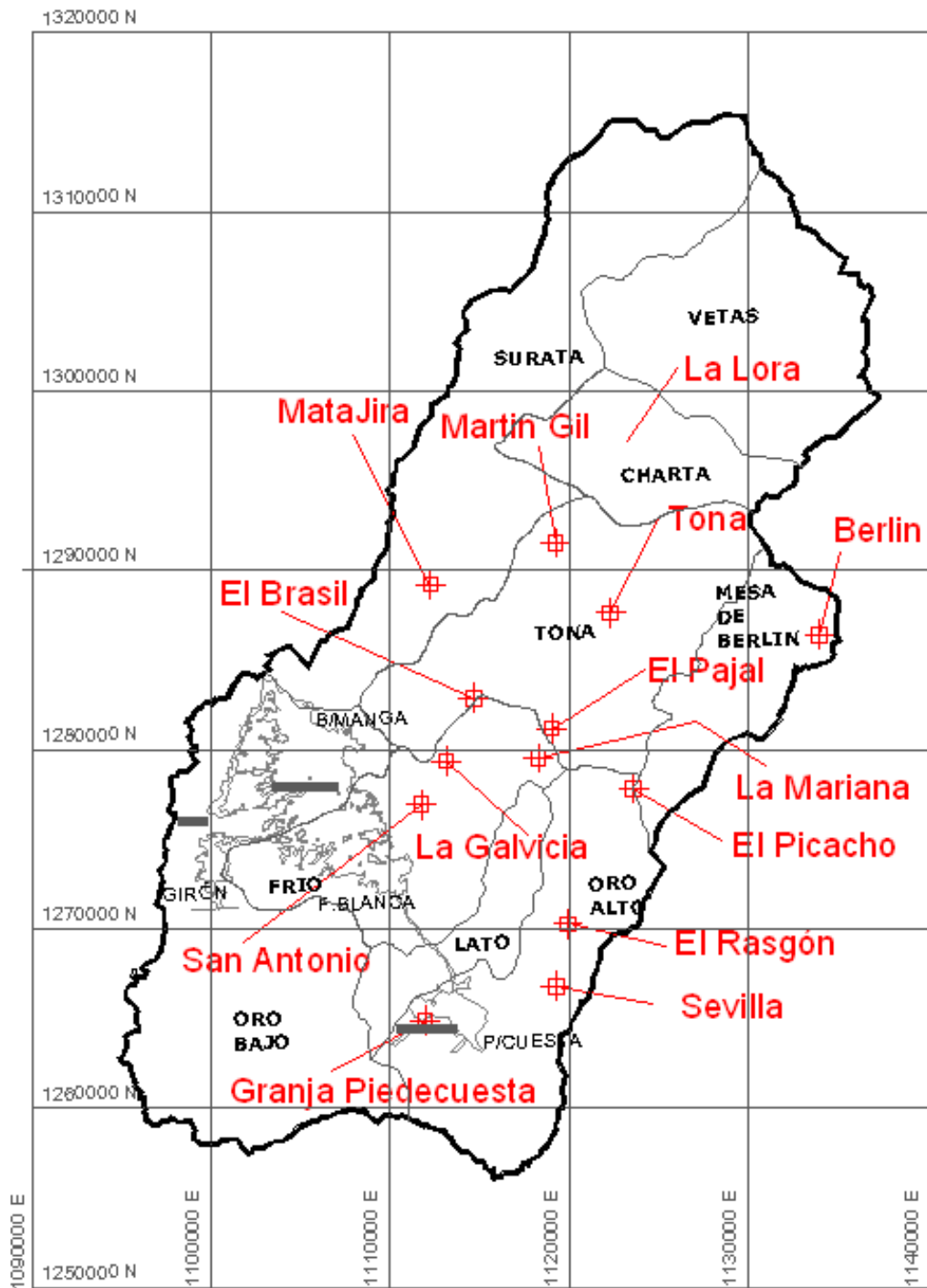


Tabla1. Red Pluviométrica.

Estaciones	Municipio	Coordenadas		Altura m.s.n.m
		Este (m)	Norte (m)	
Berlín	TONA	1133945.000	1286396.000	3214
El Brasil	TONA	1114643.132	1282860.240	1090
El Picacho	TONA	1123563.000	1277828.000	3310
El Pajal	FLORIDABLANCA	1119017.793	1281171.146	2096
El Rasgón	PIEDECUESTA	1119914.000	1270294	1950
Granja Piedecuesta	PIEDECUESTA	1111958.000	1264897.000	1000
La Galvicia	FLORIDABLANCA	1113124.000	1279371.000	1779
La Lora	SURATA	1123203.000	1297166.000	2200
La Mariana	FLORIDABLANCA	1118280.000	1279536.000	2390
Martin Gil	TONA	1119220.407	1291531.368	2110
MataJira	MATANZA	1112243.000	1289201.000	996
San Antonio	FLORIDABLANCA	1111733.000	1276956	1480
Sevilla	PIEDECUESTA	1119263.000	1266801	1907
Tona	TONA	1122281.000	1287627	1910

1.6 RED ISOTOPICA

La red de muestreo de aguas lluvias está conformada por un conjunto de estaciones que se encuentran ubicadas dentro de la zona de estudio y que pertenecen de igual forma a la C.S.R.L., la ubicación de esta red de estaciones fue propuesta en Guzmán. (2005). cumpliendo con los requerimientos necesarios que demandaba su escogencia, así el presente estudio se basa en los datos recogidos en estas estaciones que brindan la información necesaria para los diferentes análisis realizados en este trabajo.

En la figura 5 se puede observar la ubicación de las diferentes estaciones que pertenecen a la red de muestreo y que se encuentran ubicadas dentro de la C.S.R.L., además se cuenta con la tabla 2 en donde se encuentran consignados

los diferentes datos acerca de la información general de dichas estaciones, Nombre, subcuenca al cual pertenece, municipio al cual esta adscrito, coordenadas, elevación en metros y con referencia al nivel del mar.

Figura 5. Red isotópica de muestreo

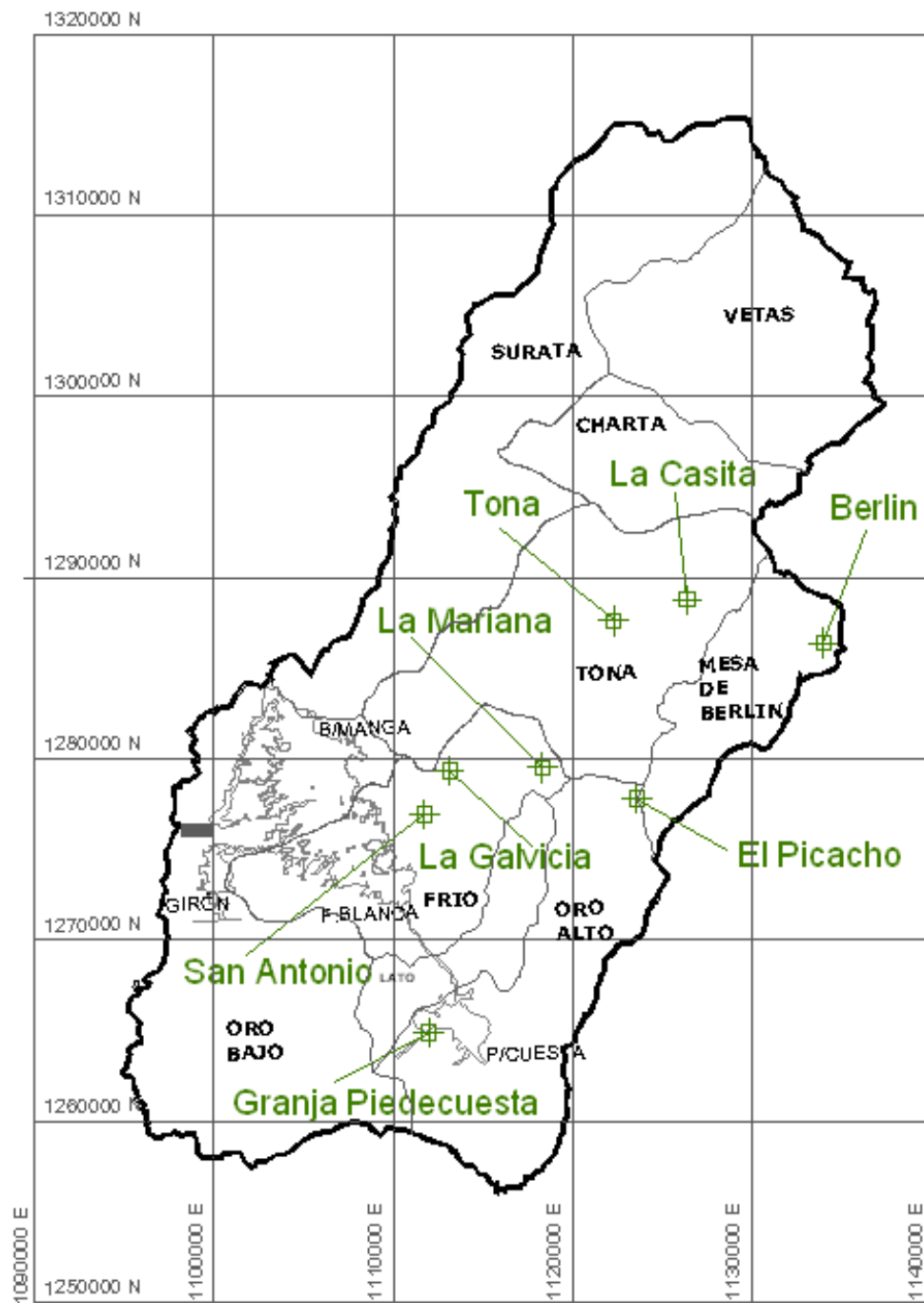


Tabla 2. Red isotópica de muestreo

Entidad	Tipo	Estaciones	Municipio	Sub cuenca	Coordenadas GPS	Altura m.s.n.m.
Particular	No Est.	La Casita	Tona	Tona	071230N- 72561W	2660
IDEAM	CP	Berlín-Col	Tona	Jordan	071122N- 725218W	3214
IDEAM	PG	Piedecuesta	Piedecuesta	Lato	0700N- 7305W	1000
CENICAFE	CO	San Antonio	Floridablanca	Frio	070608N- 730410W	1480
IDEAM	PM	La Galvicia	Floridablanca	Tona	070732N- 730336W	1779
AMB	PM	La Mariana	Floridablanca	Frio	070732N- 730037W	2390
IDEAM	PM	El Picacho	Tona	Tona	070646N- 725811W	3310
IDEAM	PM	Tona	Tona	Tona	071155N- 725826W	1910

2. MARCO TEORICO ISOTOPOS ESTABLES

En el presente capítulo se consignan las definiciones y conceptos necesarios para tener un primer acercamiento con los isótopos estables presentes en las aguas lluvias, los aspectos generales de estos isótopos, su medición, representación, variación, intervención en el ciclo hidrológico, y algunas de las aplicaciones más importantes, de estos isótopos, las cuales se tuvieron muy en cuenta para el desarrollo de esta investigación.

2.1 DEFINICIÓN

Los isótopos son cada uno de los núcleos atómicos de un mismo elemento químico, y por tanto cuentan con el mismo número atómico (Z), pero difieren en su

número másico (A).en otras palabras son átomos que tienen el mismo número de protones y de electrones, pero un diferente número de neutrones. La palabra isotopos proviene del griego "isos", mismo y "topos", lugar, debido a que ocupan el mismo lugar en la tabla periodica de los elementos, lo cual significa que los isotopos de un mismo elemento tienen la misma configuración electrónica.

La hidrología isotópica es una técnica nuclear que utiliza tanto isótopos estables como radiactivos para seguir los movimientos del agua en el ciclo hidrológico. De esta forma poder determinar posibles fuentes de agua subterráneas, su origen, la forma en que se presentan las recargas y de esta forma minimizar posibles contaminaciones.

Los isotopos mas representativos en hidrología son los isotopos estables del oxigeno principalmente el oxigeno dieciocho y del hidrogeno el deuterio.

Cuando se utilizan tantos isotopos estables como radiactivos 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 (agua líquida a vapor).

2.1.1 Los isotopos del hidrogeno y el oxigeno en el ciclo hidrológico

En hidrología se implementa una técnica nuclear que utiliza tanto isótopos estables como radiactivos con el fin de seguir los movimientos del agua en el ciclo hidrológico, y de esta forma investigar acerca del origen de las aguas subterráneas, la manera en que estas se transportan y se distribuyen.

Tanto el oxigeno como el hidrogeno, que son los elementos constitutivos del agua, contienen principalmente isotopos ligeros. Cuando el agua de los océanos se

evapora, los isotopos más pesados se condensan primero y caen en forma de lluvia antes que los más ligeros. Es en los océanos en donde se presenta la mayor cantidad de vapor de agua en la atmosfera, de manera que, mientras más alejada de la costa sea la precipitación, menor será la cantidad de isótopos pesados que contenga.

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

Algunos isótopos del agua como ^{18}O (oxígeno dieciocho) y el ^2H (deuterio) 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 arboles, en glaciares y casquetes polares, en depósitos, en cuevas y en aguas subterráneas (**Cristancho & Barliza, 2007**)

2.1.2 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. Dos organizaciones colaboraron en la clasificación, calibración y distribución de referencias: the International Atomic Energy Agency (IAEA) y the National Institute of Standards and Tegnology (NIST).

Fue en 1961 cuando Harmon introdujo el termino "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 Standar 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:

$$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{VSMOW}} = (2005.2 \pm 0.45) \times 10^{-6} \quad (\text{Baertschi, 1976})$$

$$\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}\right)_{\text{VSMOW}} = (155.76 \pm 0.05) \times 10^{-6} \quad (\text{Hageman et al., 1970})$$

Cuando VSMOW reemplazó SMOW de Craig, vino a ser expresada simplemente 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 ± 0.1 ‰ y 1 ‰ respectivamente, C_{SMOW} es la concentración de isótopos (SMOW).

2.1.3 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:

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

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

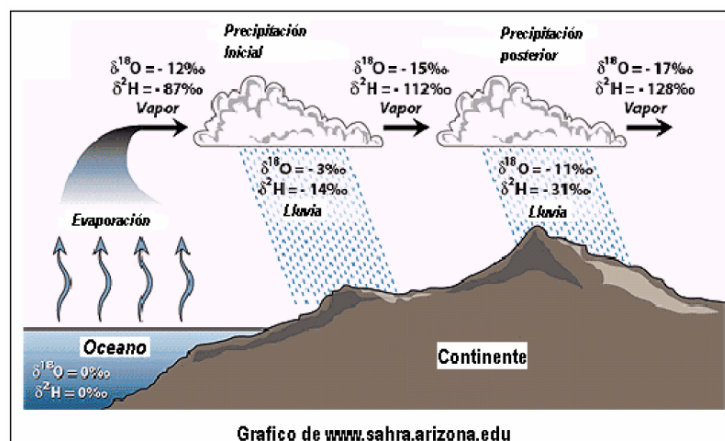
en el mundo se sitúan alrededor de la línea meteórica, $\delta^2 H = 8 \delta^{18} O + 10$ (Rozanski & Froehlich, 2002).

2.2 VARIACIÓN ISOTÓPICA EN LA PRECIPITACIÓN.

Las variaciones de la composición isotópica de la precipitación en el mundo obedecen a distintos factores, generados por la heterogeneidad climática, topográfica y pluviométrica, así como el distanciamiento oceánico y latitudinal. Por esto se hace necesario realizar estudios a nivel local para poder determinar estos cambios que afectan la composición isotópica de un lugar a otro y más si se habla de un país con tanta diversidad climática como lo es Colombia. Las variaciones en la composición isotópica de la precipitación pueden explicarse de la siguiente forma:

Existe una variación debida al efecto continental que pone en evidencia un empobrecimiento progresivo del 2H y del ^{18}O en la precipitación a medida en que se aumenta la distancia a una zona continental respecto al océano. Cabe resaltar que este efecto varia de un lugar a otro o de estación en estación se estas existen. En la siguiente figura se ilustra el comportamiento del efecto continental.

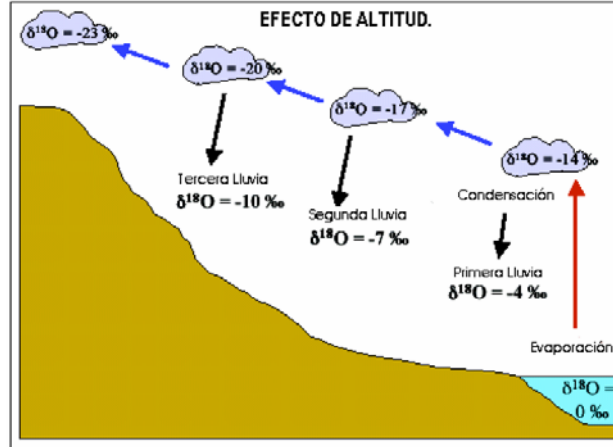
Figura 6. Efecto continental



Otra variación que tiene gran incidencia en el contenido isotópico es la variación debida al efecto de latitud en el cual se ven involucrados los procesos de evaporación – condensación, esto se debe a que la formación del vapor en la atmosfera mediante la evaporación en las regiones que poseen las temperaturas oceánicas superficiales mas elevadas, como el Ecuador, generen un mayor desprendimiento de isótopos pesados, caracterizando así la precipitación en esta zonas con desviaciones enriquecidas de ^2H y ^{18}O mientras que la condensación progresiva del vapor durante el transporte hacia latitudes más altas con temperaturas inferiores, como en los polos, va empobreciendo la precipitación a medida que avanza; además las aguas evaporadas en estas latitudes no reciben la suficiente temperatura para desprender la misma cantidad de isótopos pesados.

Una de las variaciones que se presenta con mayor regularidad en topografías tan agrestes como la nuestra, es la variación debida al efecto de altitud u orográfico, en el cual la composición isotópica cambia con la altitud en el terreno, lo cual implica que a mayor altitud mayor empobrecimiento del ^2H y del ^{18}O debido a que los frentes nubosos al ir avanzando se encuentran con las montañas como obstáculo, generando una primera condensación, en donde se observan valores isotópicos relativamente enriquecidos, empobreciendo así las condensaciones posteriores del frente nuboso. Esta es una de las relaciones mas significativas e útil en hidrología isotópica, ya que sirve en la identificación de la elevación a la cual se produce la recarga. Adicionalmente este efecto depende de otros factores como lo son la temperatura y la presión ya que la condensación se produce a partir de la disminución de los anteriores con el aumento de altitud.

Figura 7. Efecto de altitud



El efecto de variación isotópica de la $\delta^{18}\text{O}$ con respecto a la elevación, observado por Vogel en 1975 arrojó un rango que generalmente está entre -0.1‰ y -0.6‰ por cada 100 metros de altitud.

Quizá uno de las más importantes variaciones es la causada por el efecto de cantidad. Dansgaard (1964). Descubrió que existe una relación entre la cantidad de precipitación y la desviación isotópica del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$). Un ejemplo claro de este hecho, son las intensas lluvias tropicales que coinciden con el paso de la zona de convergencia intertropical, caracterizadas por nubes muy altas y fuertes aguaceros, estas aguas pueden estar muy empobrecidas en $\delta^{18}\text{O}$ y en $\delta^2\text{H}$. Se observan efectos similares pero en menor proporción en las lluvias generadas por tormentas; por otro lado, los pequeños volúmenes de lluvia que se producen en las regiones más áridas. Se enriquecen en isótopos pesados a lo largo de la línea de evaporaciones típicas. de todas formas se llega a concluir que se deben evitar las generalizaciones y explorar los efectos locales de manera individual para cada caso mediante programas especializados de muestreo.

A su vez ocurre un fenómeno que genera una variación denominada variación estacional; que está ligada al efecto de la temperatura y a la localización de las regiones de estudio, ya que en las estaciones cálidas las temperaturas son

elevadas. En los meses templados y secos un proceso, denominado fraccionamiento isotópico enriquece las aguas con $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, todo lo contrario ocurre en las estaciones frías en donde los valores negativamente grandes del $\delta^{18}\text{O}$ y del $\delta^2\text{H}$ están asociados con la nieve y el granizo Jouzel y Merlvat, (1984), estos eventos están relacionados con valores isotópicos muy empobrecidos.

3. REVISION Y ANALISIS DE LA INFORMACION

Con el animo de obtener resultados representativos para el área de estudio, en el presente capítulo se realiza una revisión detallada de los valores de precipitación obtenidos en las diferentes estaciones para el periodo estipulado, posteriormente se realiza una decantación de la información recolectada tanto de isotopos como de precipitación en las diferentes redes. Una vez hecha la depuración de la información se continua con los cálculos demandados en esta investigación para la obtención de resultados satisfactorios para la misma.

3.1 ANÁLISIS DE FENOMENOS GLOBALES QUE INFLUYEN EN LA PRECIPITACION DE LA C.S.R.L

El análisis de los diferentes fenómenos globales que afectan de manera directa la precipitación que se presenta sobre la cuenca superior del rio Lebrija consiste en primera instancia en el estudio del comportamiento presentado por la llamada zona de convergencia intertropical (ZCIT), su ocurrencia, y la forma en que esta afecta la precipitación que se presenta sobre esta importante cuenca.

De igual forma se realiza el estudio del fenómeno EL NIÑO / OSCILACION DEL SUR (ENSO) y la consistencia de sus efectos sobre una de las principales variables del ciclo hidrológico: la precipitación.

3.1.1 Zona de convergencia intertropical

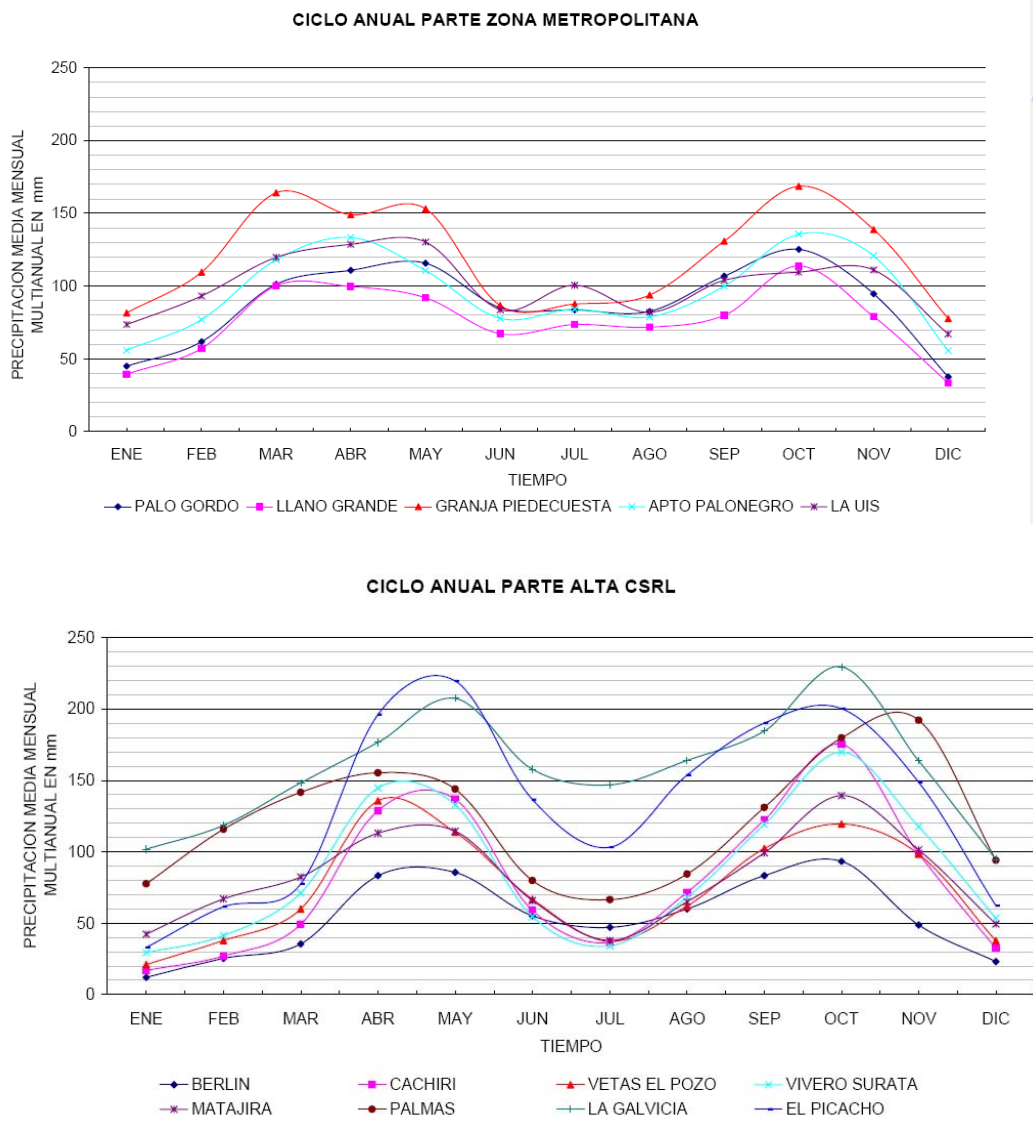
El ciclo anual de lluvias en Colombia está dominado por fenómenos físicos como la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), asociada con la dinámica trans-ecuatorial de advección de humedad y calor causada por los vientos alisios del este, la actividad del chorro del Chocó y de los sistemas convectivos de mesoescala, sin dejar de mencionar la importancia de la interacción suelo – atmosfera en la regulación del ciclo anual de la hidrología del país Cuartas & Poveda, (2002); Vélez et al, (2002).

De la investigación realizada por Arenas & Ruiz (2005) sobre “estudio de la variación del régimen de las lluvias en la cuenca superior del río Lebrija” se descubrió que existía una diferencia, en cuanto a la bimodalidad anual que presentaba la precipitación en la cuenca, entre la parte alta y la zona metropolitana de la misma, debido a este comportamiento se decidió dividir la cuenca de acuerdo a esta diferencia.

De esta manera la cuenca quedó dividida entre las precipitaciones que tienen un comportamiento bimodal anual bien definido, como la parte alta de la cuenca, y las que no, como es el caso de la zona metropolitana.

La figura 8 muestra el comportamiento de la precipitación reflejado en los datos tomados en las diferentes estaciones de muestreo ubicadas, unas en la parte alta y otras en la zona metropolitana. En estas gráficas se hace notoria la bimodalidad existente en la parte alta de la cuenca superior del río Lebrija. Poveda G.(2000).

Figura 8. Ciclo anual en la C.S.R.L.



Quedando en claro que en la zona alta de la cuenca superior del río Lebrija se presenta una distribución bimodal de la precipitación, en donde se puede diferenciar claramente dos periodos secos y dos periodos húmedos los cuales coinciden con la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical por la región. Este fenómeno se da como resultado del ciclo anual de temperaturas superficiales por efecto de la insolación, y que constituye el mecanismo físico de mayor importancia para explicar la bimodalidad existente en la parte alta de la

cuenca. Entre los extremos del calendario, la ZCIT. pasa dos veces por encima del territorio colombiano en su camino hacia el sur en época de octubre a noviembre y hacia el norte en la época de abril a mayo, produciendo las temporadas de más alta pluviosidad en la cuenca, y la época seca se presenta en los periodos comprendidos entre el mes de diciembre a febrero y de junio a agosto. **(Poveda G. 2000).**

La posición de la ZCIT está asociada con la intensidad de los vientos alisios del este del hemisferio contrario, y su oscilación no es simétrica alrededor del ecuador terrestre, ya que su posición media se encuentra alrededor de 5° - 10° N **(Philander et al., 1996).**

La ZCIT constituye el lugar preferente para la convergencia superficial de los vientos alisios, y es una región preferente de bajas presiones atmosféricas superficiales, ascenso de vientos húmedos, desarrollo de mecanismos de convección profunda, alta nubosidad y divergencia en la alta atmósfera Poveda G. (2000).

Los fenómenos que se desarrollan en el pacifico influyen en el comportamiento de la ZCIT, y por lo tanto en la distribución de las lluvias. Estos fenómenos son responsables de oscilaciones marcadas en la variabilidad climática de la región, causando efecto sobre el régimen de lluvias que no siguen un patrón único.

En la siguiente grafica se muestra el ciclo anual de la parte baja de la cuenca o en los alrededores de la zona metropolitana de Bucaramanga y en la cual se puede difiere con respecto a la bimodalidad que describen las estaciones ubicadas en la parte alta de la cuenca.

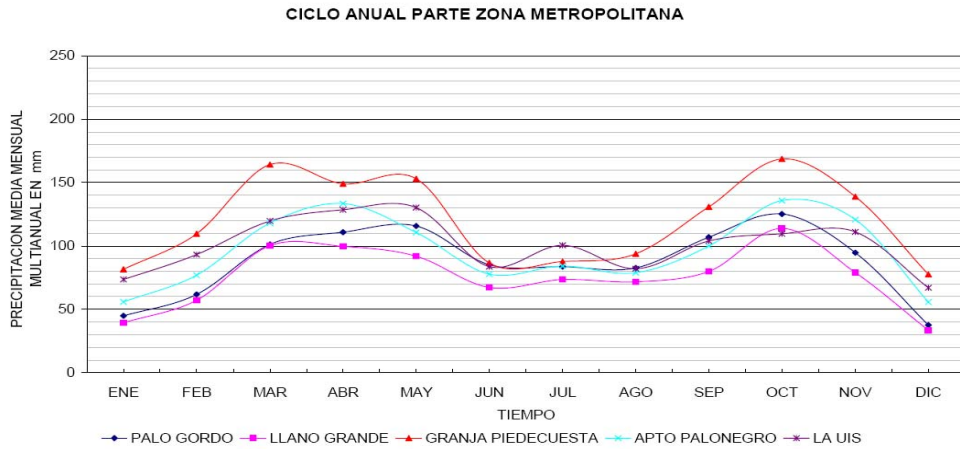


Figura 9. Ciclo anual Zona Metropolitana de la C.S.R.L.

3.1.2 El niño / oscilación del sur

El fenómeno EL NIÑO / Oscilación del sur (ENSO, por sus siglas en ingles) es un evento natural que se presenta como resultado de la interacción entre el océano y la atmósfera en la región del océano pacífico ecuatorial. La variabilidad climática global a escala de tiempo interanual está fuertemente controlada por este fenómeno. El ENSO tiene una variabilidad estacional (asociada con su enfasamiento con el ciclo anual), ya que comienza durante la primavera del hemisferio Norte (marzo-mayo), y alcanza su máximo desarrollo durante el tiempo de la Navidad, de allí se deriva su nombre: EL NIÑO. La componente atmosférica del ENSO, conocida como oscilación del sur es una onda estacionaria en la masa atmosférica que produce un gradiente de presiones entre el oeste y el este del pacífico ecuatorial. Por lo general, un centro de alta presión se localiza cerca de Tahití (18° S, 150° O) mientras que un centro de baja presión se localiza entre Indonesia y norte de Australia cerca de Darwin (12° S, 131° E). Este gradiente de presiones atmosféricas está normalmente representado por un índice denominado de oscilación del sur (SOI, por sus siglas en Inglés), el cual se define como la diferencia estandarizada de presiones atmosféricas entre los sitios anteriormente citados.

EL NIÑO es la fase calida del ENSO, en la que se presenta un aumento de las temperaturas superficiales del mar, es decir periodos más secos de lo normal en la región tropical de América del sur, lo contrario sucede en la fase fría del ENSO, NIÑA, en donde se presentan anomalías positivas, es decir periodos mas lluviosos, esto se debe al desplazamiento del centro de convección dentro de la ZCIT hacia el sur y hacia el oeste de su posición normal. (**Poveda** 2000).

3.2 INFORMACION DE PRECIPITACION

Este estudio se realizó con la información de precipitación disponible en las estaciones de la red pluviométrica, la cual se describió en detalle en el numeral 1.5. El periodo de tiempo empleado en este estudio fue el periodo comprendido entre los años 2004 – 2007, y este se conservó para todas las estaciones de la red.

En la tabla 3 se observa la cantidad de datos de precipitación existentes en cada una de las estaciones en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2004 – 2007.

Tabla 3. Numero de datos pluviométricos de tipo mensual.

Año	Mes	Berlín	El Brasil	El Picacho	El Pajal	El Rasgón	Granja Piedecuesta	La Galvicia	La Lora	La Mariana	Martin Gil	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	Me s	Berli n	El Brasi l	El Picach o	El Paja l	El Rasgó n	Granja Piedecuest a	La Galvici a	La Lor a	La Marian a	Marti n Gil	MataJir a	San Antoni o	Sevill a	Ton a
200 6	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		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	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
200 7	Ene	X	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	X
	Abr	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	X	X	X	X
	Jul	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
	Sep	X	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	X
	Nov	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
N° Datos		40	47	46	46	36	47	47	45	47	18	47	48	40	46

3.2.1 Revisión de la información de precipitación

Una vez obtenidos y organizados los datos, se comienza a evaluar la veracidad de los mismos, mediante comparaciones que se hacen utilizando datos presentados el mismo mes, en la misma estación pero en diferentes años; así como también comparaciones hechas el mismo mes, el mismo año pero con estaciones cercanas a la estación en estudio. De esta forma se descartan algunos datos con los que inicialmente se contaban, pero que sus valores no correspondían al comportamiento normal de la lluvia en esos lugares.

En el anexo A se encuentran consignados en una tabla los datos de precipitación de cada estación que se utilizó en este estudio.

3.2.2 Complementación de las series

Alguna de las series de las estaciones utilizadas presentan datos faltantes debido a inconvenientes con el operador, fallas del aparato o alguna otra eventualidad. Mediante regresión multilínea se obtuvieron los valores de los datos con los que inicialmente no se contaban por ser datos faltantes.

En la tabla 4 se observan las estaciones con sus coeficientes de correlación de los datos de precipitación diaria.

Tabla 4. Estadísticas de la regresión multilineal

Estación	Coefficiente de determinación R^2	R^2 ajustado	Correlación Lineal R	Error Típico
BERLIN	0.83	0.74	0.91	3.60
EL RASGÓN	0.63	0.40	0.79	8.05
MARTIN GIL	0.85	0.48	0.92	10.82
SEVILLA	0.68	0.43	0.82	4.83
BRASIL	0.87	0.82	0.93	3.16
EL PICACHO	0.76	0.66	0.87	5.28
EL PAJAL	0.80	0.73	0.90	5.06
GJA.PCTA	0.48	0.28	0.69	8.19
GALVICIA	0.86	0.81	0.93	3.18
LA LORA	0.73	0.63	0.86	3.22
MARIANA	0.70	0.58	0.83	5.47
MATAJIRA	0.87	0.82	0.93	2.93
TONA	0.85	0.80	0.92	5.28

3.2.3 PRECIPITACION PROMEDIO MENSUAL

Con el fin de observar comportamiento de la precipitación en las diferentes estaciones que se encuentran dentro del área de estudio, se obtuvo un valor de precipitación promedio mensual que muestra un régimen o patrón de lluvia definido que se hace evidente al momento de representar los valores obtenidos para cada estación en el tiempo.

En la figura 10 se puede observar el comportamiento bimodal que se presenta en cada estación durante el periodo en estudio (4 años), y que coincide con algunas investigaciones realizadas anteriormente. Como la realizada por Arenas, 2007.

Figura 10. Graficas de precipitación promedio red pluviométrica

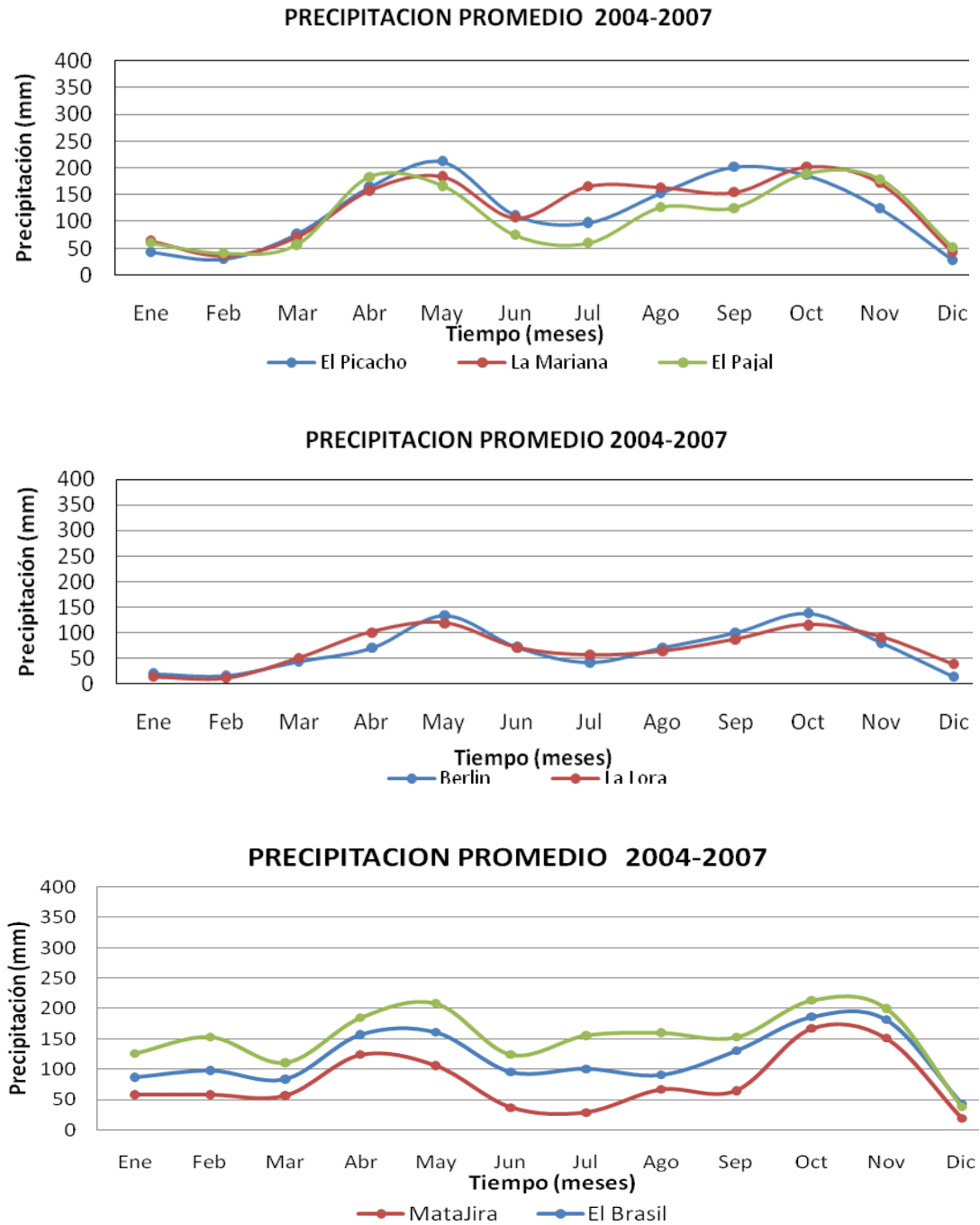
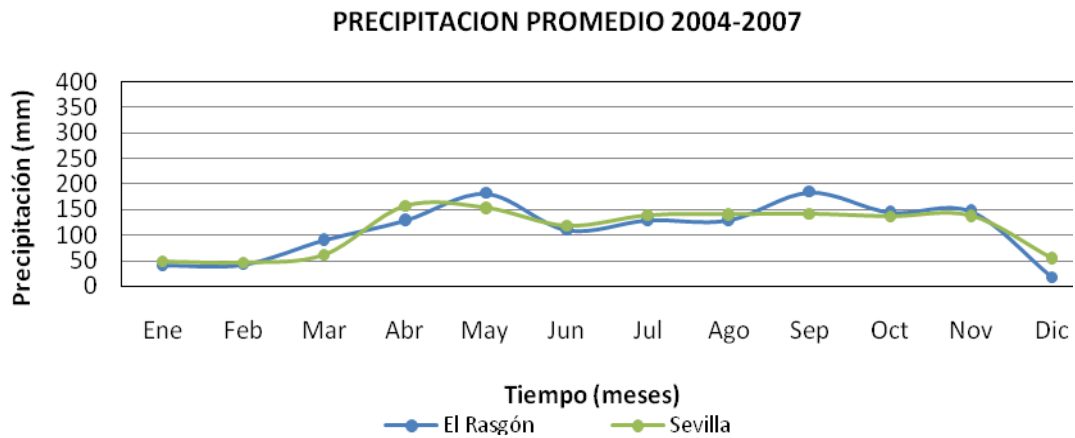
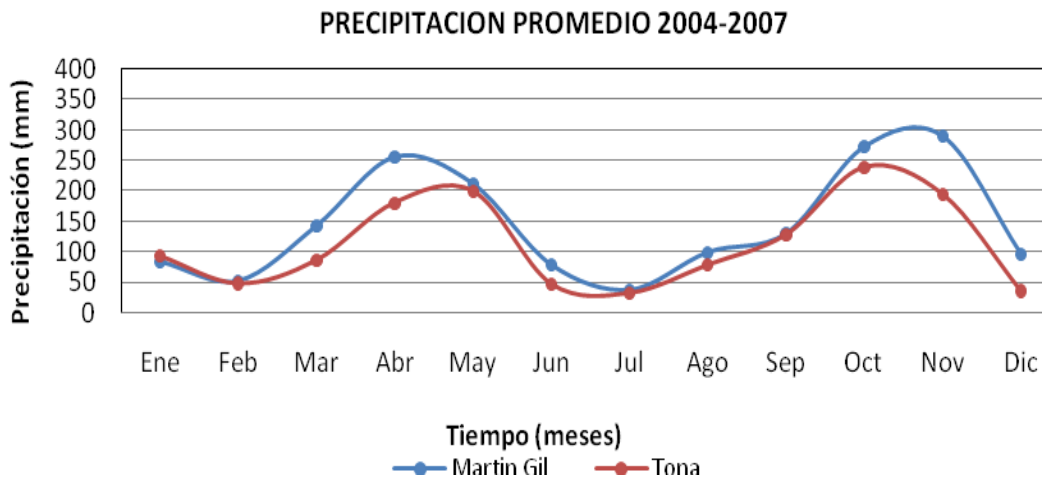
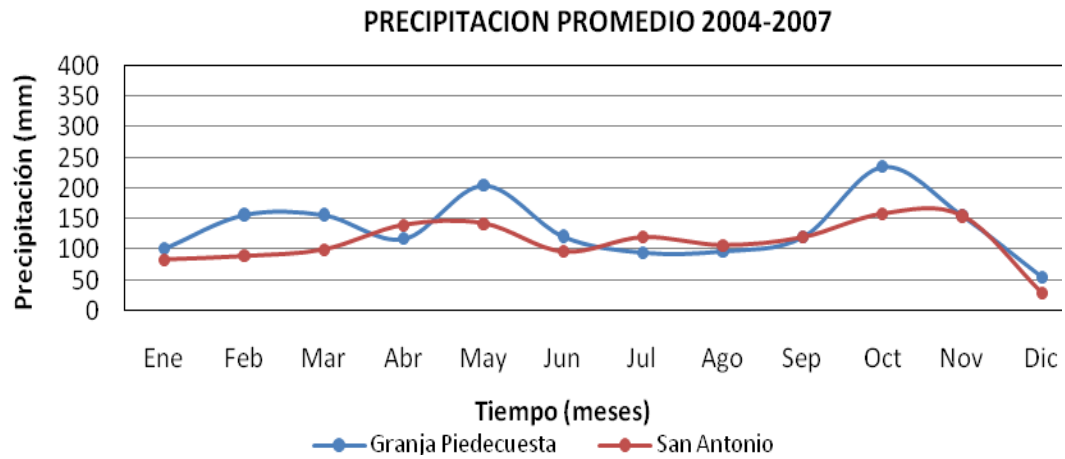


Figura 10. Graficas de precipitación promedio red pluviométrica



Cabe resaltar que algunas estaciones ubicadas en la zona de estudio no muestran un comportamiento bimodal bien definido, lo cual hace pensar que diversos factores intervienen de manera directa en este comportamiento.

3.2.4 Precipitación promedio estacional

Se hace necesario obtener el valor de la precipitación promedio estacionalmente con la finalidad de observar el comportamiento estacional de la precipitación que se presenta sobre el área de estudio durante los cuatro años que se contemplan en este estudio.

De la figura 11 se puede observar el comportamiento de la precipitación presentada en las diferentes estaciones; de acuerdo a esta gráfica podemos corroborar el comportamiento estacional al que anteriormente se hizo alusión y que coincide, estacionalmente hablando, con el paso de la zona de convergencia intertropical.

Figura 11. Graficas de precipitación promedio estacional red pluviométrica

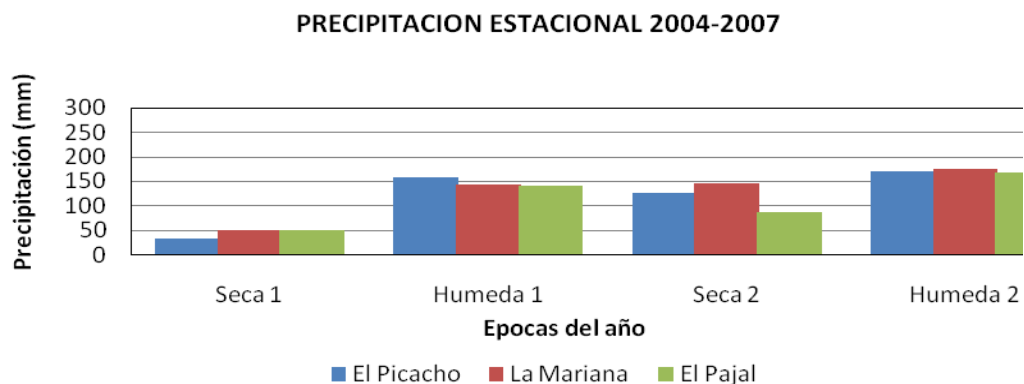
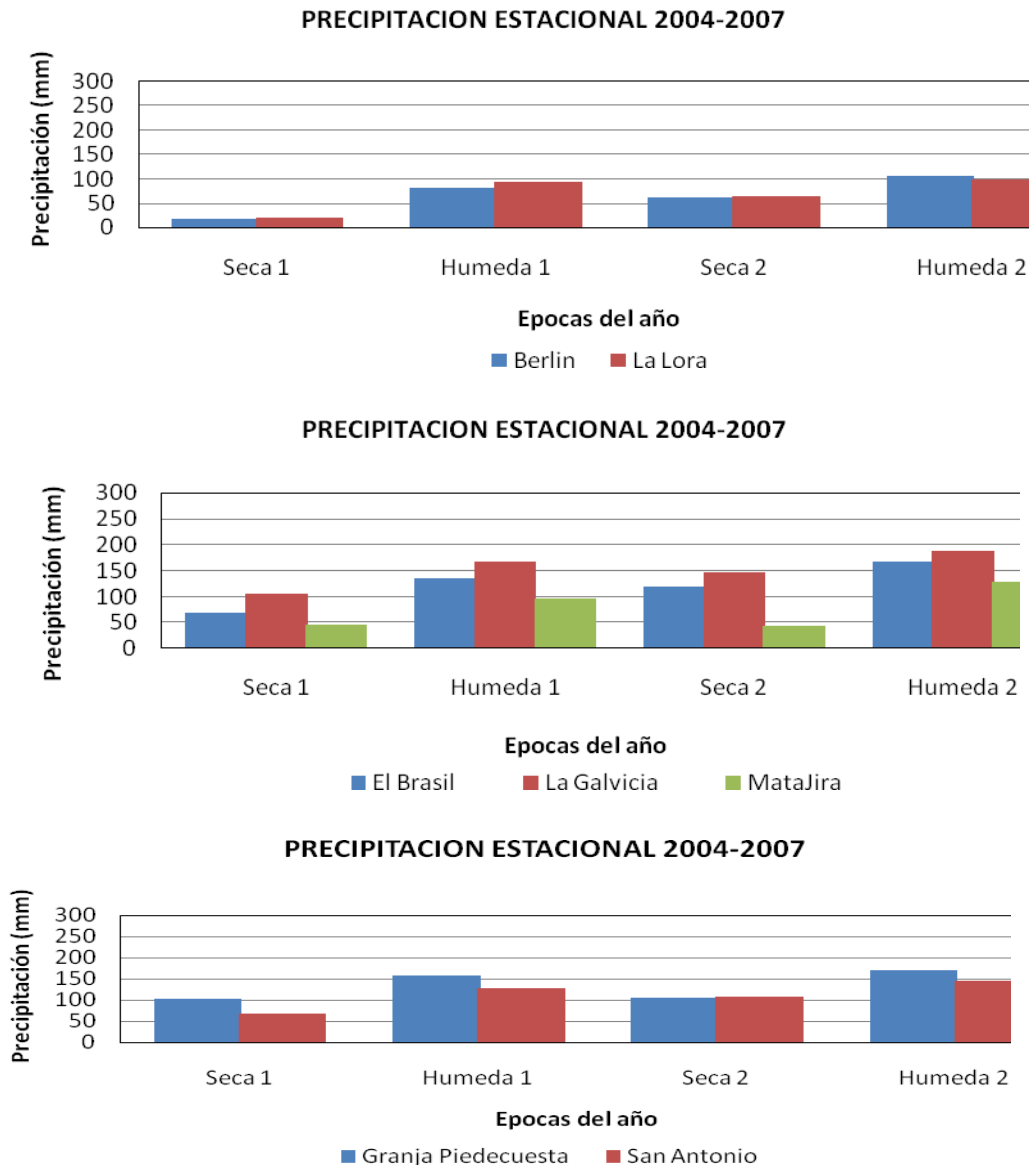


Figura 11. Graficas de precipitación promedio estacional red pluviométrica



3.3 INFORMACION DE ISOTOPÓS

En este estudio se trabajo con la información de desviación isotópica obtenida en la red de muestreo de isotopos estables en la precipitación (D y ¹⁸O) descrita en el

numeral 1.6. En la tabla 5 se pueden observar el número de datos de cada estación.

Tabla 5. Numero de datos de cada estación de tipo mensuales

Año	Mes	La Casita		Piedecuesta		Berlín-Col		San Antonio		La Galvicia		La Mariana		El Picacho		Tona		
		2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	
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	X
	Nov	X	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	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	X	
	Oct																	
	Nov																	
	Dic																	

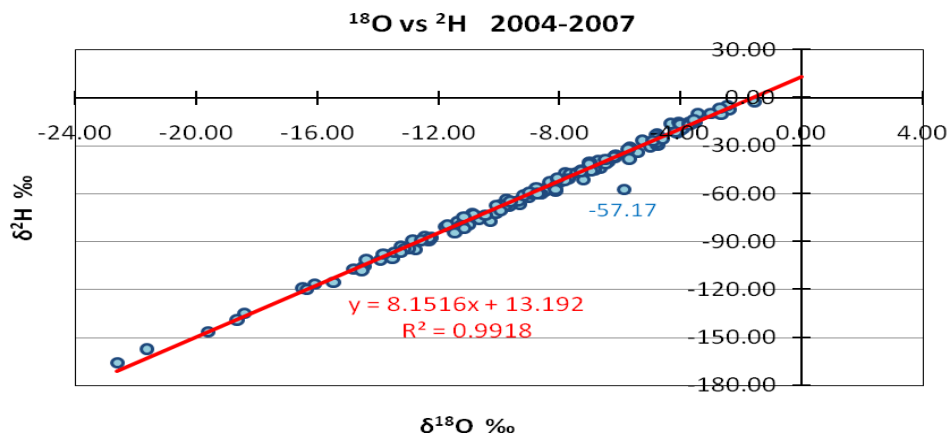
Tabla 5. Numero de datos de cada estación de tipo mensuales

Año	Mes	La Casita		Piedecuesta		Berlín-Col		San Antonio		La Galvicia		La Mariana		El Picacho		Tona	
		2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O	2H	18O
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	
	Mar																
	Abr																
	May																
	Jun																
	Jul																
	Ago																
	Sep																
	Oct																
	Nov																
	Dic																
N° Datos		18	18	14	14	19	19	20	20	19	19	20	20	19	19	19	19

3.3.1 Depuración de la información

Con el fin de eliminar del estudio los datos dudosos se trazo la relación $2H$ vs. ^{18}O con los datos isotópicos de precipitación obtenidos a partir del muestreo realizado en el periodo 2004-2007, tal como muestra la figura 12. A simple vista se aprecia el comportamiento lineal típico de la lluvia en la mayoría de los datos, sugiriendo que las técnicas de muestreo y que los resultados del mismo se pueden considerar verídicos, representativos y confiables. Los datos isotópicos que no presentan la tendencia lineal son descartados cuyos valores obedecen a muestras alteradas, tal como es el caso de los datos del mes de agosto del 2006 de la estación Berlín-Col.

Figura 12. Relación ^{18}O vs. 2H



3.3.2 Comportamiento estacional

Con el objetivo de observar el comportamiento estacional de los datos de isotopos en conjunto se grafico la $\delta^{18}O$ vs. la δ^2H para cada una de las épocas que conforman el ciclo anual junto con la recta meteórica teórica (recta de Craig) tal

como muestran la figura 13. Las épocas que presenta el ciclo anual en la parte alta de la C.S.R.L. son las siguientes:

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

Figura 13. ^{18}O vs. ^2H para todas las épocas del año

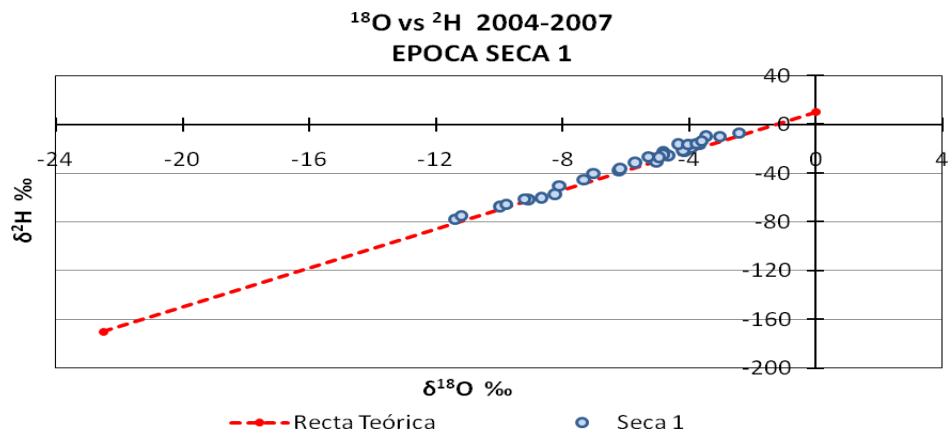
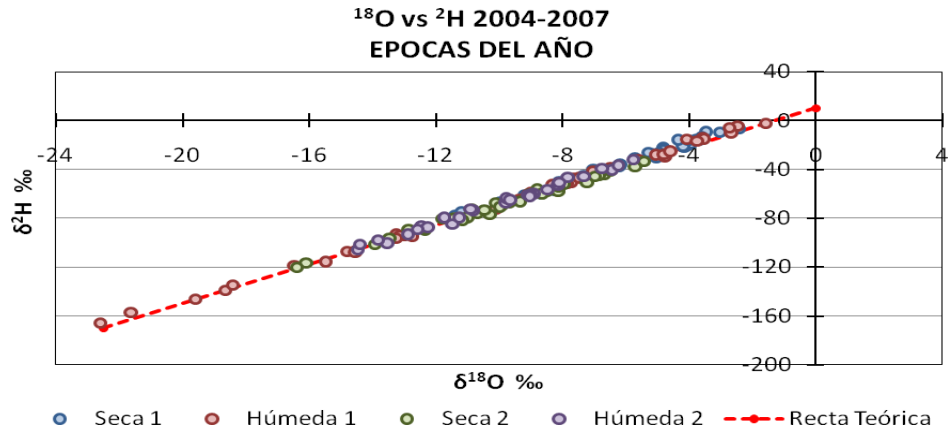


Figura 13. ^{18}O vs. ^2H para las épocas del año

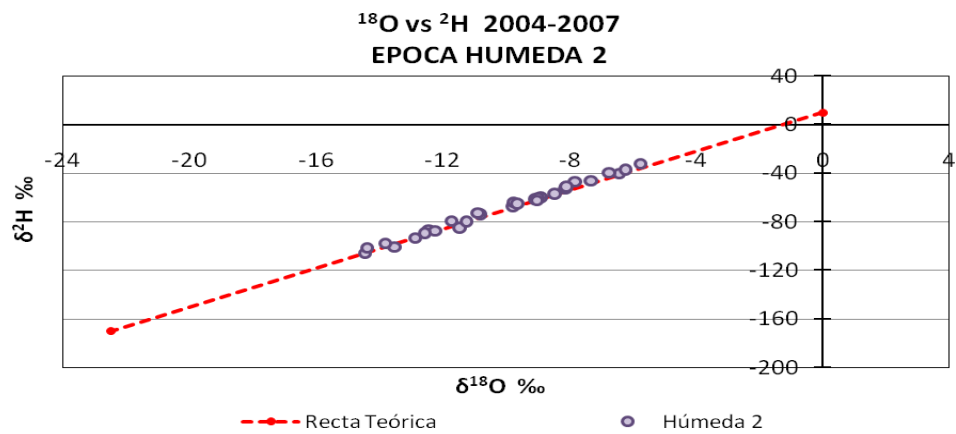
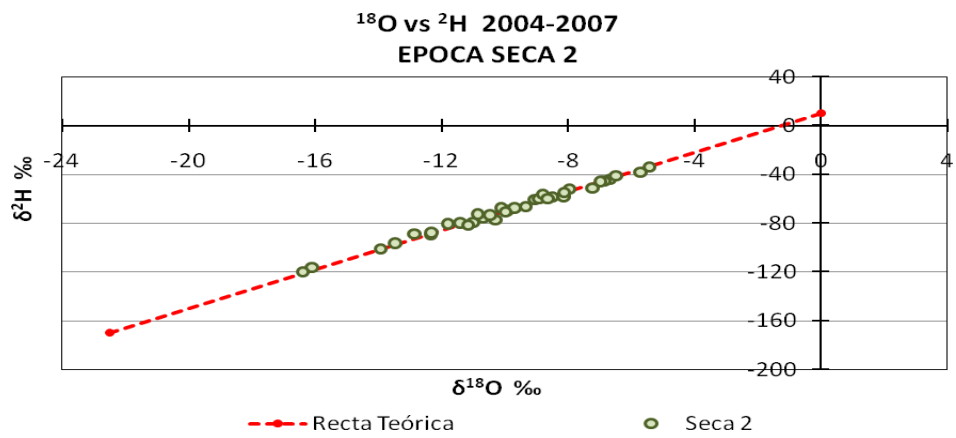
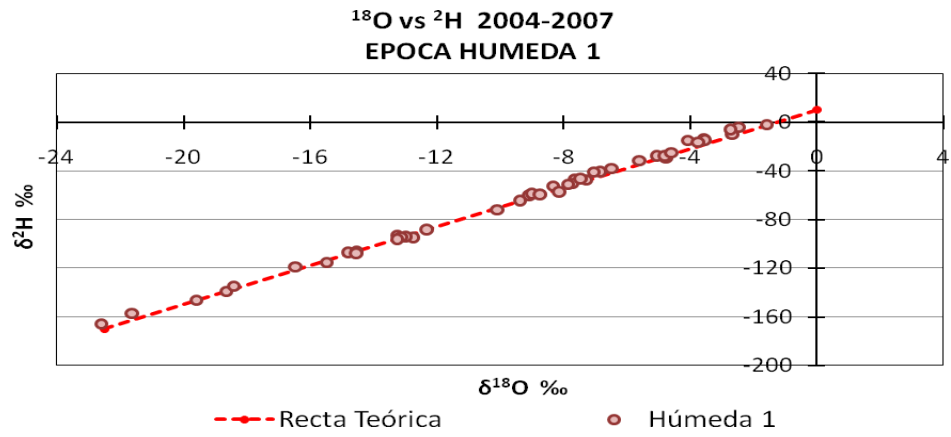


Tabla 6. Rango de desviación isotópica en cada época.

Época	Intervalo $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$			Intervalo $\delta^2\text{H}\text{‰}$		
Seca 1	-12	-	-1	-80	-	0
Húmeda 1	-23	-	-1	-170	-	0
Seca 2	-17	-	-5	-120	-	-30
Húmeda 2	-15	-	-5	-110	-	-30

La tabla 6 muestra los rangos de desviación isotópica que presentan los datos en cada una de las épocas, con los cuales realizamos la comparación de la información isotópica entre cada una de las épocas, observándose lo siguiente:

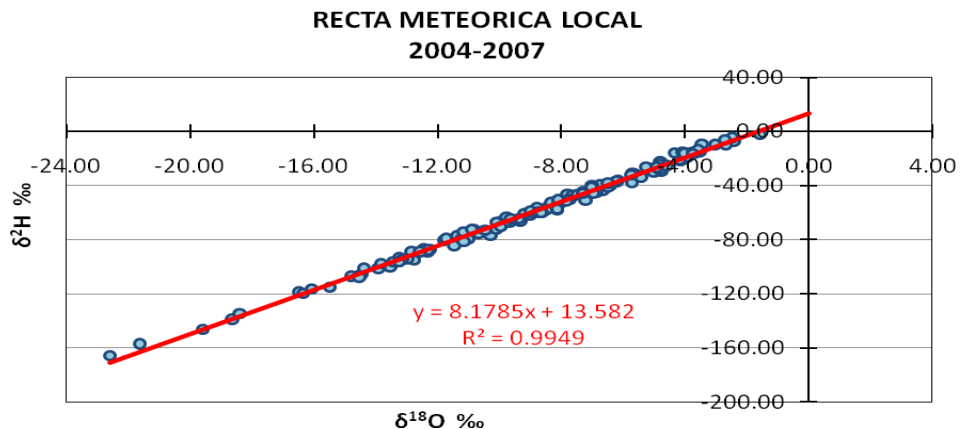
- Los valores de los contenidos isotópicos de la lluvia en cada una de las épocas se asemejan a los valores representados por la recta teórica (recta meteórica de Craig).
- Las aguas lluvias precipitadas en las épocas secas presentan un diferencia significativa en los contenidos de isotopos pesados, observándose en la época seca 1 aguas lluvias con mayores contenidos de isotopos pesados de 2H y 18O en comparación con los presentes en la época seca 2.
- Las aguas lluvias precipitadas en la época seca 2 y en la época húmeda 2 presentan contenidos similares de isotopos pesados.
- La lluvia precipitada en la época húmeda 1 presenta contenidos de isotopos tanto pesados como livianos. Lo cual indica que posiblemente el clima en la cuenca fue influenciado por el fenómeno de la Niña en los periodos de tiempo donde la lluvia presenta altos contenidos de isotopos pesados.

- Las lluvias precipitadas en la época húmeda 2 presentan mayores contenidos de isotopos pesados en comparación con los presentes en la época húmeda 1.

3.3.3 Recta meteórica 2004 – 2007

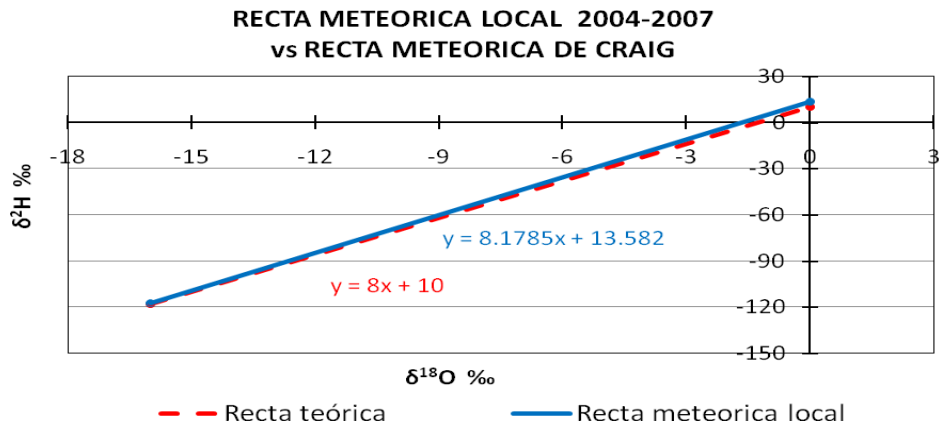
Para obtener la línea meteórica local del periodo 2004-2007 que representa el comportamiento isotópico típico de las aguas lluvias en el área de estudio, se grafico $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ y se encontró la correlación lineal entre estas variables definida por la expresión $\delta^2\text{H} = 8.1785 \cdot \delta^{18}\text{O} + 13.582$, tal como lo muestra la figura 14.

Figura 14. Recta meteórica local 2004-2007



La expresión obtenida que representa la relación entre las variables isotópicas, se caracteriza por tener una pendiente igual a 8.1785 e interceptar al eje de $\delta^2\text{H}$ con un valor igual 13.582 conocido como exceso de deuterio. La recta meteórica local obtenida es semejante a la recta teórica (recta de Craig) y presenta un exceso de deuterio mucho mayor, esta comparación se observa en la figura 15.

Figura 15. Recta meteórica local vs recta meteórica de Craig



3.3.4 Comparación con otras rectas meteóricas obtenidas en la C.S.R.L.

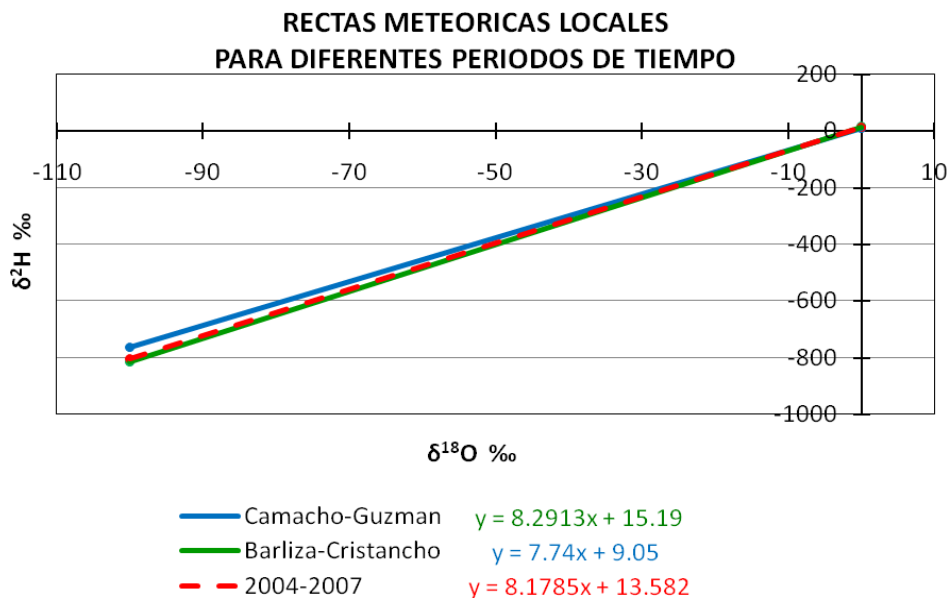
En estudios anteriores se han construido rectas meteóricas para describir la relación existente entre los isótopos presentes en la lluvia de la C.S.R.L., en los cuales se obtuvieron las siguientes expresiones:

- $\delta^2\text{H} = 7.74 \cdot \delta^{18}\text{O} + 9.05$, construida en la tesis Camacho-Guzmán 2005 con datos muestreados de manantiales en 1994, 2002 y 2003.
- $\delta^2\text{H} = 8.2913 \cdot \delta^{18}\text{O} + 15.19$, construida en la tesis Barliza-Cristancho 2007, con datos muestreados por Camacho y Guzmán entre octubre de 2004 y marzo de 2005.

La recta meteórica local obtenida en el presente estudio está representada por la ecuación $\delta^2\text{H} = 8.1785 \cdot \delta^{18}\text{O} + 13.582$, esta expresión presenta una pendiente mayor y un exceso de deuterio mayor en comparación con la recta meteórica construida por Camacho y Guzmán, el caso contrario se presenta al compararla con la recta meteórica construida por Barliza y Cristancho. La figura 16 muestra

las rectas meteóricas construidas hasta el momento que describen la relación entre los isotopos de ^{18}O y ^2H presentes en la lluvia de la C.S.R.L. para los diferentes periodos de muestreo, además nos permite observar que la recta construida por Barliza y Cristancho es la que más se asemeja a la recta obtenida en el presente estudio. Las rectas meteóricas anteriores a este estudio fueron construidas con datos puntuales de lluvia mientras la recta meteórica 2004-2007 fue obtenida con datos mensuales de casi cuatro años.

Figura 16. Rectas meteóricas locales para diferentes periodos de tiempo



3.3.5 Desviación isotópica promedio estacional

El ciclo anual de la precipitación en la zona en estudio presenta dos épocas secas y dos épocas húmedas descritas anteriormente, en las cuales es de gran importancia conocer el comportamiento promedio de los isotopos presentes en la lluvia de cada una de las estaciones que pertenecen a la red de muestreo isotópico utilizada en este estudio.

En el análisis de los datos de precipitación se obtuvo un promedio ponderado de su desviación isotópica correspondiente a cada uno de los sitios muestreados mediante la ecuación 1. En el caso de la información de precipitación en la estación la casita se obtuvo un promedio aritmético de su desviación isotópica al no contar con información de cantidad de precipitación.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (4)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación en mm y δ_i es la desviación recogida de la precipitación. Este medio cargado representa la composición isotópica media del agua (Mcdonnell J.J y Bonell, 1991).

El valor de la desviación isotópica promedio en cada época se obtuvo mediante la comparación de dos cálculos que se realizaron, el primero solo con los datos existentes de precipitación y isotopos, cuyos resultados se pueden observar en la figura 17, el segundo realizando el llenado de datos faltantes de precipitación y los datos existentes de isotopos cuyos resultados se muestran en la figura 18.

Figura 17. Desviación isotópica obtenida en el cálculo 1.

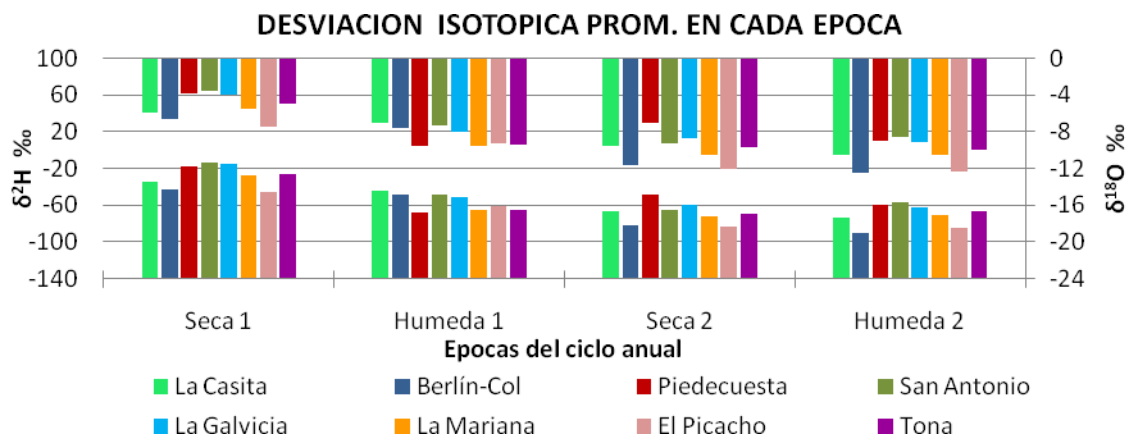
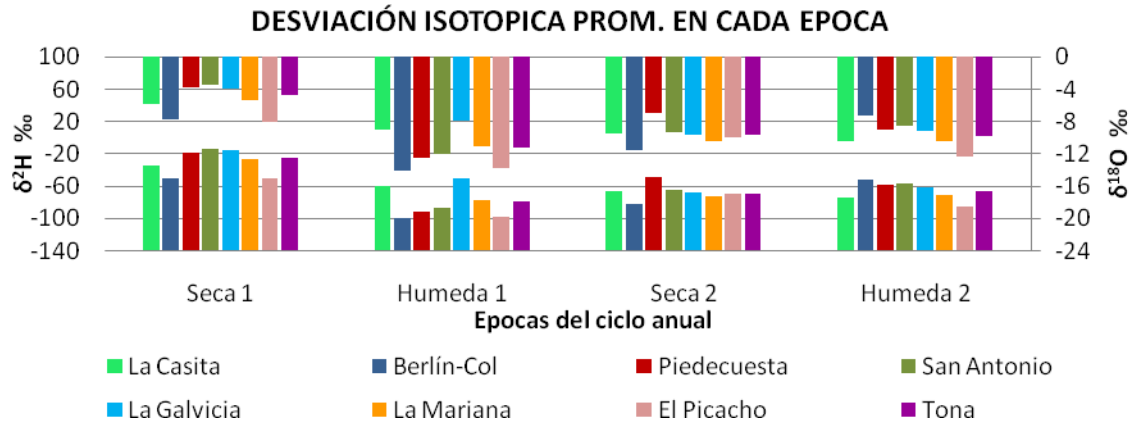


Figura 18. Desviación isotópica obtenida en el cálculo 2.



Los valores de las desviaciones isotópicas arrojados por el cálculo 2 se asemejan más al comportamiento de los isótopos para las diferentes épocas del año (isótopos pesados en épocas secas y isótopos livianos en épocas húmedas) por lo tanto son los valores representativos para realizar la posterior especialización de la desviación isotópica en el capítulo 4.

3.4 CICLO ANUAL DE PRECIPITACIÓN Y DESVIACIÓN ISOTÓPICA

Después de analizadas la precipitación y su desviación isotópica en el área de estudio, ahora se observara qué relación existe entre ambas. La figura 19 muestran notablemente aguas lluvias enriquecidas en isótopos pesados en la épocas de menor precipitación (épocas secas) en la mayoría de las estaciones de muestreo de isótopos y el caso contrario se presenta en las épocas de mayor precipitación (épocas húmedas).

Figura 19. Ciclo anual de precipitación vs. isotopos 2004-2007

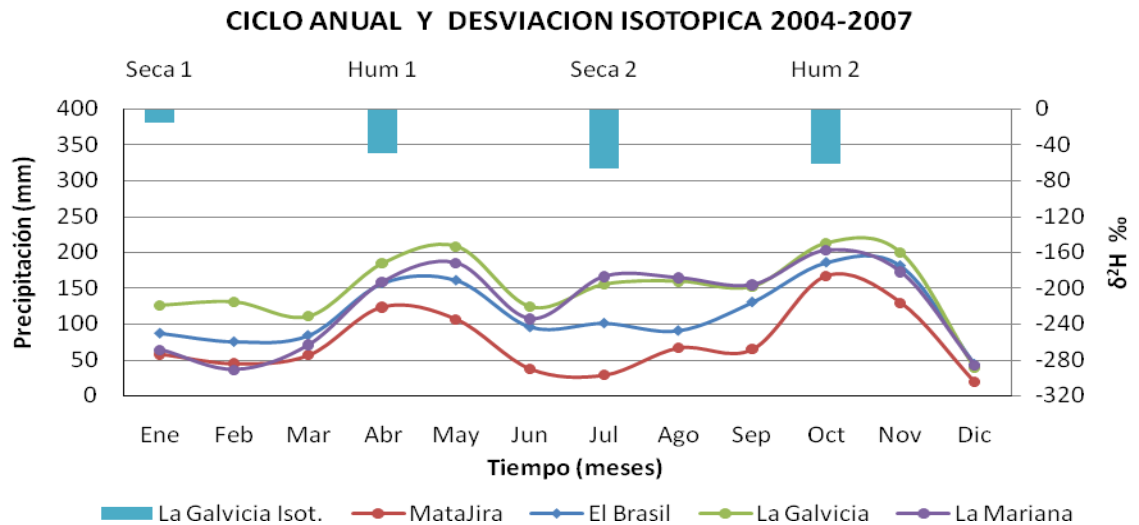
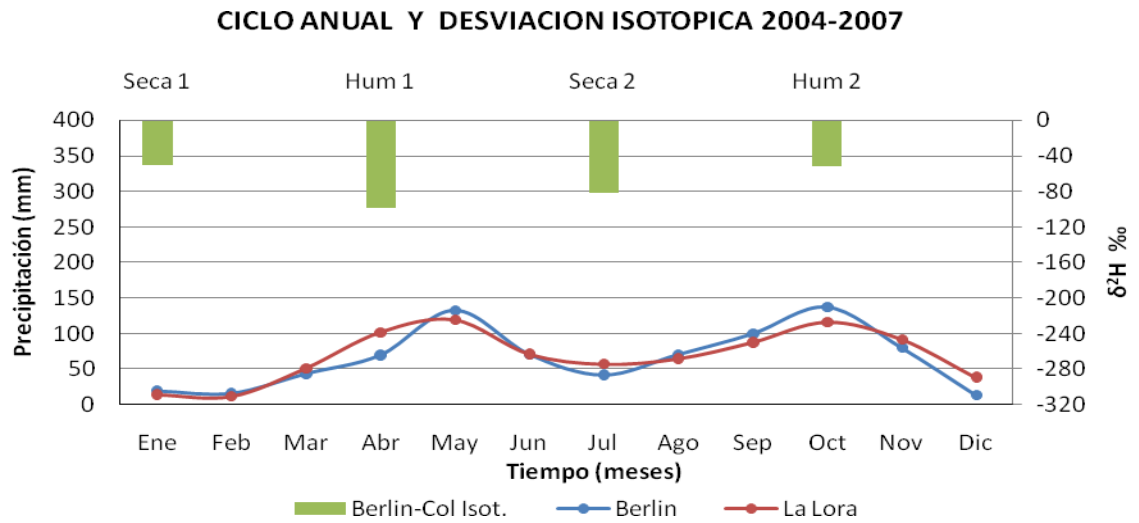
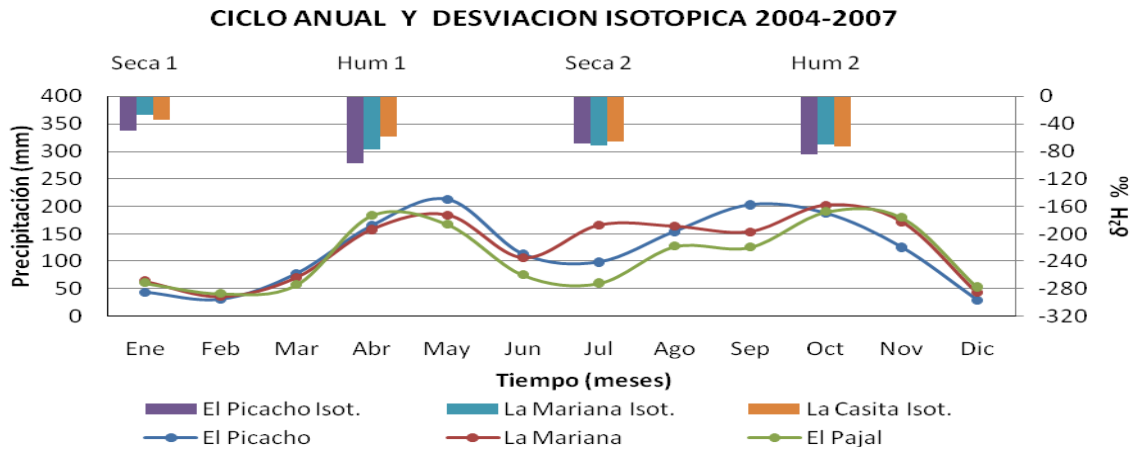
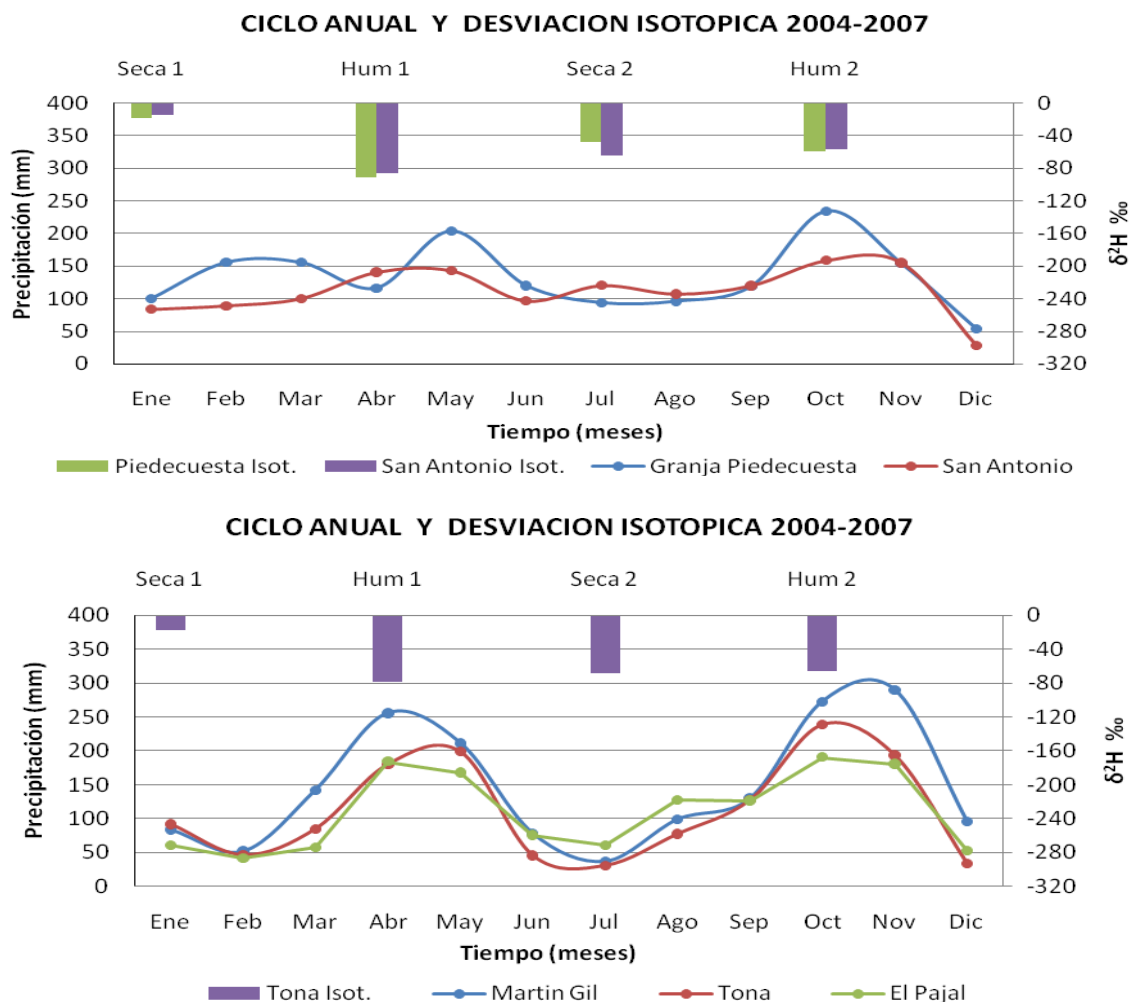


Figura 19. Ciclo anual de precipitación vs. isotopos 2004-2007



3.5 DESVIACIÓN ISOTOPICA PROMEDIO vs. ELEVACIÓN

Con los datos mensuales promedio de la desviación isotópica de cada una de las estaciones de la red de isotópica se obtuvo la relación entre las desviaciones isotópicas de ^{18}O o 2H y la elevación a la cual fueron tomadas las muestras de lluvia en cada una de las épocas correspondientes al ciclo anual, con el fin de observar la variación del contenido isotópico de la lluvia con respecto a la altura y definir las líneas a utilizar en estudios posteriores de identificación de zonas de recarga.

Figura 20: Desviación isotópica de ^2H vs. Elevación en cada una de las épocas.

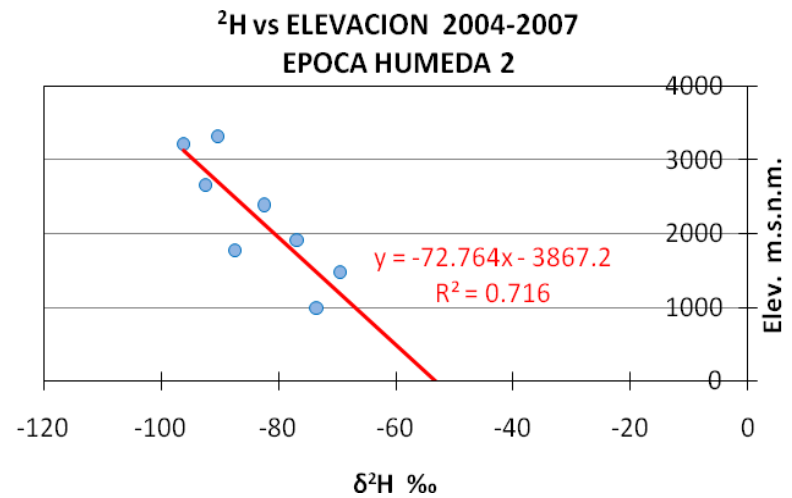
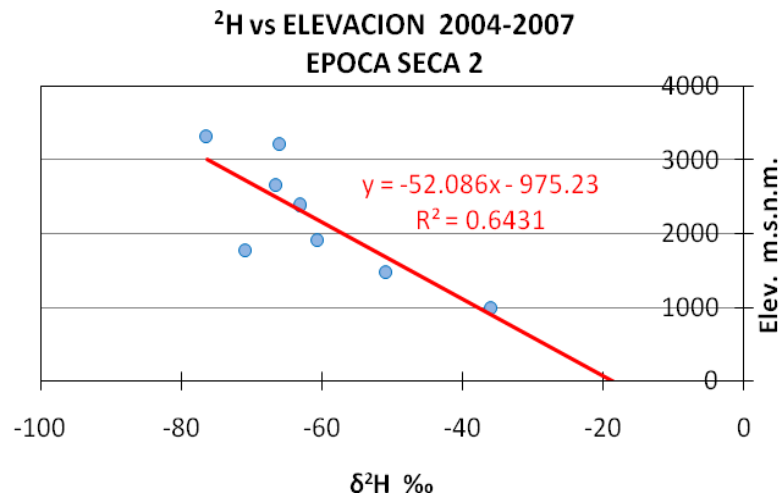
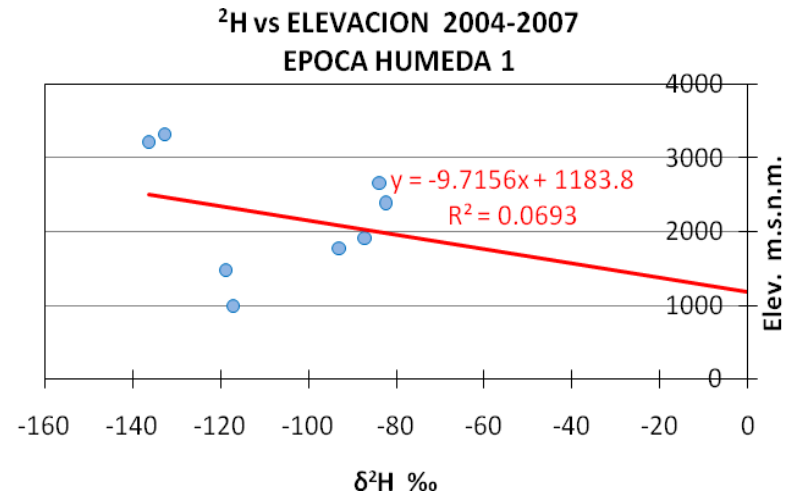
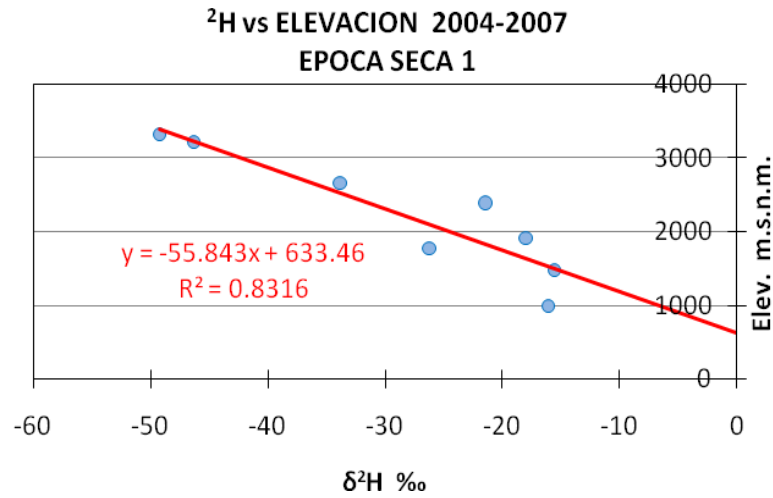
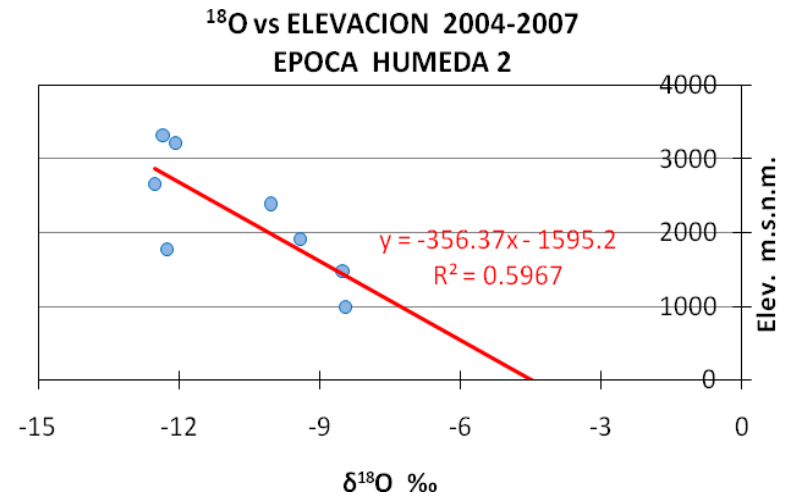
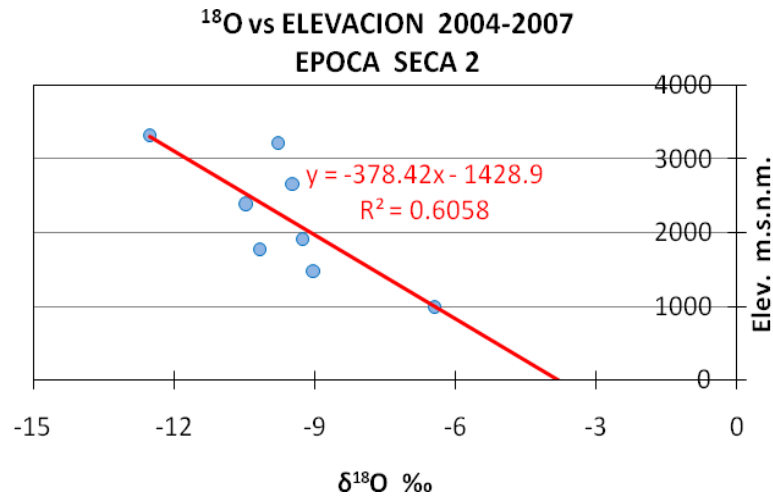
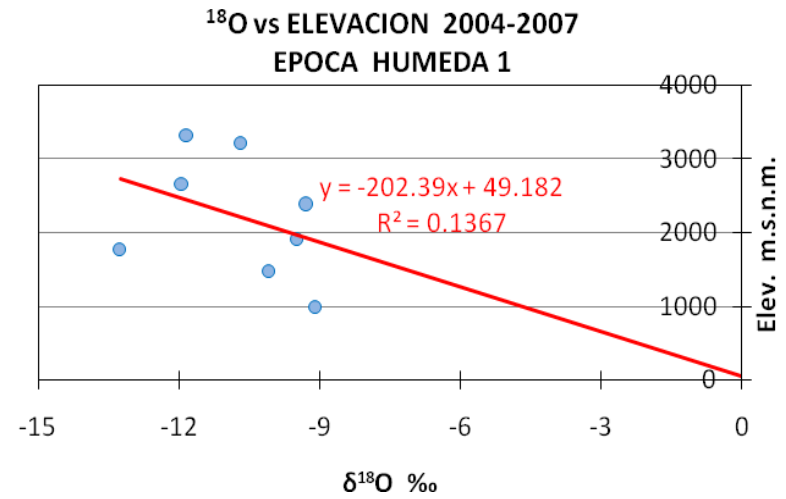
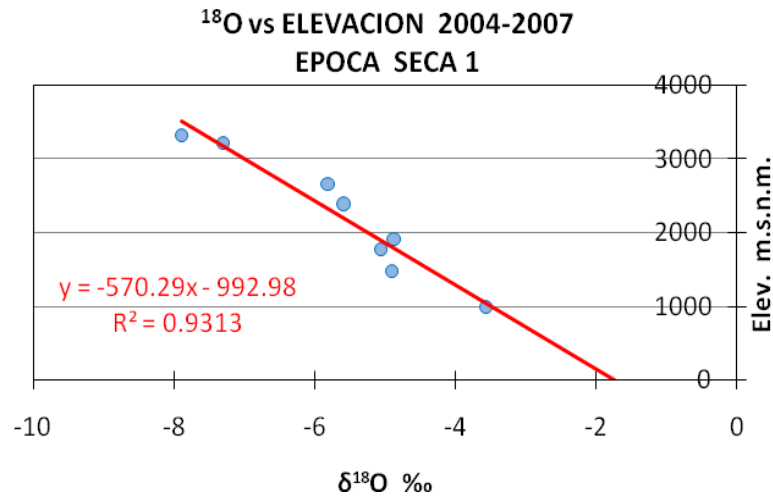


Figura 21: Desviación isotópica de ^{18}O vs. Elevación en cada una de las épocas.



En las figuras 20 y 21 podemos ver las diferentes relaciones encontradas entre las desviaciones isotópicas de la lluvia y la elevación, en los cuales se hace evidente en la época húmeda 1 coeficientes de correlación cercanos a cero entre las $\delta^2\text{H}$ o $\delta^{18}\text{O}$ y la elevación, lo cual indica que la variación del contenido de las aguas lluvias en esta época no presenta una variación lineal con respecto a la altura ya que las variables no se correlacionan entre sí. Esto se debe posiblemente a la influencia de otros efectos diferentes a la altitud quienes presuntamente causaron variaciones significativas en el contenido de isotopos en las aguas lluvias. De igual forma podemos observar épocas en las cuales es notoria la tendencia lineal como otras que no del todo reflejados por el coeficiente de correlación.

4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN Y DE LOS ISÓTOPOS EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA

4.1 ESPACIALIZACION DE LA PRECIPITACION

Los datos de precipitación corresponden al muestreo realizado por las diferentes estaciones que generaron información mensual, y que sirvieron para distribuir espacialmente la misma. Durante un periodo de cuatro años que va del año de 2004 hasta el año 2007.

Se constató que de los diferentes métodos de interpolación utilizados para espacializar la precipitación; Kriging arrojó resultados aceptables como el realizado en 28 estaciones desde el año de 1988 hasta el año 2000 (Maradei, Rojas, 2002). Y el realizado por en el año 2007 (Barliza & Cristancho, 2007).

Quienes utilizaron el método Kriging para la espacialización de la precipitación en la cuenca, obteniendo óptimos resultados.

4.1.1 Mapas de precipitación

En la elaboración de los mapas de precipitación de la cuenca superior del río Lebrija se utilizó la herramienta informática SURFER, el cual es un programa que permite realizar mallas de distribución espacial (grid de una variable mediante la interpolación de datos que contienen información en X, Y, y Z).

Utilizando las coordenadas de cada estación y la precipitación media anual obtenida de los datos registrados por la misma y con la máscara previamente definida por el área de estudio, la cual se describió en detalle en capítulos anteriores, esta máscara nos permitió separar el área de estudio del resto de la cuenca, a partir de allí se elaboran los mapas de espacialización de la precipitación para el periodo en estudio (2004 – 2007). Los mapas de precipitación se pueden observar en las figuras 20, 21, 22 y 23.

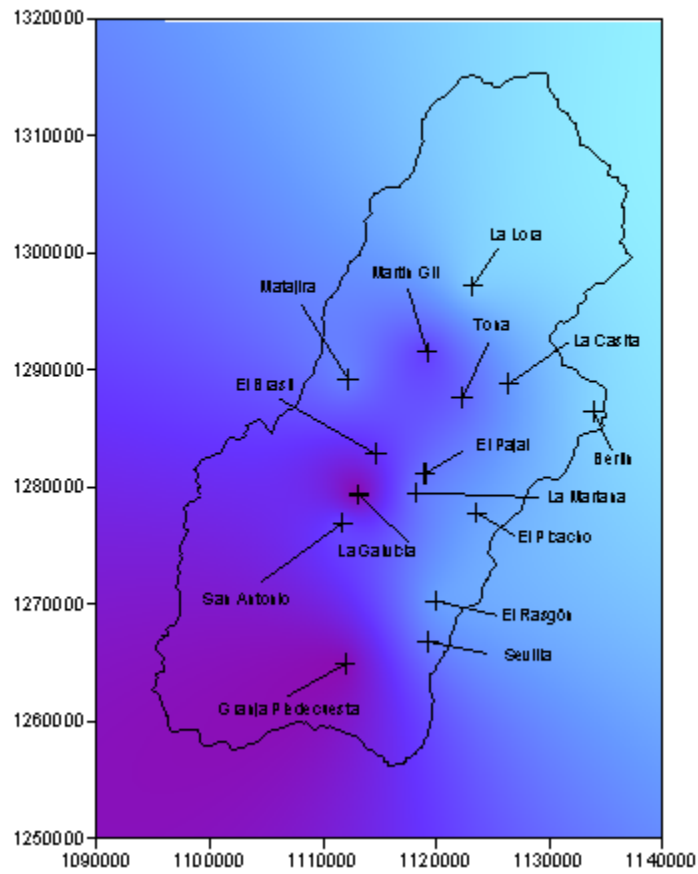
En los mapas se puede observar con claridad el rango de valores de precipitación que se presenta en la época seca 1, valores que pueden ir desde los 20 mm hasta los 120 mm en sus casos más extremos y que se presentan aproximadamente en inmediaciones de la estación la Galvicia. Para la época húmeda 1, en consonancia con lo que se esperaba, se tiene que estos valores oscilan entre los 120 y los 260 mm, y que sus valores máximos se ven representados en cercanías de la estación Martín Gil reflejando de esta manera un comportamiento normal de la época húmeda.

Observando la época seca 2, se destacan valores que se encuentran entre los 25 y los 130 mm y que hacen de la época seca 1 la época más seca del año en comparación con las otras épocas.

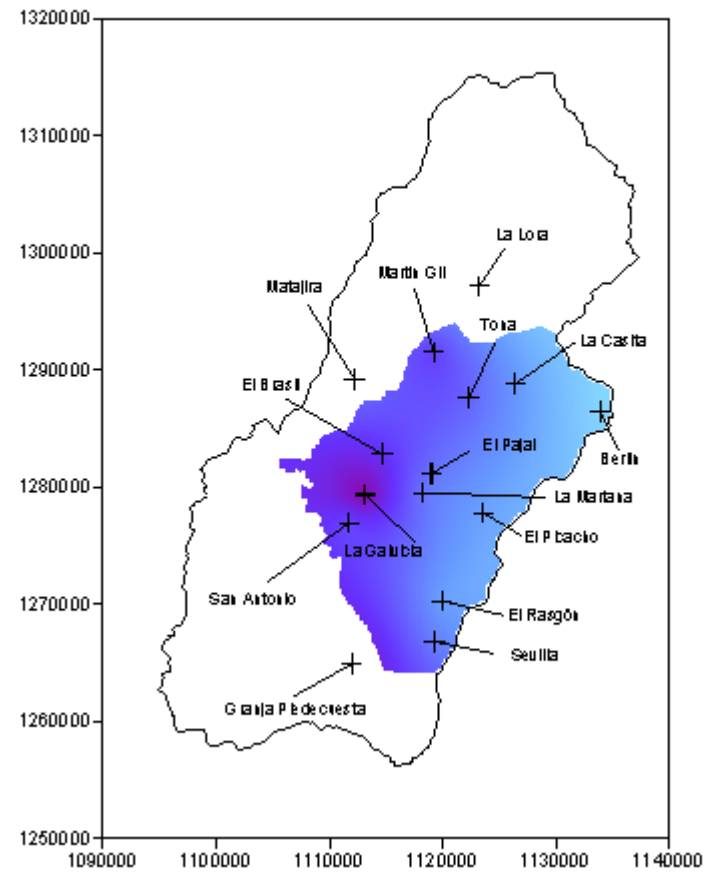
Durante la época 2 en consonancia con lo esperado, el mapa de distribución espacial de la precipitación en el área de estudio, muestra un aumento en los valores de precipitación con relación a las demás época, en especial con la época 1 quedando en claro que la época húmeda 2 es la época en la cual mas llueve sobre el área de estudio; época en la cual coincide el paso de la Z.C.I.T. en su paso por el país camino hacia al sur.

Figura 22. Mapa de la precipitación en la época seca 1

PRECIPITACION EPOCA SECA 1

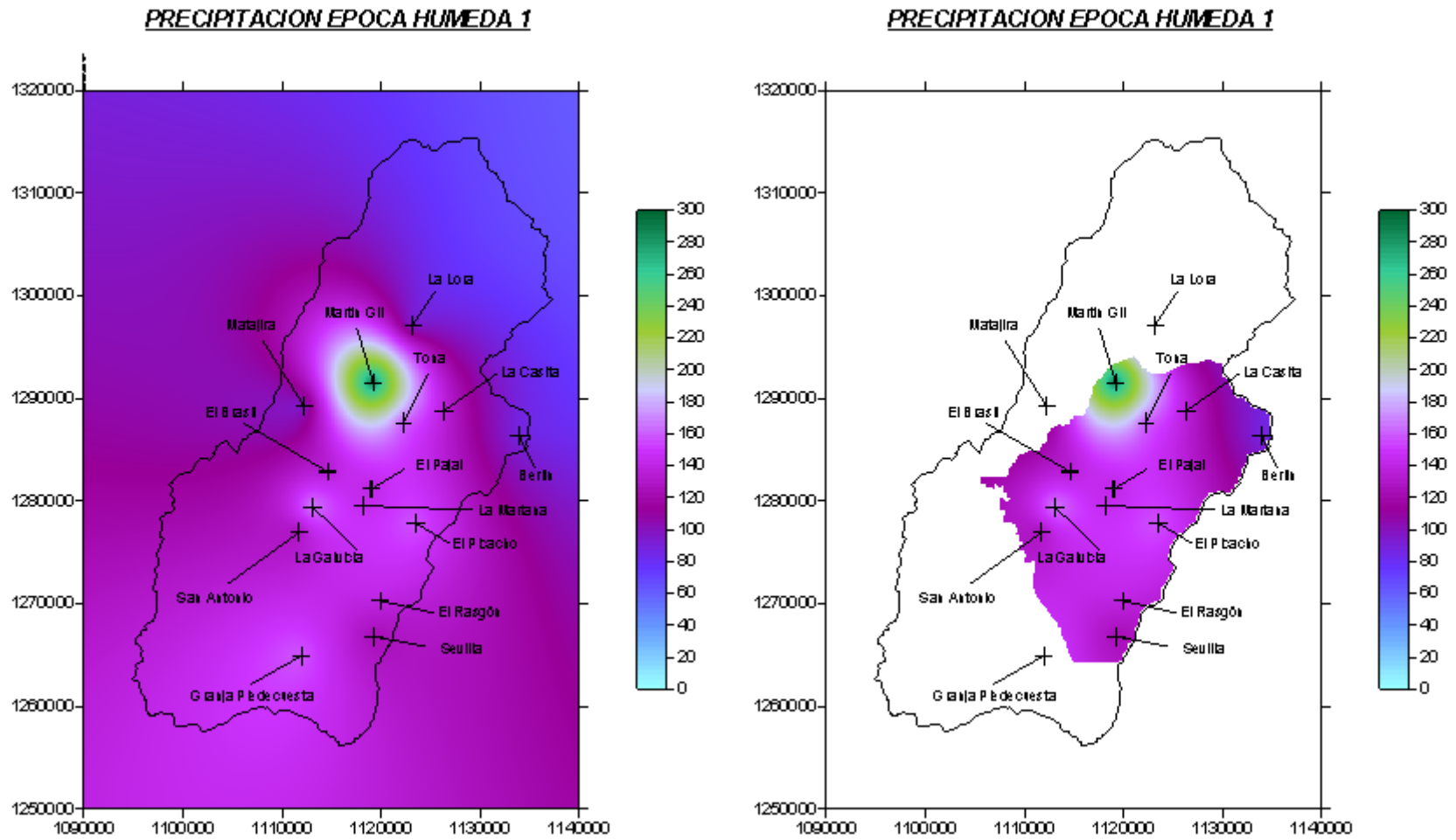


PRECIPITACION EPOCA SECA 1



Valores de precipitación en el área de estudio: 20 mm – 120 mm

Figura 23. Mapa de la precipitación en la época húmeda 1



Valores de precipitación en el área de estudio: 120 mm – 260 mm

Figura 24. Mapa de la precipitación en la época seca 2

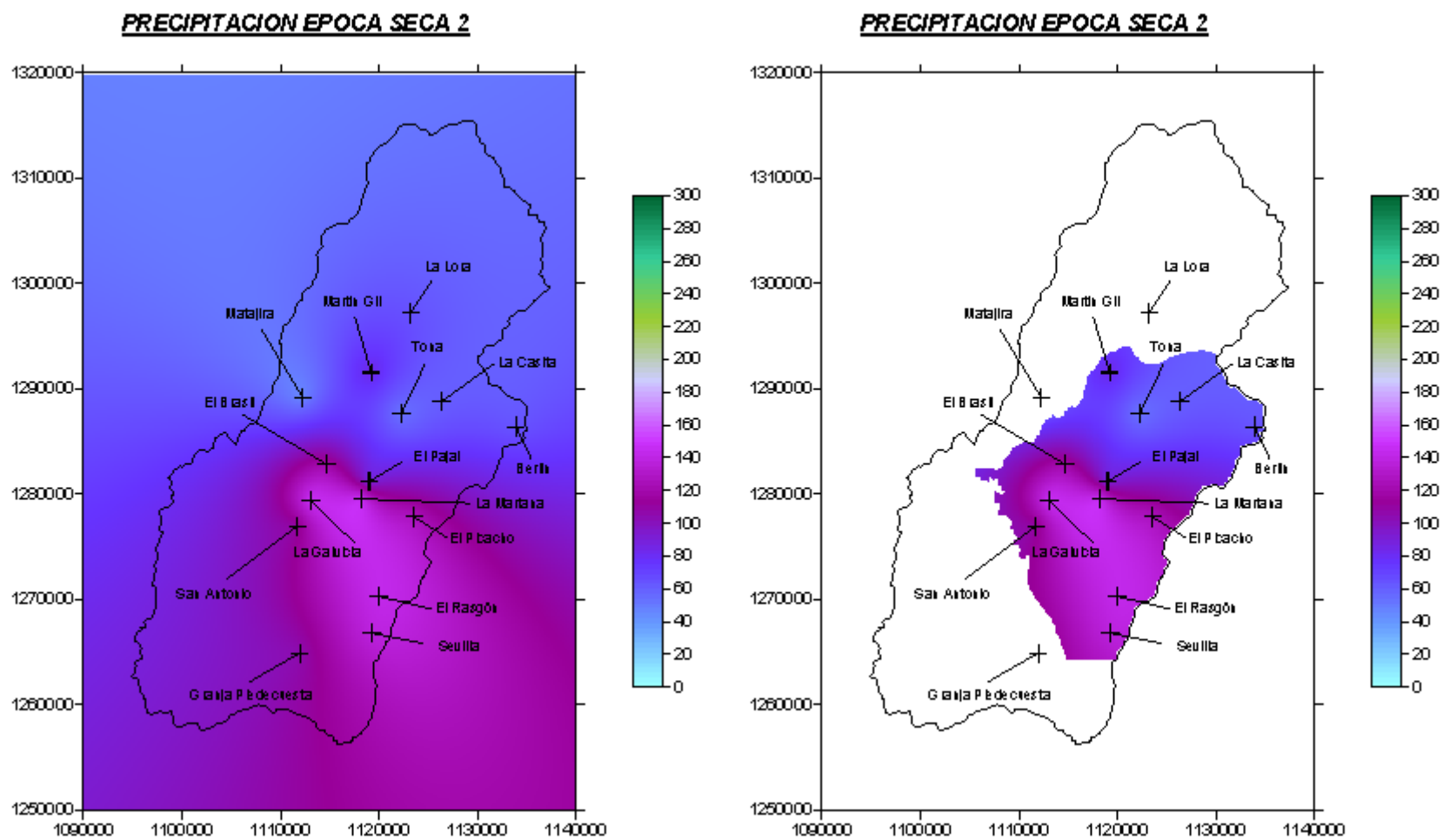
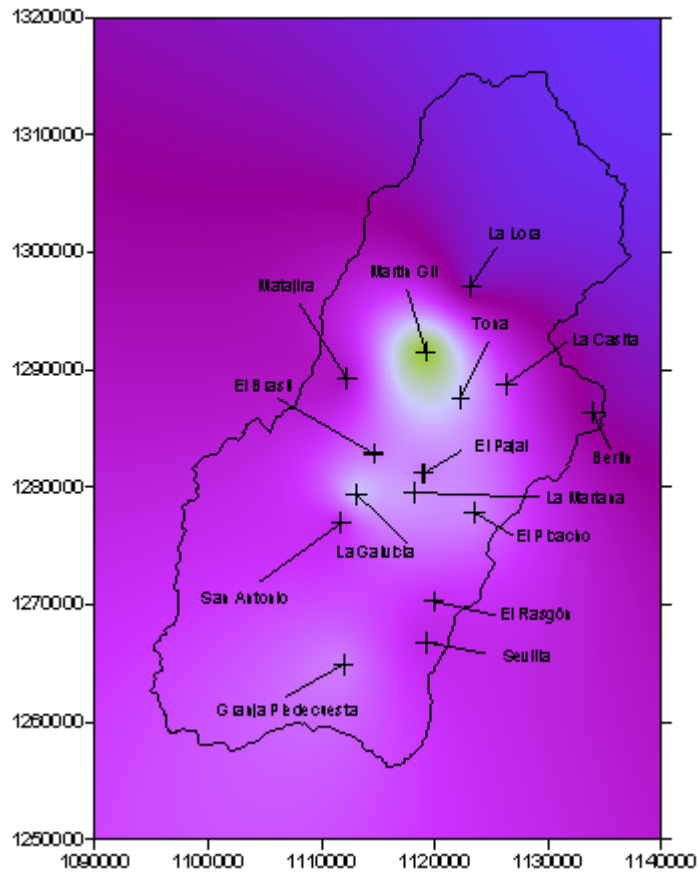
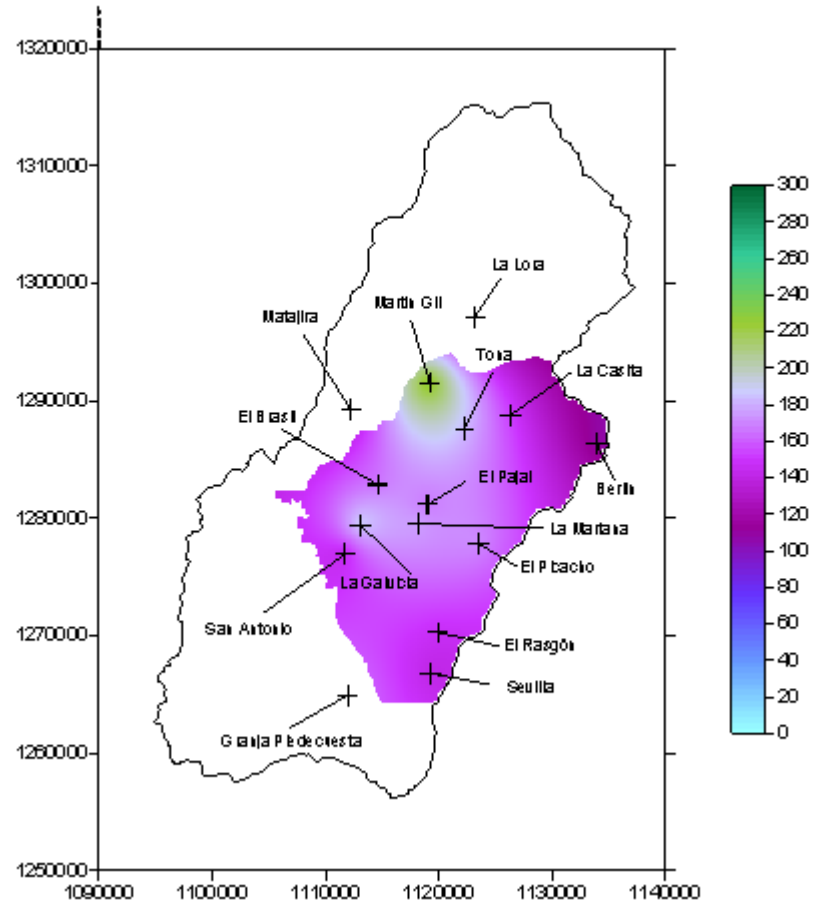


Figura 25. Mapa de la precipitación en la época húmeda 2

PRECIPITACION EPOCA HUMEDA 2



PRECIPITACION EPOCA HUMEDA 2



Valores de precipitación en el área de estudio: 120 mm – 220 mm

4.2 ESPACIALIZACIÓN DE LOS ISOTOPOS

Los datos isotópicos presentes en la precipitación corresponden a los obtenidos en las estaciones que estuvieron de la red de muestreo de isótopos estables (^2H y ^{18}O) implementada en la C.S.R.L. (Camacho – Guzmán, 2005) para el periodo comprendido entre el año 2004 – 2007.

Al igual que en la precipitación, para distribuir espacialmente los isótopos se utilizó el algoritmo de interpolación Kriging, debido a sus resultados bastante acertados en la espacialización de la precipitación.

4.2.1 MAPAS DE DESVIACION ISOTOPICA

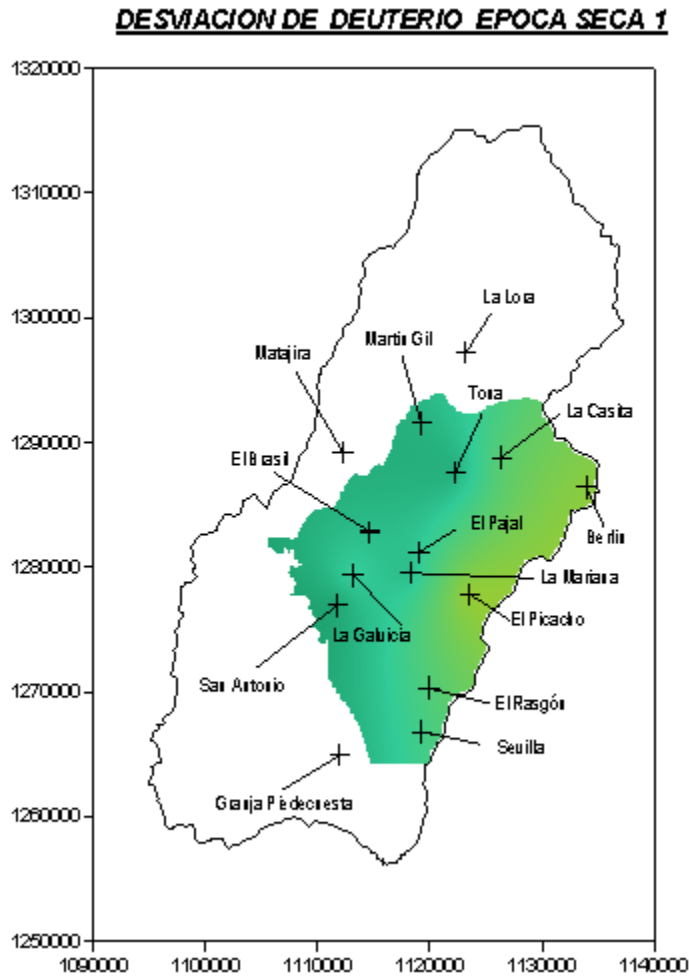
Los mapas de desviación isotópica de la lluvia en la cuenca superior del río Lebrija se elaboraron de manera similar a los mapas de precipitación, los cuales se presentaron en numerales anteriores y que se describen en el numeral 4.1.1, utilizando las coordenadas de cada estación y la desviación isotópica media mensual de cada época del ciclo anual.

En las figuras 24, 25, 26 y 27 se ven los mapas obtenidos de desviación isotópica promedio mensual de la precipitación para cada una de las épocas del año correspondientes al área de estudio. En los cuales se puede observar que la época seca 1 se presenta como la época de mayores concentraciones de isótopos pesados presentes en la lluvia, mostrando unos valores que van desde los -60‰ a los -20‰ para el deuterio y desde los -10‰ a los -4‰ para el oxígeno ^{18}O , a su vez la época que presenta la menor concentración de isótopos pesados en la precipitación cuyos valores oscilan entre -13‰ a -80‰ para el deuterio y -

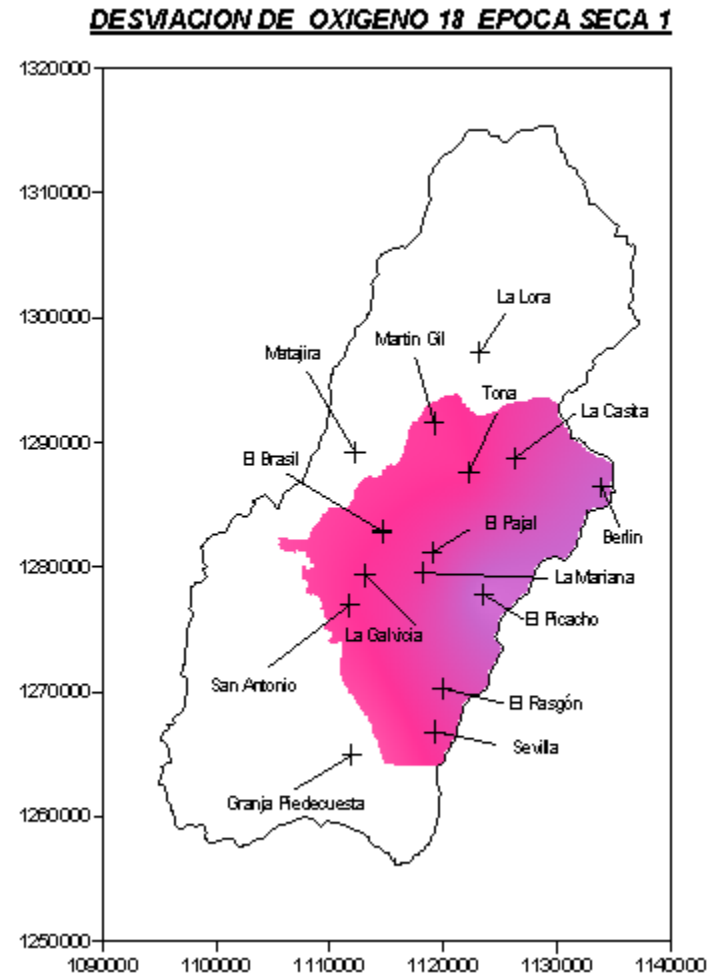
14‰ a -10‰ para el oxígeno 18 corresponde a la época húmeda 1 (la época que presenta lluvias empobrecidas en isótopos pesados corresponde a la época húmeda 1 cuyos valores oscilan entre -13‰ a -80‰ para el deuterio y -14‰ a -10‰ para el oxígeno 18.

Las épocas seca 2 y húmeda 2 presentan valores intermedios entre las épocas seca 1 y húmeda 1, evidenciándose aguas lluvias en la época seca 2 mas enriquecidas en isótopos pesados en comparación con las aguas lluvias en la época húmeda 2.

Figura 26. Mapas de desviación isotópica en la época seca 1



Rango de $\delta^2\text{H}$: -60‰ a -20‰



Rango de $\delta^{18}\text{O}$: -10‰ a -4‰

Figura 27. Mapas de desviación isotópica en la época húmeda 1

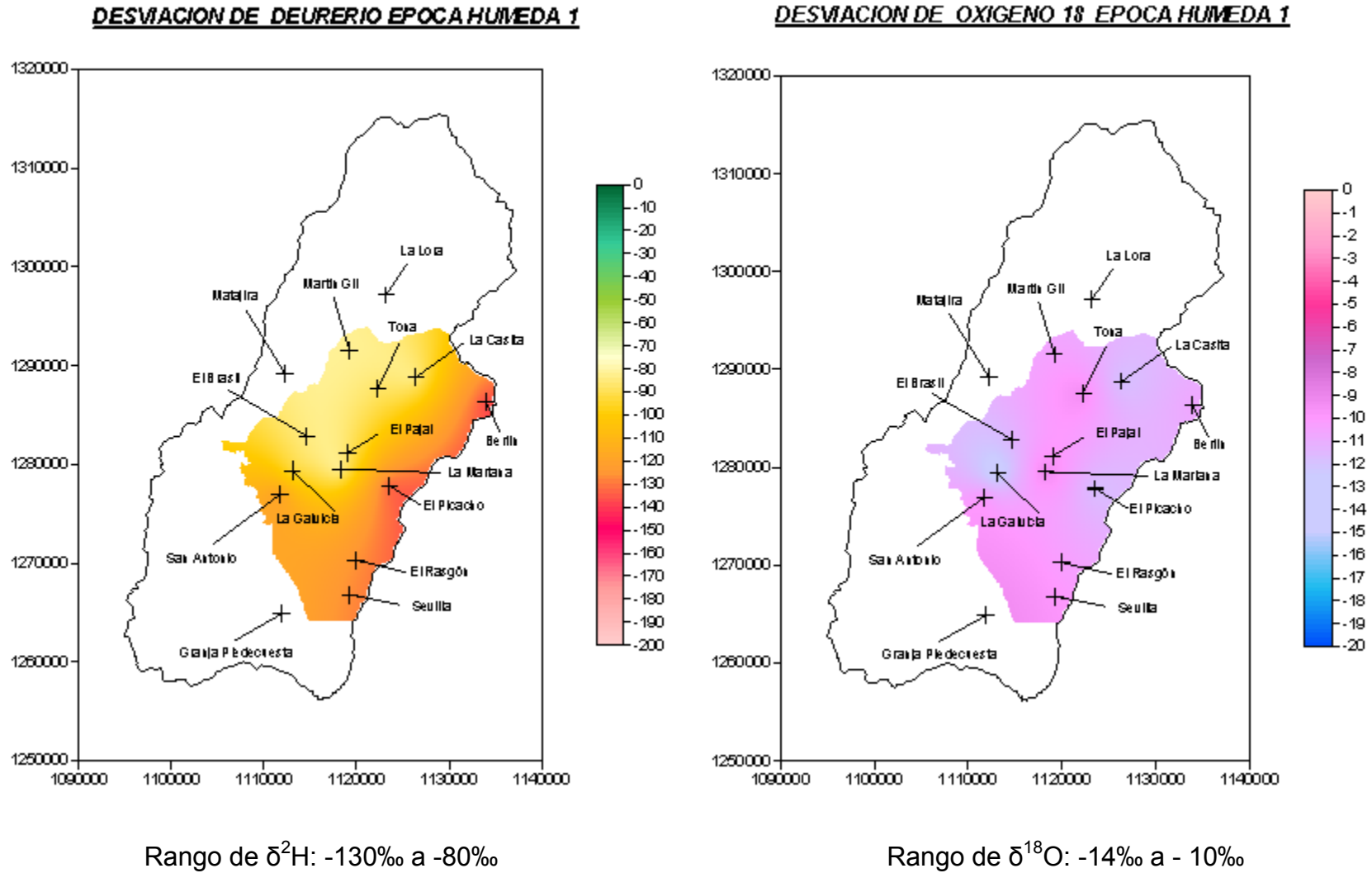


Figura 28. Mapas de desviación isotópica en la época seca 2

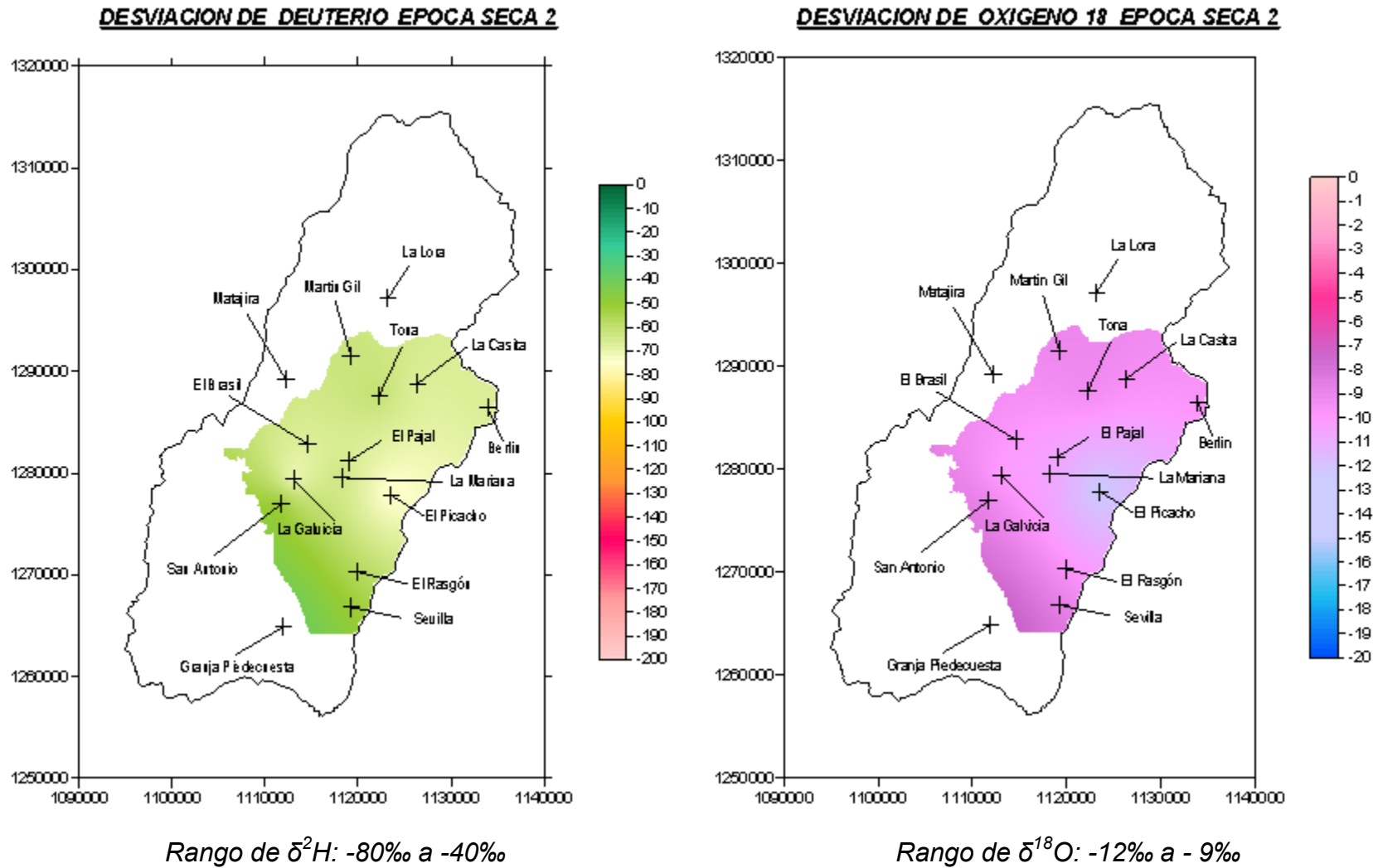
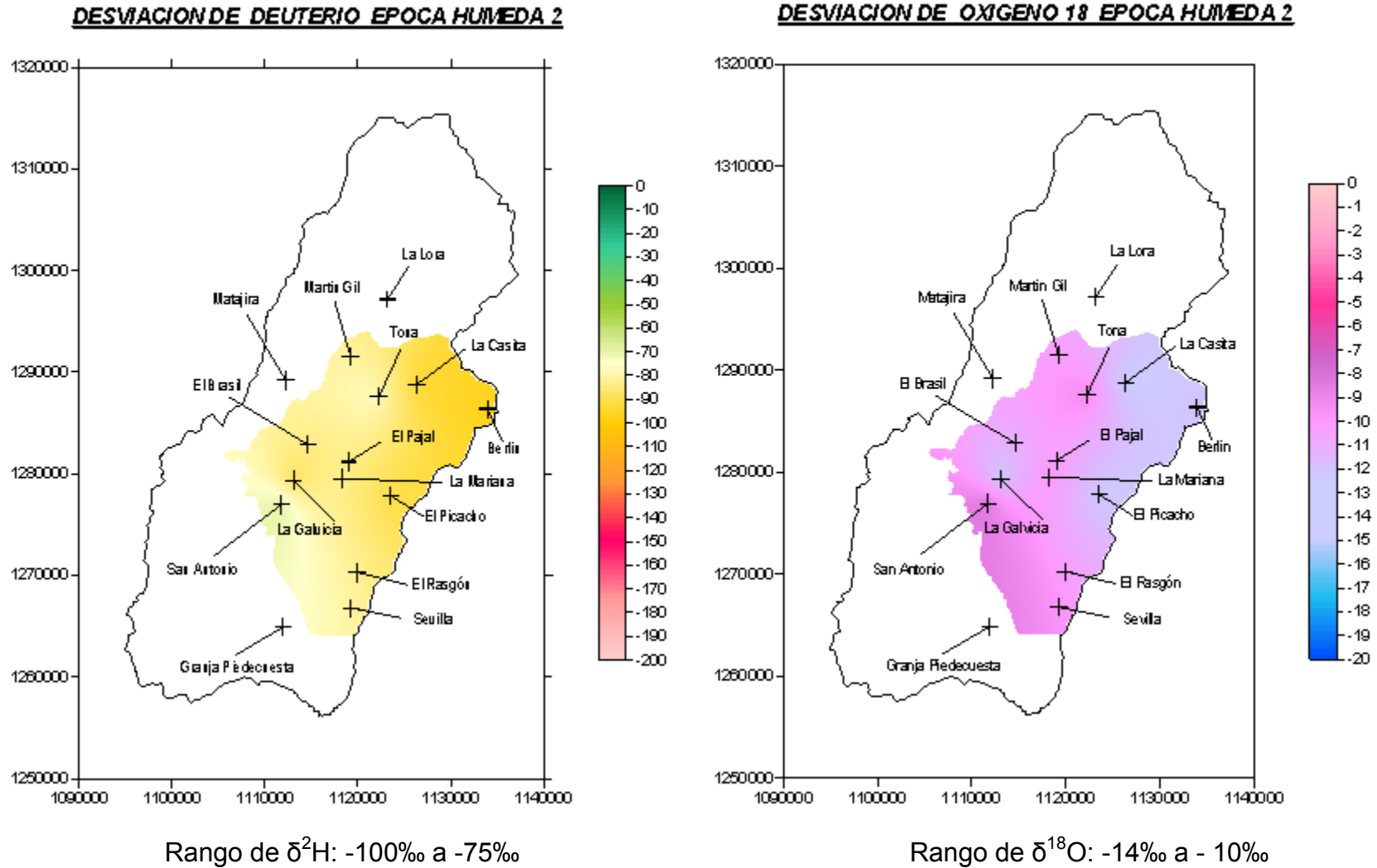


Figura 29. Mapas de desviación isotópica en la época seca 2



4.3 COMPONENTES A UTILIZAR EN LA SEPERACION DE FLUJO BASE MEDIANTE TECNICAS ISOTOPICAS.

La separación de flujo base, que se realizará en estudios posteriores mediante técnicas isotópicas requiere conocer las diversas componentes que conforman la expresión utilizada para tal fin y que está fundamentada en el contraste de la composición isotópica de los componentes del hidrograma. La ecuación se ilustra a continuación:

$$Q_T \delta_t = Q_s \delta_s + Q_0 \delta_0$$

Los datos isotópicos espacializados mediante método de interpolación de Kriging contenido en el software SURFER, luego fueron exportados a SPELL – MAP, programa con el cual se efectúan operaciones entre mapas y que permitieron obtener los promedios isotópicos y de cantidad de precipitación necesarios para estimar la componente isotópica, estos daros se encuentran consignados en las tablas 7 y 8; y el valor de la componente isotópica se encuentra representado en la expresión 2.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

Tabla 7. Desviaciones isotópicas promedio en cada época

Época	Desviación Isotópica prom.		Precipitación prom. (mm)
	² H ‰	¹⁸ O ‰	
Seca 1	-25.62	-5.41	52.04
Húmeda 1	-104.20	-10.68	144.39
Seca 2	-61.47	-9.84	100.99
Húmeda 2	-83.31	-10.69	159.84

Tabla 8. Desviaciones isotópicas promedio en el área de estudio

Desviación Isotópica promedio		Precipitación promedio(mm)
^2H ‰	^{18}O ‰	
-78.52	-9.90	114.32

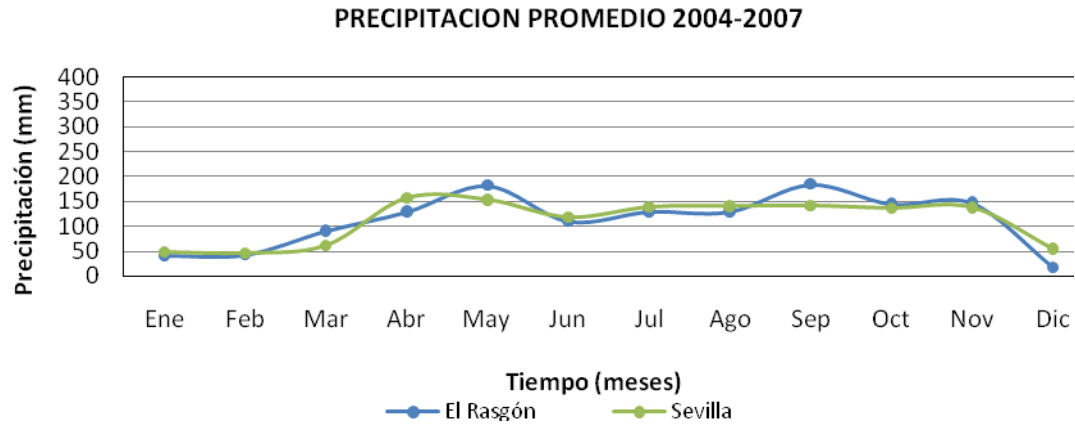
5. ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de la red pluviométrica y la red de muestro isotópico utilizadas en el presente estudio durante el periodo 2004-2007.

5.1 CICLO ANUAL DEL PERIODO 2004-2007

La parte alta de la C.S.R.L. presenta dos periodos secos y dos periodos húmedos como se había mencionado en el capítulo 3, observándose algunas de las estaciones de la zona de estudio localizada dentro de la parte alta de la cuenca no presentan la bimodalidad característica determinada por el paso de la zona de convergencia tropical, tal como lo muestra la figura 28. Las demás estaciones pluviométricas presentan la bimodalidad aproximada con algunas influencias correspondientes a la ocurrencia de fenómenos climáticos como el ENSO y los huracanes que se pueden observar en figura 10.

Figura 30. Estaciones con comportamiento no bimodal en la parte alta de la cuenca

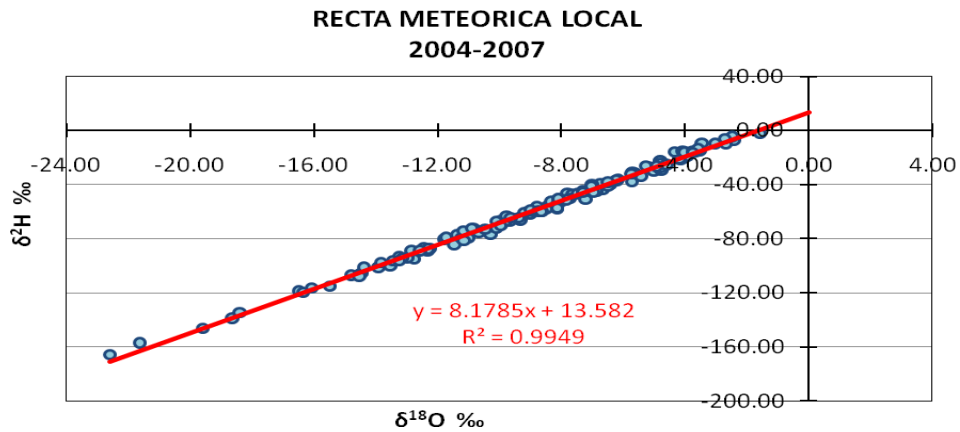


La precipitación promedio estacional obtenida para cada una de las estaciones de la red pluviométrica confirma la presencia de dos épocas secas y dos épocas húmedas en el periodo de análisis, observándose también que la época de mayor pluviosidad promedio es la época húmeda 2, la de menor pluviosidad promedio es la época seca 1 y la estación de mayor precipitación promedio en todas las épocas correspondiente al ciclo anual es la estación Galvicia como era de esperarse por encontrarse en la ubicación del óptimo pluviométrico en la cuenca. En la figura 11 se puede observar lo descrito.

5.2 RECTA METEÓRICA LOCAL

Para el periodo de análisis se obtuvo la expresión $\delta^2\text{H} = 8.1785 \cdot \delta^{18}\text{O} + 13.582$ como resultado de la correlación lineal de los datos de isotopos ^{18}O y ^2H presentes en el lluvia, esta expresión representa el comportamiento típico de las aguas lluvias precipitadas en el área de estudio y se le conoce como recta meteórica, la cual se puede observar en la figura 29. Esta recta evidencia un exceso de deuterio igual a 13.582.

Figura 31. Recta meteórica local preliminar



5.3 COMPONENTES PROMEDIO DE PRECIPITACIÓN Y ISOTOPOS

Al espacializar tanto la lluvia como su contenido isotópico se estimó el valor promedio de cada una de estas componentes de gran importancia para el área en estudio, cuyos valores se pueden observar en la tabla 10, los cuales representan los valores promedio de la precipitación y de la desviación isotópica para el periodo 2004-2007.

Figura 32. Promedio espacial y temporal de la precipitación y la desviación isotópica

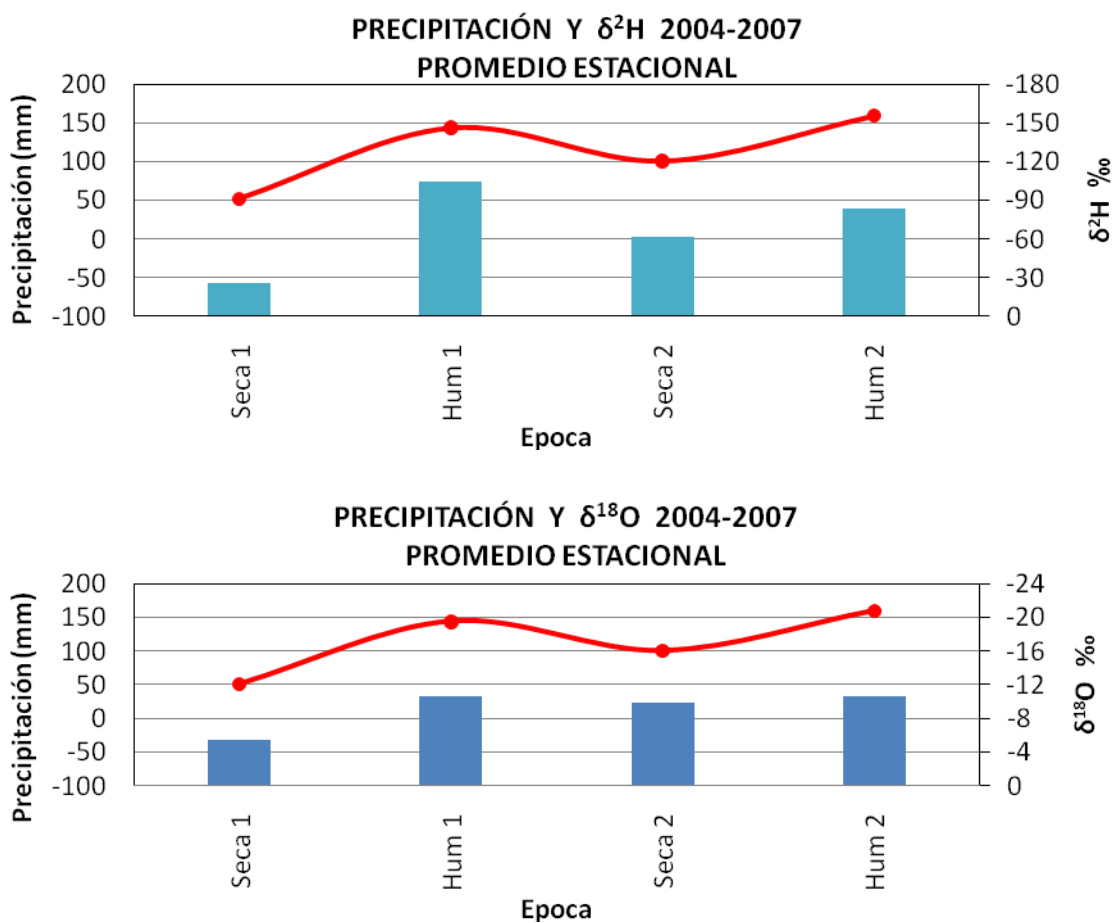


Tabla 9. Componentes promedio de la precipitación

Desviación Isotópica		Precipitación (mm)
2H (10^{-3})	O18 (10^{-3})	
-78.52	-9.90	114.32

5.4 DETERMINACION DE ZONAS DE RECARGA

La utilización de la correlación lineal entre las desviaciones isotópicas de ^2H u ^{18}O vs. Elevación, permitirá en estudio posteriores determinar las zonas de recarga de los acuíferos localizados en la zona metropolitana de la C.S.R.L., por lo cual en el presente estudio se obtuvieron las rectas que representan las variaciones de las desviaciones isotópicas en la lluvia con respecto a la elevación, las cuales se muestran en las figuras 20 y 21 del numeral 3.5.

6. CONCLUSIONES

- A partir de los datos de isotopos presentes en la lluvia, cuya medición se realizó entre los años 2004 – 2007, en la red de muestreo isotópico diseñada para la Cuenca, se analizaron los comportamientos mensuales y estacionales, identificándose comportamientos típicos en cuatro épocas del ciclo anual de la lluvia. Las épocas identificadas son: Época seca 1 que comprende los meses de diciembre, enero y febrero; época húmeda 1 que comprende los meses marzo, abril y mayo ; época seca 2 que tiene los meses de junio, julio y agosto; y por último la época húmedo 2 compuesta por los meses de septiembre, octubre y noviembre.
- El ciclo anual promedio de precipitación durante el periodo 2004 a 2007 de las estaciones pluviométricas utilizadas en el presente estudio presentan comportamientos aproximados a la bimodalidad de la lluvia en la Cuenca Superior del Rio Lebrija en casi todas las estaciones de lluvia analizadas (El Picacho, La Mariana, El Pajal, Berlin, La Lora, Matajira, El Brasil, La Galvicia, Martin Gil y Tona). Algunas estaciones como Granja Piedecuesta, San Antonio, El Rasgón y Sevilla, muestran un comportamiento menos definido. Vale la pena aclarar que en un periodo tan corto, el comportamiento bimodal no es fácilmente observable.
- El comportamiento isotópico típico de las agua lluvias durante el periodo 2004 a 2007 en el área de estudio está definido por la expresión $\delta^2\text{H} = 8.1785 \cdot \delta^{18}\text{O} + 13.582$, obtenida a partir de la información isotópica disponible y representativa tomada en la red de muestreo isotópico. Esta expresión puede ser considerada como la recta meteórica local definitiva de las aguas lluvias en la cuenca superior del rio Lebrija, y muy semejante a la Recta universal de Craig. La ecuación encontrada difiere a la de Craig especialmente en el valor de exceso de Deuterio.

- Se descubrió que las aguas lluvias que se presentaron en las épocas secas muestran una diferencia significativa en el contenido de isótopos pesados. Así, la época seca 1 presenta lluvias con mayor contenido de isótopos pesados del ^2H y ^{18}O si se le compara con la época seca 2, época en la que al igual que la época húmeda 2 se presentan contenidos similares de isótopos pesados, presentándose en esta última los mayores contenidos de isótopos pesados que tienen las épocas. Por último, se descubrió que la época húmeda 1 presenta contenidos de isótopos tanto pesados como livianos, haciendo pensar que posiblemente esta época se vio influenciada por algún tipo de fenómeno del cual se desconoce aun su procedencia.

7. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados arrojados por esta investigación se recomienda analizar, interpretar y explicar con fundamento ingenieril el pórque se presenta el exceso de Deuterio en la expresión hallada para la recta meteórica local, expresión que se encuentra consignada en el presente documento.

Para posteriores investigaciones se sugiere continuar con el muestreo isotópico de la lluvia que se presenta sobre la cuenca, y de esta forma descubrir la incidencia que tiene el fenómeno del niño sobre el contenido isotópico presente en ella.

Se hace necesario optimizar el proceso utilizado en la recolección de las muestras integrales que se toman en cada estación perteneciente a la red de muestreadotes y que serán utilizadas en posteriores estudios, con el animo de mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Se recomienda continuar con esta investigación y de esta forma encontrar resultados satisfactorios a cerca de las posibles zonas de recarga que se presentan en esta importante cuenca.

BIBLIOGRAFIA

Aparicio, F., Fundamentos de hidrología de superficie, Noriega editores Limusa. P 27 – 35.

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

Rozanski, c, Froehlich, K, Mook, W, 2002. Isotopos Ambientales en el ciclo Hidrológico, principios y aplicaciones. Sección I capitulo 10.

Maldonado, Velasco, W. 2005. Implementación de una metodología para el muestreo de isotopos estables y aplicación a la separación de flujo base. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 1. Información isotópica utilizada

Año	Mes	La Casita		Berlín-Col		Piedecuesta		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	Oct	-100.39	-13.54	-105.62	-14.47	-73.64	-10.83	-79.46	-11.25	-87.41	-12.25	-97.83	-13.84	-101.35	-14.40	-89.09	-12.58
	Nov	-61.06	-9.09	-93.18	-12.88	-51.15	-8.11	-52.49	-8.13	-62.08	-9.02	-63.56	-9.78	-72.48	-10.90	-50.68	-8.10
	Dic	-25.49	-4.66	-36.02	-6.17	-19.26	-4.15	-16.40	-3.82	-19.13	-3.94	-22.62	-4.81	-40.04	-7.02	-16.25	-4.04
2005	Ene	-37.46	-6.20	-30.35	-5.03	-7.15	-2.43	-16.16	-3.68	-16.43	-4.00	-22.76	-4.82	-44.99	-7.32	-26.73	-4.94
	Feb	-17.82	-3.97	-56.92	-8.23	-21.91	-4.15	-9.74	-3.03	-9.66	-3.47	-15.92	-4.35	-59.98	-8.64	-15.48	-3.76
	Mar			-13.84	-3.58	-2.50	-1.59	-4.60	-2.49	-6.17	-2.73	-15.27	-4.09	-38.43	-6.50	-25.31	-4.61
	Abr	-60.55	-9.09	-72.33	-10.11	-50.59	-7.73	-47.66	-7.29	-52.64	-8.34	-64.65	-9.38	-88.56	-12.33	-57.44	-8.15
	May	-107.26	-14.81	-106.50	-14.54	-95.13	-12.77	-94.31	-12.99	-93.13	-13.26	-94.53	-13.15	-107.96	-14.55	-96.57	-13.25
	Jun	-77.09	-10.30	-89.56	-12.33	-58.08	-8.15	-58.33	-8.51	-69.58	-9.93	-75.78	-10.68	-87.86	-12.32	-81.61	-11.17
	Jul	-52.09	-7.96	-60.46	-9.05	-38.16	-5.72	-45.13	-6.86	-45.75	-6.98	-59.74	-8.92	-67.40	-10.12	-51.15	-7.24
	Ago	-79.73	-11.40	-80.55	-11.80	-33.86	-5.44	-41.16	-6.50	-54.66	-8.12	-56.30	-8.79	-72.68	-10.86	-60.07	-8.66
	Sep	-46.62	-7.82	-56.55	-8.47	-40.18	-6.43	-32.09	-5.75	-36.62	-6.22	-39.26	-6.74			-45.84	-7.32
	Oct																
	Nov																
	Dic																

Continua Tabla 1. Información isotópica utilizada

Año	Mes	La Casita		Berlín-Col		Piedecuesta		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	-27.94	-5.06	-31.90	-5.62			-10.09	-2.69			-27.82	-4.81	-41.36	-7.05	-16.73	-3.76
	Abr	-40.97	-6.86	-47.37	-7.67	-29.55	-4.78	-115.55	-15.49	-15.11	-3.54	-51.52	-7.86	-58.92	-9.00	-59.75	-8.76
	May			-165.89	-22.60	-139.20	-18.66	-146.58	-19.61	-46.85	-7.47	-119.05	-16.49	-157.31	-21.64	-135.04	-18.42
	Jun	-44.03	-6.68					-101.37	-13.93	116.69	-16.09	-96.54	-13.46	-119.98	-16.37		
	Jul																
	Ago	-79.56	-11.01	-57.17	-5.88			-66.40	-9.34	-67.46	-9.69	-73.28	-10.47	-89.10	-12.86	-70.70	-9.97
	Sep																
	Oct	-84.59	-11.48	-86.72	-12.47			-59.70	-8.91	-60.08	-9.00	-67.08	-9.79	-79.36	-11.73	-64.75	-9.65
	Nov																
	Dic	-61.23	-9.07	-77.40	-11.37			-67.03	-9.97	-65.38	-9.76	-60.87	-9.19	-74.57	-11.18	-50.24	-8.10
2007	Ene																
	Feb	-27.49	-5.19	-30.98	-5.70			-20.17	-4.03	-20.88	-4.19	-24.59	-4.81	-26.56	-5.28	-13.66	-3.59

ANEXO 2

Tabla 2. Información de precipitación utilizada

Año	Mes	Berlin	El Brasil	El Picacho	El Pajal	El Rasgón	Granja Piedecuesta	La Galvicia	La Lora	La Mariana	Martin Gil	MataJira	San Antonio	Sevilla	Tona
2004	Ene	21.3	99.9	36.0	90.0	31.6	36.2	143.0	32.6	80.4	76.1	74.2	95.4	70.0	89.0
	Feb	5.2	26.6	19.0	21.2	25.5	111.8	93.0	17.9	37.1	40.6	62.1	23.6	61.9	39.0
	Mar	26.4	72.9	30.0	43.6	52.7	193.7	102.0	30.1	54.7	136.3	14.5	99.5	50.3	46.0
	Abr	88.9	131.7	155.0	244.5	159.0	158.5	195.0	104.8	74.2	327.7	69.9	131.3	179.1	216.0
	May	104.2	135.4	122.0	140.0	125.3	151.2	198.0	92.3	162.8	177.1	86.0	130.1	160.9	132.0
	Jun	56.2	80.3	54.0	26.9	58.4	36.5	96.0	38.8	61.3	26.8	26.6	64.8	111.8	10.0
	Jul	37.4	93.3	49.0	26.7	99.1	85.4	197.0	19.0	126.4	20.9	13.6	145.2	82.9	17.0
	Ago	46.1	26.4	69.0	80.1	33.5	65.3	91.0	42.5	118.1	61.2	41.5	72.7	123.7	28.0
	Sep	156.1	145.4	272.0	144.1	224.1	122.7	175.0	111.0	183.0	130.7	96.3	119.1	175.4	218.0
	Oct	108.4	132.9	171.0	172.7	167.3	261.9	220.0	100.5	183.5	276.8	124.8	182.2	41.5	239.0
	Nov	61.0	249.8	180.0	228.7	183.8	195.8	263.0	113.0	177.8	346.3	172.3	211.9	118.0	236.0
	Dic	12.9	64.0	50.0	70.9	30.2	79.6	51.0	37.4	77.8	107.5	20.5	48.4	50.5	41.3
2005	Ene	23.0	155.4	91.0	86.2	81.6	135.2	161.0	14.0	78.3	103.9	73.3	73.8	80.7	137.0
	Feb	28.3	148.6	37.0	120.7	102.2	330.8	219.0	19.6	82.9	86.4	91.8	205.3	98.5	116.0
	Mar	26.6	20.5	16.9	10.4	18.7	19.3	15.0	11.2	13.9	19.2	5.6	11.3	9.4	16.4
	Abr	34.9	119.5	123.0	56.6	92.8	69.3	167.0	102.7	112.5	104.6	86.1	97.6	154.8	99.0
	May	134.9	140.2	243.0	231.2	187.7	242.1	191.0	120.5	191.2	311.0	105.3	134.5	159.3	309.0
	Jun	107.0	142.5	181.0	124.8	179.1	180.0	196.0	101.3	149.9	130.5	65.0	113.6	176.0	119.0
	Jul	39.0	96.6	114.0	107.4	166.8	69.9	184.0	63.0	169.4	37.0	28.9	81.3	148.1	68.0
	Ago	40.2	79.0	106.7	88.7	121.7	81.8	211.0	75.0	162.8	89.4	76.3	110.5	121.1	54.0
	Sep	62.7	186.2	150.0	105.4	173.2	132.2	233.0	67.4	108.2	112.0	67.7	175.1	132.6	80.0
	Oct	145.9	155.2	200.0	190.2	159.6	156.4	217.0	133.5	222.4	219.4	122.9	149.8	198.5	291.0

Año	Mes	Berlin	El Brasil	El Picacho	El Pajal	El Rasgón	Granja Piedecuesta	La Galvicia	La Lora	La Mariana	Martin Gil	MataJira	San Antonio	Sevilla	Tona
2005	Nov	119.1	169.8	162.0	229.5	173.5	117.4	204.0	133.6	204.7	299.6	137.8	154.7	191.0	284.0
	Dic	10.5	34.0	12.0	12.0	13.5	50.8	55.0	49.0	8.6	51.6	25.0	22.8	29.0	15.0
2006	Ene	19.4	37.1	42.0	19.3	35.3	91.6	123.0	5.4	62.1	56.8	46.7	97.5	31.0	69.0
	Feb	27.4	119.8	54.0	18.4	24.8	73.1	147.0	5.0	16.0	32.1	20.2	116.6	14.7	27.0
	Mar	56.0	114.9	168.0	93.9	253.5	142.6	162.2	92.7	65.4	111.7	105.6	154.7	156.9	173.0
	Abr	117.2	219.1	189.0	206.7	229.2	106.4	208.9	102.5	222.7	245.7	181.6	151.7	187.8	270.0
	May	180.6	154.7	261.9	144.0	212.5	200.2	216.8	125.5	201.7	144.8	138.9	176.5	170.9	241.0
	Jun	59.1	93.3	101.4	95.1	155.2	195.8	118.5	90.2	154.6	125.8	39.5	123.7	113.4	38.7
	Jul	54.7	105.1	101.7	62.7	146.4	67.1	140.3	88.5	140.8	31.2	12.8	174.0	124.6	28.3
	Ago	55.3	98.3	157.4	123.3	161.1	114.8	151.9	35.4	175.3	82.6	72.1	157.5	103.8	69.8
	Sep	72.6	88.2	119.7	97.9	163.5	125.9	113.4	72.2	121.6	150.1	47.4	106.4	107.8	149.0
	Oct	164.5	196.8	160.7	165.4	149.0	236.9	160.9	106.4	129.5	295.5	178.4	146.9	153.0	164.1
	Nov	86.0	201.8	75.0	142.4	133.2	174.4	212.0	84.8	166.6	322.9	143.1	184.0	115.6	177.8
	Dic	18.7	29.0	37.7	70.8	15.0	33.2	8.7	42.6	48.3	102.5	21.2	7.0	90.3	41.7
2007	Ene	13.9	57.0	5.2	47.5	15.1	138.9	77.6	5.0	36.8	100.2	37.8	70.2	16.3	74.6
	Feb	3.1	7.4	12.1	7.1	15.6	107.5	64.5	5.0	11.2	51.0	4.7	13.4	15.7	7.1
	Mar	66.0	129.4	93.1	82.1	36.7	267.3	163.7	71.2	151.0	304.5	100.7	137.6	34.1	107.0
	Abr	38.6	158.8	191.9	227.3	34.9	132.7	168.6	97.1	225.3	345.9	158.1	182.4	105.0	135.9
	May	112.9	214.0	222.1	154.9	201.2	221.5	227.3	137.7	182.8	214.3	94.6	132.0	122.2	112.6
	Jun	62.1	67.5	113.7	54.7	47.6	69.6	85.0	54.2	63.0	32.2	17.3	85.6	73.0	18.0
	Jul	36.4	110.5	128.7	45.1	105.5	155.4	101.0	57.0	228.7	61.8	59.7	82.0	199.7	13.4
	Ago	140.9	160.4	283.0	216.8	201.6	124.7	185.4	105.0	201.1	164.9	76.6	89.7	214.4	160.2
	Sep	107.8	103.1	268.5	157.0	175.4	97.9	88.8	99.0	205.5	128.7	47.8	81.4	151.1	63.5
	Oct	132.0	259.3	216.8	232.1	103.4	281.6	254.4	123.0	274.4	299.9	243.0	156.8	154.2	259.4
	Nov	56.0	104.4	84.8	118.9	96.4	129.2	120.8	36.2	141.3	191.4	67.2	71.4	127.6	76.7
	Dic	12.2	50.3	17.2	58.0	10.9	53.8	40.2	24.3	38.6	125.0	10.9	38.4	54.2	41.1