

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE
ISÓTOPOS ESTABLES Y APLICACIÓN A LA SEPARACIÓN DE FLUJO BASE**

**JOSÉ LUIS MALDONADO SARMIENTO
WILFER ALFREDO VELASCO MARTÍNEZ**

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

2005

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE
ISÓTOPOS ESTABLES Y APLICACIÓN A LA SEPARACIÓN DE FLUJO BASE**

**JOSÉ LUIS MALDONADO SARMIENTO
WILFER ALFREDO VELASCO MARTÍNEZ**

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director
SULLY GOMEZ ISIDRO
Ing.Civil, Msc. PhD**

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

2005

A Dios, por brindarme fortaleza y sabiduría para salir adelante
A mis padres, por darme la oportunidad de realizar mis sueños
A Tata y Harvi, por apoyarme en todo lo que me he propuesto

JOSE LUIS

A mis padres por su apoyo y paciencia
A mis hermanos y familia por su confianza
Y a los vagos de mis amigos por su compañía

WILFER ALFREDO

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora de proyecto, la doctora Sully Gómez Isidro, por su dedicación, apoyo y confianza.

Al Ing. Msc. Jorge Alberto Guzmán, por sus aportes y su colaboración oportuna.

Al profesor Stefan Uhlenbrook del Instituto hidrológico, de la Universidad de Freiburg, en Freiburg Alemania, por su colaboración desinteresada e invaluable para la culminación de este proyecto.

A la Ing. Yolanda Otero del acueducto de Piedecuesta por la colaboración prestada en la toma de muestras de la estación del Conquistador.

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

A las entidades: IDEAM, CDMB las cuales nos suministraron datos de sus estaciones de medición de niveles y precipitación.

Al OIEA, organismo que apoya este tipo de proyectos.

A los encargados de cada una de las estaciones.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	20
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	22
1.1 ISÓTOPOS.....	22
1.2 ISÓTOPOS ESTABLES	23
1.2.1 Isótopos estables del Hidrógeno.....	23
1.2.2 Isótopos estables del Oxígeno.....	24
1.2.3 Isótopos estables en el ciclo hidrológico.....	24
1.2.4 Fraccionamiento Isotópico.....	25
1.2.5 Desviación isotópica de Oxígeno 18 y Deuterio	25
1.2.6 Principales aplicaciones de los isótopos estables	26
1.3 ISÓTOPOS INESTABLES.....	27
1.3.1 ^3H (Tritio).....	27
1.3.2 ^{14}C (Radiocarbono).....	28
1.3.3 ^{36}CL (Cloruro-36).....	29
1.4 ISÓTOPOS EN LOS RÍOS.....	29
1.5 COMPONENTES DEL HIDROGRAMA.....	31
1.5.1 Escorrentía superficial.....	32
1.5.2 Flujo lento	32
1.5.3 Flujo rápido	32
1.5.4 Flujo base.....	32
1.6 MÉTODOS DE SEPARACIÓN DEL HIDROGRAMA	32
1.6.1 Métodos gráficos.....	34

1.6.2	Métodos de intervalo.....	35
1.6.3	Métodos de algoritmos.....	37
1.7	MÉTODO DE SEPARACIÓN DEL HIDROGRAMA UTILIZANDO ISÓTOPOS ESTABLES.....	39
1.7.1	Principios y suposiciones.....	39
1.7.2	Determinación de las concentraciones de los componentes del hidrograma.....	39
1.7.3	Determinación de la desviación isotópicas.....	41
1.7.4	Separación de dos componentes.....	41
1.7.5	Separación de tres componentes.....	43
1.7.6	Dificultades que presenta el método isotópico.....	45
1.8	COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE SEPARACIÓN.....	46
2.	PROTOCOLO DE MUESTREO DE ISÓTOPOS ESTABLES EN EL FLUJO BASE.....	48
2.1	PREPARATIVOS PARA EL MUESTREO.....	48
2.1.1	Responsabilidad del personal de campo.....	48
2.1.2	Responsabilidad del equipo de estudio.....	49
2.1.3	Revisión de la información existente.....	50
2.1.4	Selección de los sitios de muestro.....	50
2.1.5	Localización física del sitio de muestreo.....	52
2.1.6	Preparación para el viaje a campo.....	53
2.2	SELECCIÓN DEL EQUIPO Y ENVASES PARA EL MUESTREO.....	59
2.2.1	Equipo.....	59
2.2.2	Equipo de muestreo según las condiciones físicas del sitio.....	60
2.2.3	Envase para la recolección y envío de la muestra.....	62

2.3	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	62
2.4	SEGURIDAD DEL PERSONAL DE CAMPO.....	65
3.	TOMA DE MUESTRAS EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA.....	67
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA	67
3.1.1	División Política.....	68
3.1.2	División de la cuenca en subcuencas.....	70
3.1.3	Ubicación de los sitios de muestreo.	72
3.2	DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO	74
3.2.1	Café Madrid (río Lebrija).....	74
3.2.2	El Conquistador (río de Oro).....	76
3.2.3	La Esperanza (río Frío).....	78
3.2.4	Majadas (río Suratá).	79
3.3	DETERMINACIÓN DE LAS MUESTRAS A ANALIZAR Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS	81
4.	PREPARATIVOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL HIDROGRAMA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA.....	84
4.1	MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ISOTÓPICA DE LA PRECIPITACIÓN.....	84
4.2	MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ISOTÓPICA DE LA ESCORRENTÍA TOTAL	85
4.3	MEDICIÓN DE LA ESCORRENTÍA TOTAL.....	86
4.3.1	Ubicación De Las Estaciones Automáticas.	86
4.3.2	Diseño De La Estación Automática	89
5.	APLICACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL HIDROGRAMA	95
5.1	SUBCUENCA CENTRAL DE KENTUCKY.....	95

5.1.1	Análisis de los datos.....	95
5.1.2	Separación del hidrograma por medio de isótopos estables.....	96
5.1.3	Separación Del Hidrograma Por medio del Método de Algoritmo de un parámetro.....	99
5.2	CUENCA DE BRUGGA.....	102
5.2.1	Análisis De Los Datos De Concentración Isotópica.....	102
5.2.2	Separación Del Hidrograma Por Medio De Isótopos Estables.....	105
5.2.3	Separación Del Hidrograma Por medio del Método de Algoritmo de un parámetro.....	110
5.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	116
6.	CONCLUSIONES.....	120
7.	RECOMENDACIONES.....	122
	BIBLIOGRAFÍA.....	123
	ANEXOS.....	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Abundancia Relativa de Isótopos de Hidrogeno, Oxigeno y Carbón en el Ciclo Hidrológico	23
Tabla 2. Abundancia Natural de los Isótopos Estables Usados en los Estudios de Ríos.	29
Tabla 3. Actividades Específicas Típicas de los Isótopos Radioactivos en Estudios de Ríos.	30
Tabla 4. Formato de Archivo del sitio de muestreo río.....	54
Tabla 5. Cartera de campo, hoja 1	57
Tabla 6. Cartera de campo, hoja 2.....	58
Tabla 7. Subcuencas de la Cuenca Superior del Río Lebrija.....	70
Tabla 8. Información general de los sitios de muestreo	72
Tabla 9. Información general de las estaciones.....	72
Tabla 10. Valores de los parámetros químicos promedio	82
Tabla 11. Presupuesto de la estación automática.....	94
Tabla 12. Datos respecto al tiempo de la concentración de los trazadores y del hidrograma.	96
Tabla 13. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico.....	97
Tabla 14. Separación del hidrograma en tres componentes, método isotópico.....	98
Tabla 15. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo.....	101
Tabla 16. Datos respecto al tiempo de la concentración isotópica y del hidrograma.....	102
Tabla 17. Concentraciones isotópicas de precipitación y flujo base	105
Tabla 18. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico.....	105
Tabla 19. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo.....	111

Tabla 20. Volumen de los dos componentes del hidrograma, Método Isotópico.....	116
Tabla 21. Volumen de los tres componentes del hidrograma, Método Isotópico.....	117
Tabla 22. Volumen del flujo base por el método de isótopos y de algoritmo.	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del hidrograma	31
Figura 2. Métodos gráficos de separación de flujo base	34
Figura 3. Métodos de intervalo aplicado a French Creek en Phoenixville.....	36
Figura 4. Separación del hidrograma para un sistema de dos componentes usando $\delta^{18}\text{O}$	43
Figura 5. Separación del hidrograma para un sistema de tres componentes usando $\delta^{18}\text{O}$ y sílice disuelto (Si).	44
Figura 6. Equipo de muestreo.	59
Figura 7. Toma de la muestra desde un puente.....	60
Figura 8. Toma de la muestra desde un bote.....	61
Figura 9. Toma de la muestra directamente.....	61
Figura 10. Etiqueta del envase para el muestreo.....	64
Figura 11. Localización geográfica de la Cuenca Superior del Río Lebrija.....	69
Figura 12. Subcuencas de la Cuenca Superior del Río Lebrija.....	71
Figura 13. Ubicación de los sitios de muestreo.....	73
Figura 14. Plano general N° 1 de la estación	90
Figura 15. Plano general N° 2 de la estación	91
Figura 16. Plano de detalles de la tapa	91
Figura 17. Plano de detalles del anclaje.....	92
Figura 18. Plano de detalles de la entrada de agua a la estación.....	92
Figura 19. Plano de detalles de la ventana de limpieza	93
Figura 20. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico.....	97

Figura 21. Separación del hidrograma en tres componentes, método isotópico	99
Figura 22. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo.....	101
Figura 23. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico.....	109
Figura 24. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo.....	115
Figura 25. Comparación de los métodos de separación del hidrograma, Kentucky	118
Figura 26. Comparación de los métodos de separación del hidrograma, Brugga	119

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Ubicación del sitio de muestreo, Café Madrid.....	74
Foto 2. Ubicación del sitio de muestreo después del 12/02/2005, Café Madrid	75
Foto 3. Estación limnimetrica después del 12/02/2005, Café Madrid	76
Foto 4. Ubicación del sitio de muestreo, río de Oro	77
Foto 5. Estación Limnimetrica (mira), El Conquistador	77
Foto 6. Ubicación del sitio de muestreo, La Esperanza.	78
Foto 7. Estación limnimetrica (mira), La Esperanza.....	79
Foto 8. Ubicación del sitio de muestreo, Majadas.....	79
Foto 9. Estación limnimetrica (mira), Majadas	80
Foto 10. Sonda múltiparametros ELJKELKAMP.....	81
Foto 11. Sitio de instalación de la estación automática, río de Oro	87
Foto 12. Sitio de instalación de la estación automática, río Frío	88
Foto 13. Sitio de instalación de la estación automática, río Suratá.....	89

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	128
ANEXO B	137

RESUMEN

TITULO:

IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE ISÓTOPOS ESTABLES Y APLICACIÓN A LA SEPARACIÓN DE FLUJO BASE*

AUTORES:

José Luis Maldonado Sarmiento
Wilfer Alfredo Velasco Martínez**

PALABRAS CLAVES:

Isótopos, hidrograma, flujo base, separación hidrograma, estaciones, río Lebrija, muestreo isótopos.

DESCRIPCION:

En el presente proyecto se realizó e implemento un protocolo de muestreo de isótopos estables en el flujo base, al igual que una aplicación del método de separación del flujo base por medio de isótopos estables. Este proyecto empieza con una revisión de los principales isótopos y sus posibles aplicaciones, las cuales van desde la localización de las zonas de recarga hasta la separación del flujo base. Se definen las técnicas fundamentales de separación del flujo base incluyendo el método de separación por medio de isótopos estables, también se realizó e implementó un protocolo de muestreo de isótopos estables en el flujo base, con el fin de establecer el comportamiento de la concentración isotópica para cada mes, sobre cuatro estaciones ubicadas en la cuenca superior del río Lebrija.

Se realizaron los preparativos necesarios para la implementación de la separación de los componentes del hidrograma en la cuenca superior del río Lebrija, para poder saber con claridad con que recursos de agua subterránea contamos y su respectiva sostenibilidad. Además se aplicó el método de separación del flujo base por medio de isótopos estables, para dos cuencas fuera de Colombia, ya que actualmente en nuestro país, no se cuentan con los datos necesarios para realizar la separación del flujo base por este método. También se realizó la comparación entre los métodos tradicionales con el método isotópico, encontrando que los métodos tradicionales asumen a menudo que el flujo base varia ligeramente, mientras que el método isotópico demuestra que el comportamiento del flujo base es similar al del hidrograma, concluyendo así que los métodos tradicionales subestiman el flujo base en comparación con el método isotópico.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de ingeniería Civil, Director:
GÓMEZ ISIDRO, Sully

ABSTRACT

TITLE:

IMPLEMENTATION OF A METHODOLOGY FOR THE SAMPLING OF STABLE ISOTOPES AND APPLICATION TO THE SEPARATION OF BASE FLOW*

AUTHORS:

José Luis Maldonado Sarmiento
Wilfer Alfredo Velasco Martínez**

KEY WORDS:

Isotopes, hydrograph, base flow, hydrograph separations, stations, river Lebrija, sampling isotopes.

DESCRIPTION:

Presently project was carried out and implements a protocol of sampling of stable isotopes in the base flow, the same as an application of the method of separation of the flow bases by means of stable isotopes. This project begins with a revision of the main isotopes and its possible applications, which go from the localization of the recharge areas to the separation of the base flow. They are defined the fundamental techniques of separation of the base flow including the separation method by means of stable isotopes, she was also carried out and it implemented a protocol of sampling of stable isotopes in the base flow, with the purpose of establishing the behavior of the isotopic concentration for every month, on four stations located in the superior basin of the river Lebrija.

They were carried out the necessary preparations for the implementation of the separation of the components of the in the superior basin of the river Lebrija, to be able to know with clarity with which resources of underground water count and their respective sostenibilidad. The method of separation of the flow was also applied it bases by means of stable isotopes, for two basins outside of Colombia, since at the moment in our country, they are not had the necessary data to carry out the separation of the base flow for this method. Was also carried out the comparison among the traditional methods with the isotopic method, finding that the traditional methods often assume that the flow bases varies lightly, while the isotopic method demonstrates that the behavior of the base flow is similar to that of the hidrograma, concluding the traditional methods so underestimates the base flow on comparison with the isotopic method.

* Project of grade

** Faculty of Physical-Mechanical Engineerings, School of Civil Engineering, Director: GÓMEZ ISIDRO, Sully

INTRODUCCIÓN

Para nuestra región el agua subterránea es considerada como un recurso alternativo de abastecimiento, la principal preocupación es generar conocimientos respecto a la viabilidad y sostenibilidad de los acuíferos, ajustando los parámetros de la explotación sostenible de aguas subterráneas en la región, por lo cual se requieren la identificación de áreas de recarga, trayectoria del flujo, tiempos de residencia y edad del agua superficial y subterránea.

Actualmente se están realizando varios estudios relacionados con los isótopos estables en nuestra región, donde sus aplicaciones van desde la determinación de la zona de recarga del acuífero, a la separación de los componentes del hidrograma.

El propósito del estudio del flujo base desarrollado en este es conocer el comportamiento de los ríos en épocas de estiaje, la relación entre el flujo base y la respuesta de los acuíferos. Es indispensable la determinación del flujo base con técnicas precisas y eficaces, para conocer la disponibilidad del recurso. Por lo cual se revisaran diferentes métodos de separación del flujo base, enfocándose en el método isotópico de separación.

Además se empezará con los preparativos para poder realizar la separación del flujo base por medio de isótopos estables en la cuenca superior del río Lebrija, para lograr dicho objetivo se hace necesario la instalación de varias estaciones de muestreos de isótopos estables tanto para el flujo base como para la esorrentía total y la precipitación, en las principales corrientes de la cuenca.

En este proyecto se inicia con el primer muestreo de isótopos estables del flujo base, apoyado en un protocolo que se ajusta a las condiciones técnicas, sociales y

políticas de nuestra región, con el fin de permitir la continuidad del estudio del flujo base y la sostenibilidad del agua subterránea a largo plazo en la cuenca superior del río Lebrija, proyecto que tiene el apoyo de la organización internacional de la energía atómica.

Los sitios de muestreo dentro de la cuenca superior del río Lebrija, tendrán que representar las diferentes zonas de aporte de flujo base, las cuales son:

- El macizo de Santander, caracterizado por rocas ígneas metamórficas.
- La zona aluvial caracterizada por los depósitos cuaternarios y rocas sedimentarias.

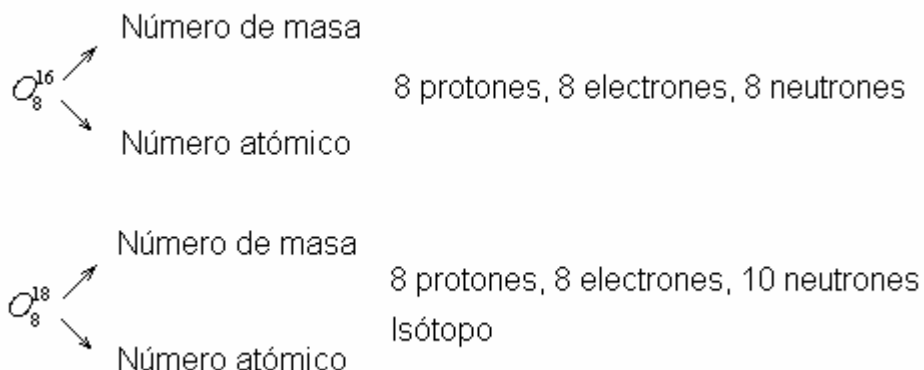
Además los sitios deben estar ubicados en las principales corrientes de la cuenca y en el cierre de esta.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Inicialmente se hace una revisión de los principales isótopos y sus posibles aplicaciones, luego se definen las principales técnicas de separación del flujo base incluyendo el método de separación de isótopos estables.

1.1 ISÓTOPOS

Los isótopos son los átomos del mismo elemento que tienen diversas masas; tienen el mismo número de protones y de electrones, pero un diferente número de neutrones.



Para referirse a un determinado isótopo, se escribe así: $^A\text{X}_Z$. Donde X es el símbolo químico del elemento, Z es el número atómico, y A es el número de neutrones y protones combinados, llamado el número de masa. Por ejemplo, el hidrógeno existe en tres formas isotópicas: la más abundante, ^1H , cuyo núcleo lo conforma solamente un protón; el deuterio (^2H o D), con un protón acompañado de un neutrón y el tritio (^3H), con un protón y dos neutrones.

De los 92 elementos naturales que existen en la actualidad se da lugar a más de 1.000 isótopos estables y radiactivos, estos a menudo se llaman isótopos ambientales, además se dividen comúnmente en dos grupos generales: isótopos estables e isótopos inestables, a continuación se presenta la abundancia relativa de isótopos de hidrógeno, oxígeno, y carbono en el ciclo hidrológico.

Tabla 1. Abundancia Relativa de Isótopos de Hidrogeno, Oxigeno y Carbón en el Ciclo Hidrológico

Átomo	Abundancia Relativa (%)	Tipo
¹ H	99.984	
² H (Deuterio)	0.016	Isótopo estable
³ H (Tritio)	0 -10 ⁻¹⁵	Isótopo radioactivo (Vida ½ 12.3 años)
¹⁶ O	99.76	
¹⁷ O (Oxigeno-17)	0.04	Isótopo estable
¹⁸ O (Oxigeno-18)	0.20	Isótopo estable
¹⁴ C (Radiocarbono)	< 0.001	Isótopo radioactivo (Vida ½ 5.73 años)

Fuente: Freeze y Cherry., 1979

1.2 ISÓTOPOS ESTABLES

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, o simplemente no se desintegran para dar lugar a otros núcleos.

1.2.1 Isótopos estables del Hidrógeno. El Hidrógeno de símbolo H, es un elemento gaseoso reactivo, insípido, incoloro e inodoro consta de dos isótopos estables, el ¹H y el D (deuterio), Estos se presentan en el ciclo hidrológico con una abundancias del 99,984% y el 0,016% respectivamente. El ¹H (Protio) es el hidrógeno común u ordinario, el deuterio se conoce como hidrógeno pesado, al ser su masa atómica aproximadamente el doble de la del hidrógeno común, aunque ambos tienen las mismas propiedades químicas.

1.2.2 Isótopos estables del Oxígeno. El oxígeno, de 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 isótopo de masa 17 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 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

1.2.3 Isótopos estables en el ciclo hidrológico. El agua durante el transcurso de cada etapa del ciclo hidrológico, presenta pequeñas variaciones en su concentración isotópica. Donde estas variaciones son tan únicas que suministran una firma isotópica característica.

El océano presenta un contenido en isótopos estables bastante uniforme, en donde sus aguas superficiales como consecuencia de la evaporación muestran un ligero enriquecimiento en isótopos pesados (^{18}O y D),

El vapor del agua es producido por los efectos de la radiación solar y el viento, elevándose y transportándose por la atmósfera en forma de nubes, estas a medida que se alejan de la costa o de la fuente de producción de vapor, empiezan con su empobrecimiento de los isótopos pesados, debido a su mayor masa lo cual produce su condensación y posterior precipitación. Del total de agua precipitada, una parte circula en la superficie como escorrentía y se concentra en pequeños cursos de agua, que luego se reúnen en arroyos y más tarde desembocan en los ríos; otra se evapora directamente desde la superficie de los suelos con alto contenido de agua, o es transpirada por la vegetación que la intercepta. El agua restante se infiltra en el suelo hasta alcanzar la zona saturada, formando parte del agua subterránea, la cual puede retornar a la atmósfera por evapotranspiración cuando el nivel freático está muy próxima a la superficie del terreno.

Las aguas superficiales como ríos o arroyos reflejan con buena aproximación la composición isotópica del promedio de la precipitación, cuando ésta es la fuente principal del caudal; ya que en la mayoría de los casos el proceso de evaporación tiene una influencia insignificante en la composición isotópica de esta agua.

La concentración de ^{18}O y D en el agua que recarga a un acuífero depende de su historia, desde que escapa del océano hasta que queda aislada de la influencia del medio exterior, por haberse infiltrado en el subsuelo. El agua infiltrada no está expuesta a cambios de estado y, por ello, su concentración de ^{18}O y D no se modifica con el tiempo, salvo casos excepcionales o como consecuencia del mezclado de aguas con distintas concentraciones.

Tanto el flujo de aguas superficiales, como el de aguas subterráneas, van a descargar directamente en el mar, u otras grandes superficies de agua, cerrándose así el ciclo hidrológico.

1.2.4 Fraccionamiento Isotópico. El fraccionamiento isotópico es el enriquecimiento relativo entre el isótopo pesado respecto al isótopo ligero. Este enriquecimiento se presenta cuando el agua cambia de estado, debido a que las moléculas más livianas tienen una mayor movilidad y en consecuencia una mayor probabilidad de salir del agua líquida en los procesos de evaporación y de mantenerse en la masa de evaporación en los procesos de condensación.

1.2.5 Desviación isotópica de Oxígeno 18 y Deuterio. El océano contiene más del 97% del agua en la corteza terrestre y presenta un contenido de isótopos estables bastante uniforme. Por esta razón, y también porque el océano representa el punto de partida y de llegada en el ciclo hidrológico, la composición isotópica media del océano ha sido tomada como referencia para expresar las concentraciones en oxígeno-18 y deuterio en los compuestos naturales.

Aquellas se expresan como 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, Standard Mean Ocean Water). Esta diferencia se expresa como desviación con la notación (δ):

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

Donde δ es la desviación isotópica en ‰, R_{MUESTRA} es la relación 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 $\pm 0.1\text{‰}$ y $\pm 1\text{‰}$ respectivamente, R_{SMOW} es la relación de isótopos (SMOW).

1.2.6 Principales aplicaciones de los isótopos estables. Actualmente se están realizando varios estudios relacionados con los isótopos estables en nuestra región, donde sus aplicaciones van desde la determinación de la zona de recarga del acuífero, a la separación de los componentes del hidrograma.

Para poder determinar la zona de recarga del acuífero, se debe realizar la correlación lineal entre las desviaciones de D u ^{18}O de la precipitación vs. Elevación. Para luego Introducir a la grafica (δD o $\delta^{18}\text{O}$ vs. Elevación) la desviación del agua subterránea del acuífero estudiado, para así poder determinar un rango de elevación que corresponda a los puntos de desviación del agua subterránea localizados sobre la recta, ya que las variaciones isotópicas del agua precipitada son mínimas desde el momento en que esta se infiltra en el suelo y alcanza la zona saturada hasta que sale de el.

Para la separación de los componentes del hidrograma, se debe tener en cuenta que el caudal del río se divide en dos componentes principales, la escorrentía superficial y el flujo base. Para poder realizar esta separación, se debe contar con datos de desviación isotópica de los componentes del hidrograma, al igual que el caudal del hidrograma y así por medio de ecuaciones básicas de continuidad

hidráulica y de balances de masa realizar la separación. Este método de separación es explicado mas afondo en la sección 1.7.

Pero estas no son las únicas aplicaciones para los isótopos estables, también se pueden encontrar otras aplicaciones como son: la determinación del origen de las aguas que aportan a una cuenca, identificación y estudio del origen de la salinización de las aguas subterráneas, evapotranspiración en la zona no saturada, caracterización de aguas lluvias en estudios relacionados con la variación estacional y el efecto de la cantidad de precipitación y el balance hídrico de reservorios superficiales como lagos, diques y embalses. (Camacho y Guzmán 2005).

1.3 ISÓTOPOS INESTABLES.

Los isótopos inestables experimentan decaimiento, estos son de uso particular en la determinación de la edad del agua. El decaimiento radiactivo es el cambio de la masa atómica a energía en forma de rayos gamma, partículas alfa, etc., en un cierto plazo:

Los dos isótopos inestables más usados en la hidrología del agua subterránea son ^3H (tritio) y ^{14}C (radiocarbono). El ^{36}Cl (radiocloruro) se utiliza para fechar el agua subterránea más antigua.

1.3.1 ^3H (Tritio). El tritio tiene un período de vida media de 12,3 años. Cantidades pequeñas se producen naturalmente en la atmósfera. Entre la prueba nuclear atmosférica de 1952 y 1969, se encontró en la precipitación un contenido de tritio de 5 - 10 TU (unidades del tritio), en 1963 se dio el máximo pico de los niveles de tritio. El Tritio en el agua subterránea no es afectado perceptiblemente por procesos químicos.

Las aplicaciones más comunes del análisis de tritio son:

- Distinguir entre el agua que entró a un acuífero antes de 1952 (antes de la bomba), y el agua que estaba en contacto con la atmósfera después de 1953.
- Estimación de las ratas de recarga, localizando la profundidad del pico de tritio que ocurrió en 1963.
- Estimación de la velocidad del flujo del agua subterránea, debido a la dispersión hidrodinámica, mezclas de aguas del acuífero y la fuente variable de tritio.

1.3.2 ^{14}C (Radiocarbono). El ^{14}C tiene una vida media de 5730 años. Al igual que el tritio, las cantidades pequeñas de ^{14}C son producidas naturalmente en la atmósfera; al igual que el tritio, las concentraciones más altas de ^{14}C fueron introducidas en la precipitación por la prueba nuclear atmosférica. Debido a su vida media más larga, el ^{14}C puede ser una herramienta útil para datar el agua subterránea tan vieja como 30.000 años (Davis y Murphy, 1987). La medida de ^{14}C a lo largo de varios puntos en un sistema de flujo regional permite una interpretación de las diferencias de edad, de las áreas de recarga, y las velocidades del flujo.

Las dificultades que pueden ocurrir al usar este análisis de radiocarbono son:

- La disolución de minerales carbonatados o la oxidación de la materia orgánica puede agregar carbón al agua la cual no es detectable por el ^{14}C , dando una edad errónea.
- Que se presenten mezclas de aguas en el acuífero, donde un contenido bajo ^{14}C puede ser indicativo de un agua vieja, o de una mezcla de agua joven y agua vieja. Por lo tanto, las medidas bajas de ^{14}C se pueden interpretar como la edad del agua subterránea solamente en escenarios de flujo donde la mezcla es insignificante.

1.3.3 ^{36}Cl (Cloruro-36). Tiene una vida media de 300.000 años. El ^{36}Cl es producido por la intersección de los rayos cósmicos con la atmósfera. Es usado para datar el agua subterránea tan vieja como 1 millón de años. Las desventajas son que la abundancia es muy pequeña, y las técnicas analíticas requeridas son complejas y costosas.

1.4 ISÓTOPOS EN LOS RÍOS

Los isótopos estables y radioactivos en el agua se han ido utilizando de manera progresiva en los estudios hidrológicos, hidroquímicos y en los procesos medioambientales de los ríos. Las tablas siguientes muestran los principales campos de aplicación de los isótopos.

Tabla 2. Abundancia Natural de los Isótopos Estables Usados en los Estudios de Ríos.

Isótopo	Relación Isotópica De Interés	Abundancia Natural Media	Aplicación
^2H	$^2\text{H}/^1\text{H}$	$1.55 \cdot 10^{-4}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios; relación agua superficial – agua subterránea.
^{13}C	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$	Ciclo del carbono en las riberas; procesos de meteorización; contaminación; procesos biológicos.
^{15}N	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$3.66 \cdot 10^{-3}$	Contaminación; procesos biológicos.
^{18}O	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$2.04 \cdot 10^{-3}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios; relación agua superficial – agua subterránea.
^{34}S	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	$4.22 \cdot 10^{-2}$	Contaminación; procesos de deposición de sales.
^{87}Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.709939	Meteorización de las rocas y los terrenos; perturbaciones antrópicas (polución); influencia de los afluentes en la química y la contaminación de los ríos.

Fuente: Rozanski K y Floehlich K, 2002

Tabla 3. Actividades Específicas Típicas de los Isótopos Radioactivos en Estudios de Ríos.

Nucleido	Periodo Radioactivo, (Años)	Actividad Específica (Bq/L)	Aplicación
^3H	12.33	$1.55 \cdot 10^{-4}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios; relación agua superficial – agua subterránea.
^{14}C	5730	$1.11 \cdot 10^{-2}$	Ciclo del carbono en las riberas; datación de sedimentos; datación de inundaciones.
^{238}U ^{234}U	$2.5 \cdot 10^9$ $2.45 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{-3}$	Meteorización, erosión y sedimentación; procesos en los estuarios; sedimentación.

Fuente: Rozanski, K. y Floehlich, K, 2002

Las precipitaciones locales son un componente importante del los ríos en las cuencas pequeñas y en las partes altas de las cuencas mayores, ya que son estas las que determinan el contenido isotópico de los ríos. En las partes bajas de las cuencas grandes la composición isotópica presenta una contribución mayor de la cabecera de la cuenca y la contribución de la precipitación local pasa a ser solo secundaria.

Las variaciones isotópicas estacionales son mayores en los ríos y arroyos en los que la escorrentía superficial procedente de la precipitación reciente es la fuente principal del caudal, ya que la concentración isotópica de la precipitación varia estacionalmente. En cambio la variación isotópica es menor cuando la fuente dominante de los ríos es el agua subterránea, debido a que las variaciones isotópicas del agua subterránea son mínimas desde el momento en que el agua se infiltra en el suelo y alcanza la zona saturada hasta que sale de él.

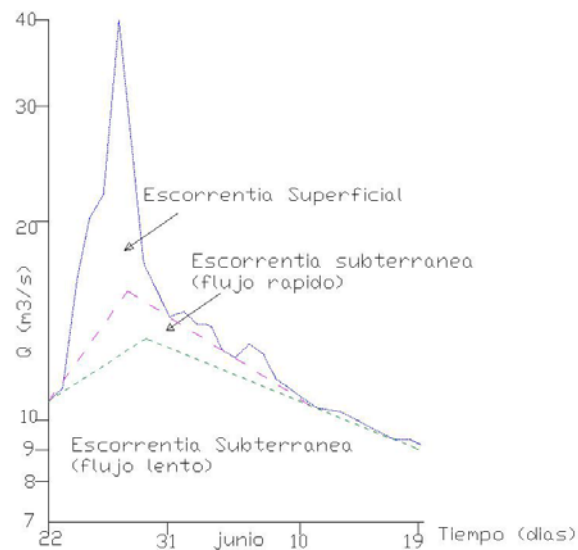
Las contribuciones de agua a los ríos de diferentes fuentes, superficiales y subterráneas, deben tener una concentración isotópica característica, para poder determinar la composición isotópica de los ríos. En aquellos lugares en los que es posible describir la composición isotópica de estas fuentes, se deben realizar los

análisis isotópicos del agua del río, ya que estos proporcionan información sobre el origen y la cantidad de las diferentes contribuciones de las fuentes.

Generalmente en las aplicaciones de los isótopos estables en los ríos, se utiliza la concentración de isótopos de ^{18}O , el cual proporciona los mismos resultados que el ^2H , de modo que es suficiente con medir uno solo de los dos isótopos. Además se sabe que la composición isotópica del Oxígeno y el Hidrogeno de la mayoría de los ríos del mundo se aproximan a la Línea Meteorica Mundial. Esto indica que la evaporación del agua del río posee, en la mayoría de los casos, una influencia insignificante en la composición isotópica de esta agua. No obstante en los ríos y en las cuencas fluviales de las zonas áridas, donde la evaporación puede ser un factor importante, la combinación de las concentraciones de ^{18}O y del ^2H es de suma importancia para cuantificar el efecto de la evaporación y estudiar los procesos de mezcla entre el agua del río y el agua subterránea adyacente (Rozanski, K. y Floehlich, K, 2002).

1.5 COMPONENTES DEL HIDROGRAMA

Figura 1. Componentes del hidrograma



Fuente: Bleasdale A.y Boulton A. G, 1963

1.5.1 Escorrentía superficial. Es la escorrentía que proviene directamente de la precipitación efectiva y la cual se desplaza al inicio del evento sobre la superficie del terreno, para luego llegar a algún cauce bien definido y por medio de este salir de la cuenca más rápido que los demás componentes del hidrograma.

1.5.2 Flujo lento. Es el agua subterránea que esta compuesta por las partes de las precipitaciones anteriores que se infiltran hasta los niveles inferiores del nivel freático, y es el que de manera mas lenta llega a la salida de la cuenca. En general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta en particular.

1.5.3 Flujo rápido. Es el agua subterránea que esta compuesta por parte de la precipitación que se infiltra y fluye cerca de la superficie del suelo y más o menos paralela a él. Este puede ser casi tan rápido como el superficial o tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo. Cuando es demasiado rápido se considera como parte del escurrimiento superficial, y cuando es demasiado lento se le considera parte del subterráneo.

1.5.4 Flujo base. Es el caudal que se presenta antes, durante y después de la incorporación del volumen precipitado (escorrentía superficial) al hidrograma, esto obedece al agua que se introduce a la corriente por precipitaciones anteriores (flujo rápido) o bien por la infiltración de agua desde los acuíferos a la corriente (flujo lento).

1.6 MÉTODOS DE SEPARACIÓN DEL HIDROGRAMA

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 que punto del hidrograma se comienza a presentar la escorrentía subterránea. Cabe aclarar que solo existen métodos empíricos que hacen una aproximación de la separación de los componentes.

El hidrograma se considera como una curva integrada de eventos o componentes de flujo los cuales se agotan con características de recesión diferentes. La forma del hidrograma consta de tres partes fundamentales una que corresponde a la curva de ascenso, que inicia en el tiempo en el cual se integra el agua de aportación de la precipitación y termina en la cima, punto o pico de la curva, en la que se registra el caudal máximo. En este punto se da inicio al descenso de la curva hasta el momento en que se integre al punto de aforo la última gota de lluvia, a este punto se le conoce como el final del escurrimiento directo, normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión, de este punto en adelante el escurrimiento es sólo de origen subterráneo y se le conoce a la forma del hidrograma como la curva de agotamiento.

Ya que es muy difícil conocer con precisión los niveles freáticos durante una tormenta y el punto final del escurrimiento directo de un hidrograma, esto hace que la separación del flujo base del directo no sea tarea sencilla en la mayoría de los casos. Existen varias formas para calcular el final del escurrimiento directo, algunos de los cuales se describen a continuación (Aparicio, 1987):

- Este método consiste en determinar una curva maestra de recesión del escurrimiento base, analizando varios hidrogramas y seleccionando aquellos tramos en que sólo exista escurrimiento base, estos tramos seleccionados se dibujan posteriormente en papel semilogarítmico de manera que sus extremos inferiores sean tangentes a una línea. Si uno de los tramos seleccionados está formado por escurrimiento directo, este se nota de inmediato, ya que este tramo no es tangente a dicha línea, por eso esos tramos hay que eliminarlos del análisis. La línea resultante se llama curva maestra de recesión. El punto final del escurrimiento directo del hidrograma se localiza superponiendo la curva maestra de recesión dibujada en papel aritmético a la misma escala que el hidrograma con la curva de recesión del hidrograma. El punto final del escurrimiento directo se encuentra donde ambas líneas se separan. Este

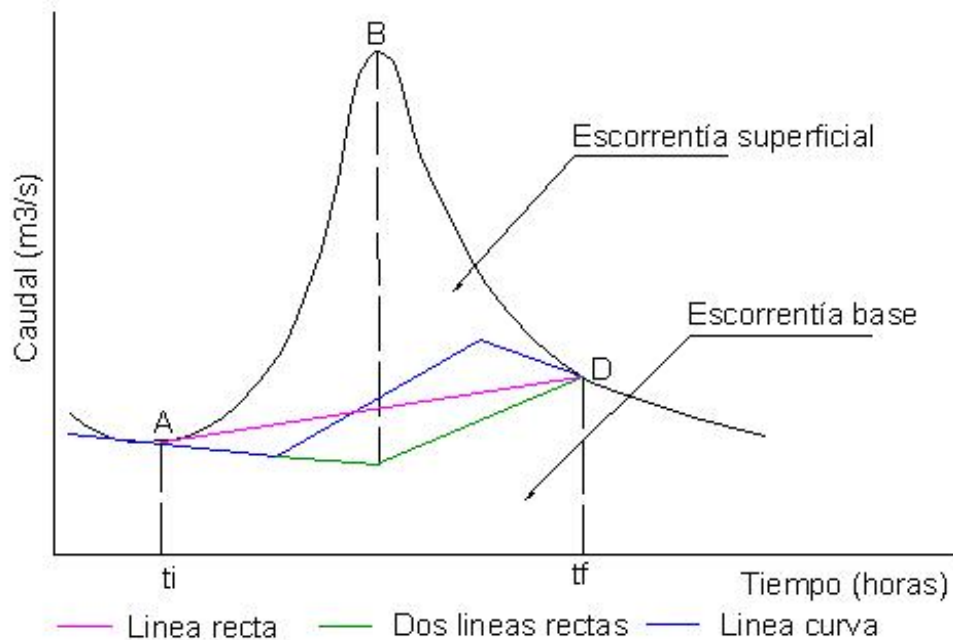
método es bueno, pero tiene la desventaja de que se requiere contar con varios hidrogramas registrados anteriormente, lo cual no siempre es posible.

- Otro método más, consiste en buscar el punto de mayor curvatura de la curva de recesión del hidrograma. En el punto donde ocurra un cambio de pendiente se tiene la mayor curvatura de la rama descendente y por tanto el punto final del escurrimiento directo.

Una vez localizado el punto final del escurrimiento directo por medio de cualquiera de los métodos anteriores o de algún otro, resta trazar la línea de separación entre el flujo base y el directo para lo cual se presentan los siguientes métodos.

1.6.1 Métodos gráficos. Dentro de estos métodos de separación de flujo base se encuentran el método de la línea recta, dos líneas rectas y el de la línea curva (Aparicio, 1987).

Figura 2. Métodos gráficos de separación de flujo base

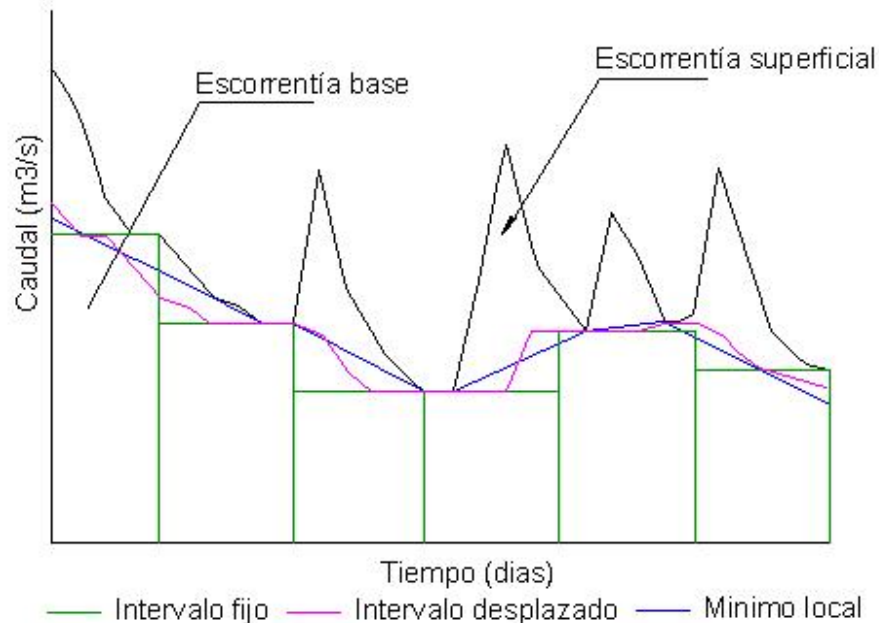


Fuente: Investigación de los autores

- **Método de la línea recta.** Es una de las técnicas más simples la cual consiste en trazar una línea recta desde el punto de levantamiento (A) hasta el punto final del escurrimiento directo (D).
- **Método de las dos líneas rectas.** Se traza una línea recta desde el punto de inicio de la línea ascendente (A) hasta la proyección del pico del hidrograma (B) con el eje horizontal, esta línea debe llevar la misma pendiente del hidrograma antes del punto de inicio de la curva ascendente, luego se proyecta una línea desde la intersección entre la curva trazada y la proyección del pico del hidrograma hasta el punto en el que se da el final del escurrimiento directo o superficial (D).
- **Método de la línea curva.** Este método consiste en trazar dos líneas rectas que parten de los puntos de inicio de la curva ascendente (A) y fin de la curva descendente (D) con la misma pendiente del hidrograma. Estas líneas se prolongan hasta el punto medio entre la proyección del pico del hidrograma y el punto, y por medio de una curva suave se unen ambas rectas.

1.6.2 Métodos de intervalo. Otras técnicas de separación del flujo base son los métodos de intervalo los cuales son presentados por la USGS dentro de su programa HYSEP como una herramienta para separar dicho caudal por tres maneras diferentes como lo son el método del intervalo fijo, intervalo desplazado y el del mínimo local (Sloto y Croase, 1996).

Figura 3. Métodos de intervalo aplicado a French Creek en Phoenixville



Fuente: Sloto y Croase, 1996

- **Método del intervalo fijo.** Este método consiste en dividir el hidrograma en intervalos de $2N$ días cada uno. Donde N es el tiempo de vaciado el cual representa el número de días después del pico del hidrograma donde los efectos de la precipitación ya no tienen importancia sobre el caudal de la corriente, y este es atribuido solamente a la descarga del acuífero. Este es calculado por medio de una fórmula empírica la cual tiene en cuenta el área de la cuenca en millas $N = A^{0.2}$. Este método asigna la descarga más baja de cada intervalo ($2N$) a todos los días del intervalo comenzando con el primer día del periodo registrado. La base del método es representada mediante barras verticales deslizantes con un ancho de $2N$ días, donde la barra intercepta al hidrograma en su punto más bajo y la descarga en ese punto será asignada a todos los días en el intervalo.

- **Método del intervalo desplazado.** Para este método el día a analizar se considera como el día medio de un intervalo de $2N$ días. Para esto se comparan los caudales observados $[0.5 (2N-1)]$ días antes y después del día en cuestión hallando el mínimo caudal de descarga en el intervalo y asignándole este valor como caudal base. La barra deslizante repite el procedimiento para todos los días en el hidrograma construyendo así un nuevo hidrograma mediante la unión de los caudales base de cada día (Fig. 3).
- **Método del Mínimo Local.** El método del mínimo local es parecido al método anterior, solo que aquí la descarga en el punto medio se compara con la más baja del intervalo. Si efectivamente el punto medio posee la descarga mas baja del intervalo, entonces se considera como un mínimo local y es conectado por líneas rectas con los mínimos locales adyacentes. Los valores de flujo base para cada día entre los mínimos locales son estimados por interpolaciones lineales.

Para una mejor información acerca de los métodos de separación del flujo base se puede remitir a (Rueda y Sarmiento, 2003) en la cual se presenta una aplicación a dichos métodos con los datos de caudales diarios (1986-2000) de la estación de Café Madrid ubicada en el cierre de la cuenca superior del río Lebrija en la cual se aplico la metodología de la USGS.

1.6.3 Métodos de algoritmos. Estos métodos son desarrollados por medio de algoritmos numéricos los cuales permiten dar una estimación mejor del flujo base, ya que este tiene en cuenta que el comportamiento del flujo base es similar al hidrograma. Este método permite hacer la separación del flujo base para cualquier tipo de evento, la dificultad de este método es que se debe contar con datos históricos.

- **Algoritmo de un Parámetro** (Chapman y Maxwell, 1996) Propusieron un algoritmo de separación del flujo base, el cual se basa en que el flujo base es el promedio entre el escurrimiento directo y el flujo base del intervalo de tiempo anterior, es decir:

$$Q_o(i) = kQ_o(i-1) + (1-k)Q_s(i) \quad (2)$$

Donde $Q_o(i)$ y $Q_s(i)$ es el flujo base y el escurrimiento superficial respectivamente, en el intervalo de tiempo i , K es la constante de recesión durante los periodos donde no hay escurrimiento directo, esta se calcula por medio de la curva maestra de recesión.

Dado que el caudal total de la cuenca Q_T es la suma del flujo base Q_o y el escurrimiento superficial Q_s , se tiene:

$$Q_T = Q_s + Q_o \quad (3)$$

Reemplazando la ecuación 3 en la ecuación 2:

$$Q_o(i) = \frac{k}{2-k} Q_o(i-1) + \frac{1-k}{2-k} Q_T(i) \quad (4)$$

$$Q_o(i) \leq Q_T(i) \quad (5)$$

- **Algoritmo de dos parámetros** (Boughton, 1993) Este algoritmo es mucho más flexible que el anterior dado que este presenta un segundo parámetro C , que reemplaza a $(1-k)$ de la ecuación 2, La determinación de este parámetro es subjetiva, ya que se toma el valor determinado por medio de la variación de este, hasta que el modelo se ajuste con el hidrograma en la parte final del escurrimiento directo, donde:

$$Q_o(i) = \frac{k}{1-C} Q_o(i-1) + \frac{C}{1+C} Q_T(i) \quad (6)$$

Esta ecuación también esta sujeta a la condición de la ecuación (5)

1.7 MÉTODO DE SEPARACIÓN DEL HIDROGRAMA UTILIZANDO ISÓTOPOS ESTABLES

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 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 y Froehlich K, 2002).

1.7.1 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 lento y flujo rápido), donde la combinación de estas dos forman el 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.

Otra suposición que se hace es que los trazadores que se utilicen junto con los isótopos estables se deben comportar conservativamente, es decir que los trazadores no sufran decaimiento de su concentración con el tiempo.

1.7.2 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 período del acontecimiento y obtener el promedio cargado de las concentraciones isotópicas, este valor será calculado como:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (7)$$

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 tendrán 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.

Este trabajo esta enfocado en la determinación de este parámetro, por lo cual se ha desarrollado una metodología de muestreo. Ver capítulos 2 y 3.

- **Flujo Lento.** En cambio 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 los cuales aportan agua al río, para así obtener 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).

- **Escoorrentía Total.** Para determinar la concentración isotópica de la escoorrentía 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 mas cortos en la rama ascendente del hidrograma, disminuyendo el número de muestreos durante la curva de recesión (Tekeli Y. y Sorman A, 2003)

1.7.3 Determinación de la desviación isotópicas. El primer paso para poder realizar la separación del hidrograma utilizando isótopos estables, es determinar la desviación isotópica, por lo cual se recure a la ecuación 1:

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

1.7.4 Separación de dos componentes. La separación en dos componentes del hidrograma (escoorrentía superficial, flujo base) se basa en la continuidad hidráulica (Clark y Fritz, 1997).

$$Q_T = Q_S + Q_O \quad (8)$$

Donde Q_T representa la escoorrentía total, Q_S el componente de la escoorrentía superficial y Q_O la componente del flujo base.

También se utiliza el balance de masas, Por lo cual se puede relacionar las concentraciones de los isótopos estables como sigue:

$$Q_T \times \delta_T = Q_S \times \delta_S + Q_O \times \delta_O \quad (9)$$

Donde Q_T , Q_O , Q_S , es la escoorrentía total, flujo base y escoorrentía superficial respectivamente. δ_T , δ_O , δ_S , es la desviación isotópica de la escoorrentía total, del

flujo base y de la escorrentía superficial (que está representada por la desviación isotópica de la precipitación) respectivamente.

Despejamos las ecuaciones 8 y 9.

$$Q_s = Q_T - Q_o \quad (10)$$

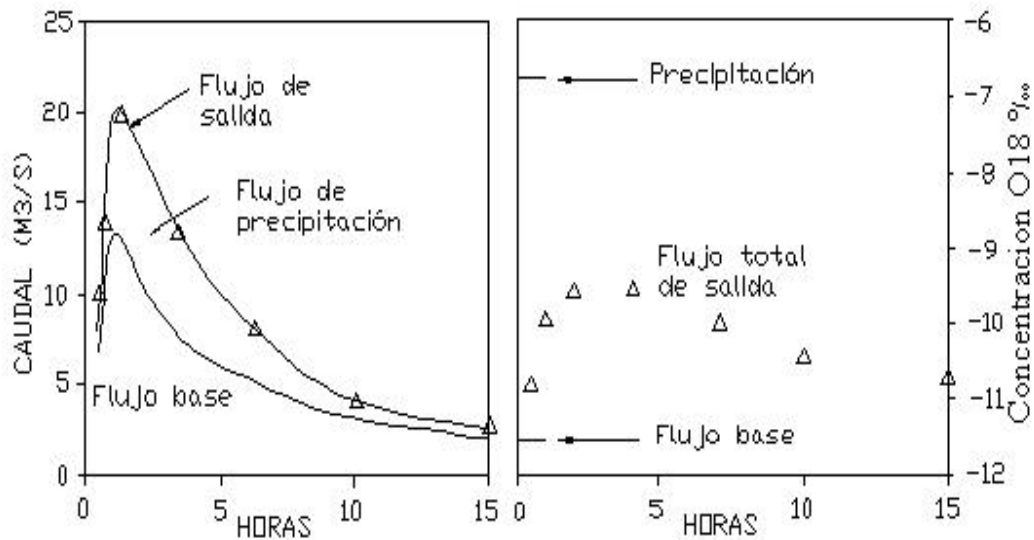
$$Q_o = \frac{Q_T \times \delta_T - Q_s \times \delta_s}{\delta_o} \quad (11)$$

Remplazando la ecuación 10 en 11, nos da.

$$Q_o = Q_T \left(\frac{\delta_T - \delta_s}{\delta_o - \delta_s} \right) \quad (12)$$

Los datos de escorrentía total del hidrograma se obtendrán de una estación limnigráfica cercana al sitio de muestreo del flujo base. Así con estos datos y las desviaciones isotópicas de los diferentes componentes se procede a realizar la separación. Esta separación se realiza puntualmente en el hidrograma dependiendo de la cantidad de datos de la desviación isotópica de la escorrentía total, para los puntos intermedios a estos se tendrá que interpolar.

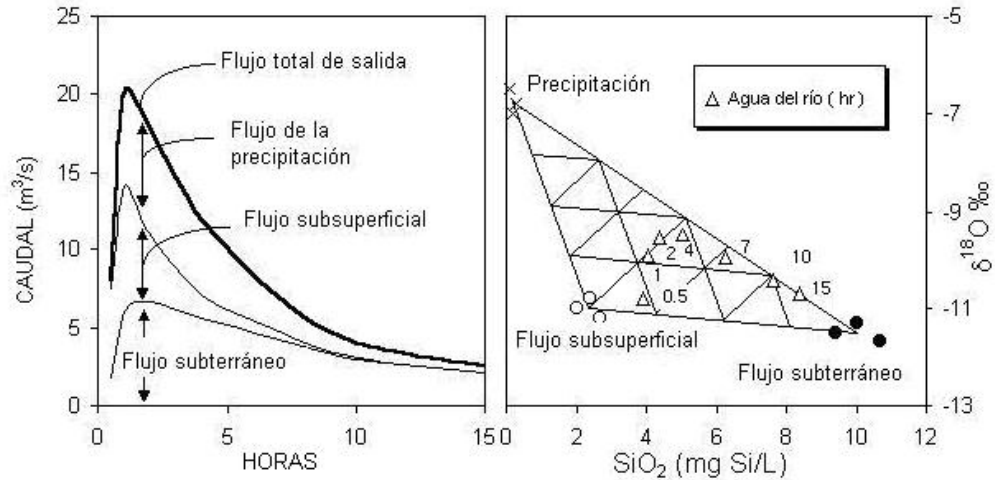
Figura 4. Separación del hidrograma para un sistema de dos componentes usando $\delta^{18}\text{O}$.



Fuente: Clark y Fritz, 1997.

1.7.5 Separación de tres componentes. Para el caso de la separación tres componentes (flujo subterráneo, flujo subsuperficial y escorrentía superficial). Aparece un nuevo requisito, el cual es el de utilizar más trazadores y el uso de trazadores isotópicos y químicos combinados (Clark y Fritz, 1997). Hay que tener sumo cuidado a la hora de escoger los trazadores químicos, ya que estos deben comportarse conservativamente (que no varíen su concentración con el tiempo) de lo contrario no será posible realizar dicha separación, por que las concentraciones de los componentes a separar serian variables en el tiempo.

Figura 5. Separación del hidrograma para un sistema de tres componentes usando $\delta^{18}\text{O}$ y sílice disuelto (Si).



Fuente: Clark y Fritz, 1997.

Se utilizara dos trazadores (por ejemplo, Oxigeno 18 y Sílice disuelto, representados como δ y Si) y tres ecuaciones para resolver los tres componentes de la escorrentía total en un momento dado durante y después de la tormenta. Utilizando los mismos conceptos de la separación de dos componentes, la continuidad hidráulica y el balance de masa (Tekeli Y. y Sorman A, 2003) y (Clark y Fritz, 1997).

Obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$Q_T = Q_S + Q_{SB} + Q_{GW} \quad (13)$$

$$Q_S = \frac{Q_T(\delta_T - \delta_{GW}) - Q_{SB}(\delta_{SB} - \delta_{GW})}{\delta_S - \delta_{GW}} \quad (14)$$

$$Q_{GW} = \frac{Q_T(Si_T - Si_S) - Q_{SB}(Si_{SB} - Si_S)}{Si_{GW} - Si_S} \quad (15)$$

Donde Q_T , Q_{SB} , Q_{GW} , Q_S , es la escorrentía total, flujo rápido, flujo lento y superficial respectivamente, δ_T , δ_S , δ_{SB} , δ_{GW} , es la desviación de isótopos de ^{18}O para la escorrentía total, superficial (la cual está representada por la desviación isotópica de la precipitación), flujo rápido y flujo lento respectivamente, Si_T , Si_S , Si_{SB} , Si_{GW} , es la concentración de sílice de la escorrentía total, superficial, Flujo rápido y flujo lento respectivamente.

Estas tres ecuaciones se pueden solucionar interactivamente para los tres parámetros desconocidos Q_S , Q_{GW} y Q_{SB} . La solución más simple es utilizar una hoja electrónica y por medio de tanteo, prueba y error o por la herramienta de búsqueda de objetivo, encontrar un valor para Q_{SB} que solucione la ecuación inicial de continuidad hidráulica.

1.7.6 Dificultades que presenta el método isotópico. El método de separación de los componentes del hidrograma por medio de isótopos estables presenta ciertas dificultades en su aplicación.

Una de estas es que a la hora de realizar la separación de los tres componentes, se presenten dificultades en la determinación de la concentración isotópica del flujo rápido subterráneo principalmente porque recoger estos datos es muy complicado, además por que en algunos casos su desviación isotópica es similar al del flujo lento subterráneo, por lo cual se hace imposible la separación de los tres componentes (Laudon H. y Seibert J., 2004).

También se puede presentar problema con la técnica de separación del hidrograma, ya que una o más de las suposiciones en la separación del hidrograma fueron violadas, por ejemplo: el trazador químico no se comporta conservativamente.

Al igual que puede ocurrir algún error de muestreo, es decir, uno o más de los tres componentes no fue adecuadamente ni químicamente caracterizado.

También se puede presentar dificultades con los datos de la tormenta, ya que estos no pueden ser convenientes para la separación del hidrograma, dado que la concentración de los trazadores para por lo menos uno de los componentes es demasiado similar a las concentraciones de los otros componentes.

Para poder verificar la exactitud de la separación de los componentes del hidrograma, se puede realizar separaciones múltiples del hidrograma en la misma tormenta usando diversos pares de trazadores y comparando los resultados. Si los resultados de todas las separaciones del hidrograma son parecidas, se puede concluir que la técnica de separación del hidrograma es una herramienta adecuada a utilizar en la hidrología de la cuenca y que los trazadores seleccionados se comportaron apropiadamente conservativos. (Rice K. 1998)

1.8 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE SEPARACIÓN

Los métodos gráficos no son la mejor herramienta para separar el flujo base ya que no tienen en cuenta los parámetros físicos de la cuenca, pero estos pueden dar resultados con buena aproximación, de manera especial en tormentas pequeñas. En general subestiman el volumen del flujo base (Aparicio, 1987).

La única ventaja que presenta el método gráfico sobre los otros métodos es que este método no necesita de datos históricos para la separación de un evento, únicamente la información del evento a estudiar.

Los métodos de intervalos presentados por la USGS tienen en cuenta algunos parámetros físicos de la cuenca como es el área, además estos métodos trabajan cualquier tipo de tormenta (sin importar la intensidad). La inconveniencia de estos métodos es que solo trabajan hidrogramas diarios, de los cuales se deben tener información histórica.

Los métodos de algoritmos se presentan como una buena alternativa para la separación del flujo base, dado que este asume que el comportamiento del flujo

base es similar al del hidrograma. Donde el único inconveniente es que se debe contar con datos históricos de la escorrentía total.

Los modelos empíricos de separación del hidrograma se han desarrollado para que satisfagan la necesidad de la ingeniería pero no proporcionan una comprensión real de los procesos implicados. Además los modelos tradicionales de separación del hidrograma para una tormenta dada asumen a menudo que el flujo base aumenta ligeramente de forma lineal durante el aumento de la escorrentía total. Mientras que las técnicas isotópicas muestran que el comportamiento del flujo base es similar al del hidrograma, por lo tanto el aporte del flujo base es mayor que el de la escorrentía superficial. Esto nos proporciona una comprensión mas real del comportamiento de cada uno de los componentes del hidrograma.

A la hora de comparar el método isotópico con los demás métodos, se elegirán los métodos que cumplan con las características del método isotópico, como tipo de hidrograma y tormenta a analizar. Por lo cual se comparara con los métodos de algoritmos, ya que estos se aplican a cualquier tipo de evento y tiene un comportamiento similar al método isotópico.

Para una mejor comparación de los métodos se realizara una aplicación tanto para el método isotópico como para el método de algoritmo, ver capítulo 5.

2. PROTOCOLO DE MUESTREO DE ISÓTOPOS ESTABLES EN EL FLUJO BASE

En este capítulo se tratará de informar a las personas encargadas de la recolección de las muestras de agua para el análisis de isótopos estables, los pasos necesarios para la preparación del viaje de campo, la selección del equipo y envases para el muestreo, la recolección de muestras y la seguridad del personal de campo.

2.1 PREPARATIVOS PARA EL MUESTREO

A continuación se explicaran los paso a seguir para poder llegar a realizar un adecuado muestreo de isótopos estables.

2.1.1 Responsabilidad del personal de campo. Antes de empezar con la recolección de las muestras, el personal de campo debe asegurarse de que las muestras recogidas sean representativas del sistema hídrico que es estudiado. Una muestra de agua representativa es la que representa la parte del sistema hídrico que es estudiado y cumple con los objetivos y el alcance del estudio.

El personal de campo debe seguir como mínimo las siguientes recomendaciones para poder realizar un muestreo óptimo:

- Se debe estar alerta de que las muestras sean representativas: La cantidad de datos tomados, no implica que la muestra sea adecuada, por lo tanto se debe tener certeza de que la muestra sea representativa del fenómeno que se esta estudiando.

- Seguir el protocolo de recolección de muestras: Los chequeos de calidad y control aplicados durante los análisis del laboratorio a las muestras no pueden compensar los datos que son alterados negativamente, dado que no se sigue apropiadamente el protocolo, causando que las muestras no sean representativas del fenómeno estudiado o porque las muestras fueron recogidas y procesadas incorrectamente.

El personal de campo también es responsable del adecuado almacenamiento de las muestras

2.1.2 Responsabilidad del equipo de estudio. El equipo de estudio son aquellas personas encargadas de la logística para poder realiza el proyecto y de la supervisión del personal de campo.

Una de las responsabilidades del equipo de estudio es seleccionar el sitio de muestreo y las condiciones del muestreo, tales como la época del año y los niveles del agua a muestrear, al igual que establecer una cartera de campo y crear o actualizar un archivo por cada estación de muestreo.

- Cada cuerpo de agua y el agua superficial tiene un sistema único de condiciones que necesita ser identificado y ser considerado en el proceso de selección del sitio, por lo cual se debe ejercitar el juicio ganado de experiencias de campo para hacer selecciones apropiadas del sitio.
- El personal de campo debe ser entrenado en los procedimientos de recolección de muestras para la determinación de isótopos estables.

También es responsabilidad del equipo establecer y mantener los archivos para cada sitio del muestreo. La documentación completa de la información y los datos del sitio recogidos debe estar en archivos electrónicos y de papel.

2.1.3 Revisión de la información existente. Para determinar nuevos sitios de muestreo es necesario recaudar la información disponible acerca de las ubicaciones de estaciones existentes dentro y alrededor de la zona de estudio.

El análisis de esta información puede revelar la necesidad o no de establecer nuevas estaciones para lograr los objetivos del proyecto. Estas estaciones son sitios específicos cerca de un arroyo o río en el cual se recoge la muestra de agua para su análisis. Su ubicación es fundamental para el éxito del programa de muestreo.

Después de que el número y localización de las estaciones existentes han sido estimados, se debe tener el acceso legal a la propiedad y estación para poder realizar un reconocimiento del sitio y verificar si ésta es de nuestro interés y así poder tener acceso a los resultados de las muestras.

2.1.4 Selección de los sitios de muestro. Una vez que el trabajo en el terreno haya comenzado, el personal de campo junto con el equipo de estudio deberá seleccionar los sitios en los cuales serán recogidas las muestras.

Primero que todo antes de seleccionar el sitio de muestreo hay que cerciorarse de:

- La seguridad del personal del campo.
- De los objetivos del estudio, los tipos de datos requeridos, el equipo necesario y los métodos de muestreo.
- Obtener la información histórica disponible de los sitios ya existentes.

La selección de los sitios de muestreo se realizará en dos fases: Localización general y específica.

- **Localización general.** Es la identificación de los tramos del cuerpo de agua que deberán de ser muestreados. Esta se puede realizar por medio de mapas del área de estudio, ubicando en esto los ríos y arroyos a muestrear y la posible zona de muestreo.
- **Localización específica.** Es identificar los sitios de muestreo que aseguren la representatividad de las muestras y garantice la seguridad y la facilidad en la toma de muestras. Para poder identificar y establecer estos nuevos sitios de muestreo se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:
 - Reconocimiento del tramo seleccionado, por medio de la localización general, escogiendo un tramo que asegure una localización óptima y que proporcione datos representativos, para lo cual es recomendable realizar viajes de reconocimiento antes de seleccionar los sitios de muestreo finales.
 - Elección de unas secciones del río con rangos rectos, flujo uniforme, contorno inferior uniforme y estable en donde los componentes se mezclen a lo largo de la sección transversal.
 - Estar ubicados en o cerca de una estación de medición de niveles de agua en ríos (limnigrafo o limnómetro), para obtener los datos concurrentes de la descarga del agua superficial requeridos para calcular los componentes del hidrograma.
 - La ubicación debe ser bastante lejos, sobre y debajo de la confluencia de agua de ríos, para evitar muestrear una sección transversal donde se puede tener composiciones isotópicas variables, como consecuencia de la mezcla incompleta de dos aguas fluviales diferentes. Esta distancia puede ser de unos cuantos kilómetros en ríos grandes.
 - Estar situados en una sección transversal donde las muestras se pueden recoger en cualquier etapa del caudal a través del período de estudio, si es posible.

- Observar las condiciones que podrían afectar las operaciones de muestreo, tales como los caudales altos o bajos del río al igual que las particularidades del acceso al sitio de muestreo.

2.1.5 Localización física del sitio de muestreo. La ubicación y el número de identificación de los sitios de muestreo (punto de monitoreo) deberán ser señalados exactamente en un mapa a escala grande (1:25000 o 1:50000), con una X, círculo o punto, con la finalidad de permitir su fácil ubicación en el campo y la digitalización de los datos. Además, en la libreta de campo, se dibujará un croquis de cada sitio, donde se señalarán: caminos, infraestructuras, árboles y otros puntos de referencia, no mostrados en las cartas topográficas, que ayudarán a su localización.

También se tendrán que determinar las coordenadas de los sitios de muestreo, las coordenadas geográficas se determinaran mediante un instrumento portátil del sistema de posicionamiento global (GPS).

Es recomendable tomar fotografías de los sitios de muestreo y sus alrededores, con el propósito de documentar los mismos y establecer un archivo completo de fotos (esto también ayudará a una persona en su primera visita a ubicar el sitio) éstas se tomarán desde puntos preestablecidos que serán descritos en detalle en la cartera de campo.

Incluya a una persona o un objeto en la foto del punto de muestreo para mostrar la escala, saque como mínimo dos fotos una río arriba del punto de muestreo mirando río abajo al punto de muestreo y otra río abajo del punto de muestreo mirando río arriba al punto de muestreo.

Saque fotos adicionales si se da cuenta que hay cambios significativos en los alrededores del sitio de muestreo. Cada foto será identificada con la siguiente información: código del sitio, nombre del sitio, fecha, hora, y orientación de la foto.

2.1.6 Preparación para el viaje a campo. Los pasos esenciales para la preparación del viaje son:

- Revisión, actualización o creación de archivos de los sitios de muestro de isótopos estables.
- Revisión o elaboración de la cartera de campo.
- Cerciorarse de la seguridad del personal de campo al igual que su entrenamiento en la toma de muestras.
- **Archivos de los sitios de muestreo.** Cada sitio de muestreo tiene que tener un archivo donde especifique la ubicación y las características del sitio. A continuación se especifica el contenido general de dicho archivo:
 - Código de la estación: Es el número o caracteres de identificación de la estación.
 - Nombre de la estación: Este nombre puede ser el que le dan al sitio las personas de la región.
 - Tipo de estación: Si hay cerca del sitio de muestreo una estación de medición de niveles, identificar el tipo de estación (LM o LG).
 - Ubicación: Nombre de la localidad: Región, ciudad o pueblo donde se encuentre la estación.
 - Corriente: Río en el cual se esta realizando el muestreo.
 - Coordenadas: Las coordenadas geográficas del sitio de muestreo.
 - Fecha de funcionamiento: La fecha en la cual empezó la toma de muestras de la estación para así saber la cantidad de datos históricos que se pueden obtener de la estación.

- Fecha: Es el día en el cual se tomo la muestra.
- Parámetros tomados: Identificar otros parámetros medidos de las muestras fuera de los isótopos estables, como temperatura del agua, pH, alcalinidad, conductividad eléctrica, y otros parámetros químicos posibles.
- Observaciones

Los archivos tienen que estar siempre actualizados, y con fotos del sitio de muestreo y sus alrededores, las cuales tienen que irse renovando cada vez que hayan cambios en los sitios de muestreo.

Tabla 4. Formato de Archivo del sitio de muestreo río.

Nombre				Tipo			Ubicación			
Coordenadas		Longitud				Fecha de funcionamiento				
		Latitud								
Nº	Código	Corriente	Fecha	Parámetros químicos						Observaciones
				pH	Redox (mv)	Elec-cond. (µs)	Sal. (mg/l)	Sal (%)	T° (°C)	

Fuente: Investigación de los autores.

- **Cartera de Campo.** La cartera de campo contiene la información necesaria para que el personal de campo pueda localizar el sitio de muestro y recoger con seguridad las muestras de agua. El contenido general de la cartera de campo se enumera a continuación.

- Código de la estación: Es el código de la estación correspondiente a visitar según los archivos del sitio de muestreo.

- Fecha: Es la fecha del día de la visita a la estación.
- Nombre de la estación: Es el nombre correspondiente de la estación, según los archivos del sitio de muestreo.
- Localización de la estación: Es el nombre de la vereda, barrio, sector o suburbio donde se encuentra la estación.
- Modo de desplazamiento: Se especificara el modo de transporte para poder llegar al sitio de muestreo o sus alrededores, ejemplo, las vías o rutas que ha de seguir el automóvil si el transporte es privado, o las rutas de buses públicos que lo acercan al sitio de muestreo.
- Nombre del operador: El nombre del operador, vecino, o de otra persona responsable del ingreso al sitio de muestreo.
- Teléfono del operador: Teléfonos donde se pueda ubicar al operador.
- Instrucciones de acceso al sitio: Los cuidados y recomendaciones para poder tener acceso al sitio de muestreo, ejemplo, llamar al dueño o al operador del sitio antes de llegar a este, llevar las llaves para abrir las puertas de acceso al sitio, tener cuidado con los perros guardianes de la estación.
- Plantel o sitio de emergencia más cercano: La dirección y teléfono de un hospital o puesto de salud cercano al sitio de muestreo, ya que en caso de algún accidente en el sitio de muestreo se tenga a donde acudir.
- Numero telefónico del jefe o supervisor: En caso de cualquier eventualidad poder comunicarse con el supervisor.
- Información de seguridad: Dar a conocer al personal de campo cualquier peligro que pueda surgir en el sitio de muestreo o en el recorrido a este, como problemas ambientales, tal como estar a la intemperie, animales peligrosos, al igual que problemas de orden publico.

- Punto de toma de fotos: La localización ya preestablecida de toma de fotos para poder tener una evolución del sitio de muestreo.
- Equipo necesario: Tales como el equipo indispensable para realizar el muestreo, cámara fotográfica, el número necesario de botellas para la recolección de las muestras, y demás.
- Numero de muestras recogidas: El total de muestras recogidas en la visita.
- Próxima visita al sitio: La fecha de la siguiente visita, esta se hará antes de que se interrumpa el proceso de muestreo.
- Croquis: se dibujará un croquis de cada sitio, donde se señalarán: caminos, infraestructuras, árboles y otros puntos de referencia, no mostrados en las cartas topográficas, que ayudarán a su localización.
- Fotos: Se recomienda llevar unas fotos recientes del sitio para poder identificarlo con mayor seguridad.
- Observaciones.

La cartera de campo se debe modificar según los requisitos particulares del sitio o del estudio realizado.

Tabla 5. Cartera de campo, hoja 1

CARTERA DE CAMPO	Código Estación:	Fecha:
<p>Nombre de la Estación :</p> <p>Localización de la Estación:</p> <p>Nombre del Operador:</p> <p>Teléfono del Operador:</p> <p>Modo de Desplazamiento:</p> <p>Instrucciones de acceso al sitio:</p> <p>Plantel o Sitio de Emergencia:</p> <p>Numero Telefónico del Jefe o Supervisor:</p> <p>Información de Seguridad:</p>	<p>CROQUIS</p>	

Fuente: Investigación de los autores.

Tabla 6. Cartera de campo, hoja 2

CARTERA DE CAMPO	Código Estación:	Fecha:
<p>Puntos de Toma de Fotos:</p> <p>Equipo Necesario:</p> <p>Numero de Muestras Recogidas:</p> <p>Próxima Visita al sitio:</p> <p>Observaciones:</p>	<p>FOTOS</p>	

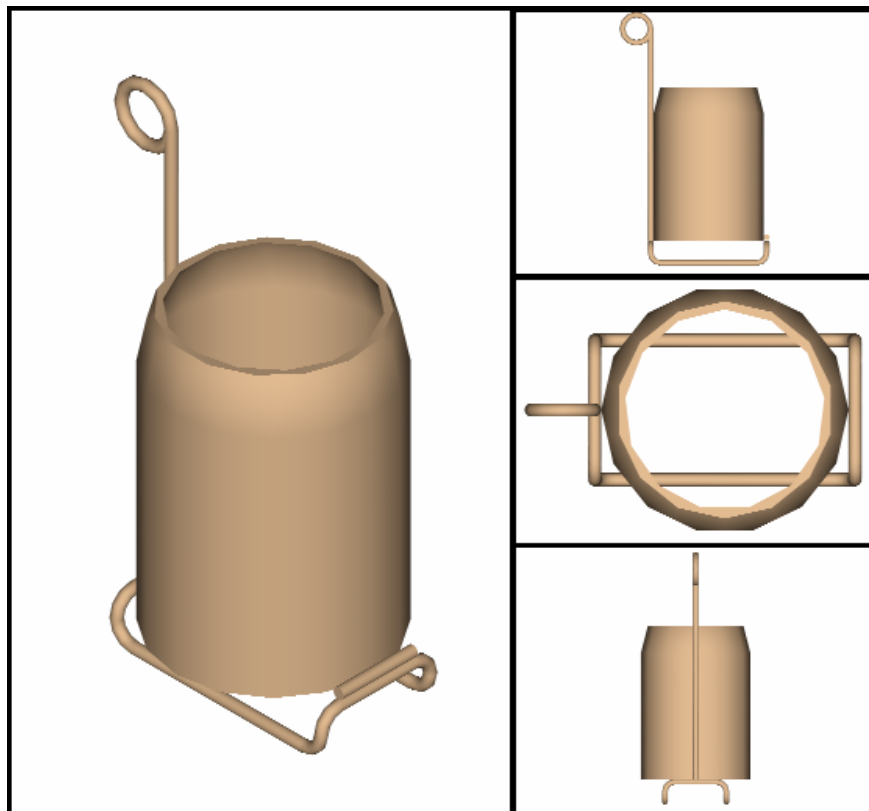
Fuente: Investigación de los autores.

2.2 SELECCIÓN DEL EQUIPO Y ENVASES PARA EL MUESTREO

Este título proporciona la información necesaria para la selección del equipo de recolección de muestras, para poder cumplir con los requerimientos de la calidad de los datos y las condiciones del sitio. La selección del equipo para recolección de muestras depende de las condiciones físicas y de la operación segura del equipo.

2.2.1 Equipo. El equipo más utilizado en la recolección de muestras de agua es el de marco, por su simplicidad y fácil manejo. Este equipo está constituido por un marco o canastilla, y un recolector o botella de boca ancha lo suficientemente grande para obtener la muestra necesaria.

Figura 6. Equipo de muestreo.

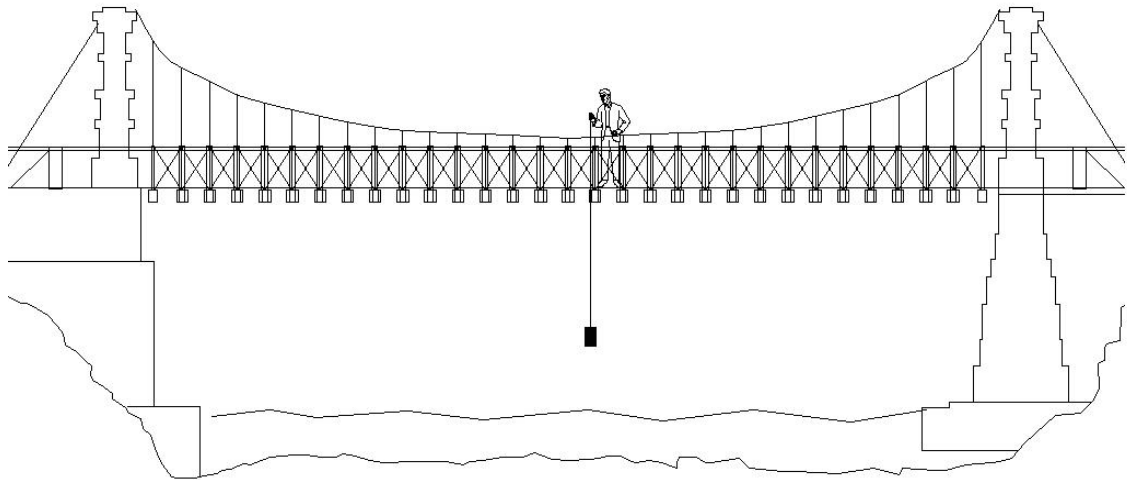


Fuente: Investigación de los autores.

2.2.2 Equipo de muestreo según las condiciones físicas del sitio. Las pautas para seleccionar el equipo de muestreo deben tener en cuenta las situaciones físicas del sitio como son: condiciones del flujo y estructuras de muestreo (puente, teleférico, o barcos) deben ser consideradas al determinar cual equipo de recolección de muestra se va a utilizar.

En el caso de que haya un puente o un teleférico (tarabita) para poder tomar la muestra, el equipo debe ser capaz de tomar la muestra desde esa altura, por lo cual se recomienda un equipo de marco el cual puede bajar el recolector de la muestra con seguridad hasta el punto de muestreo.

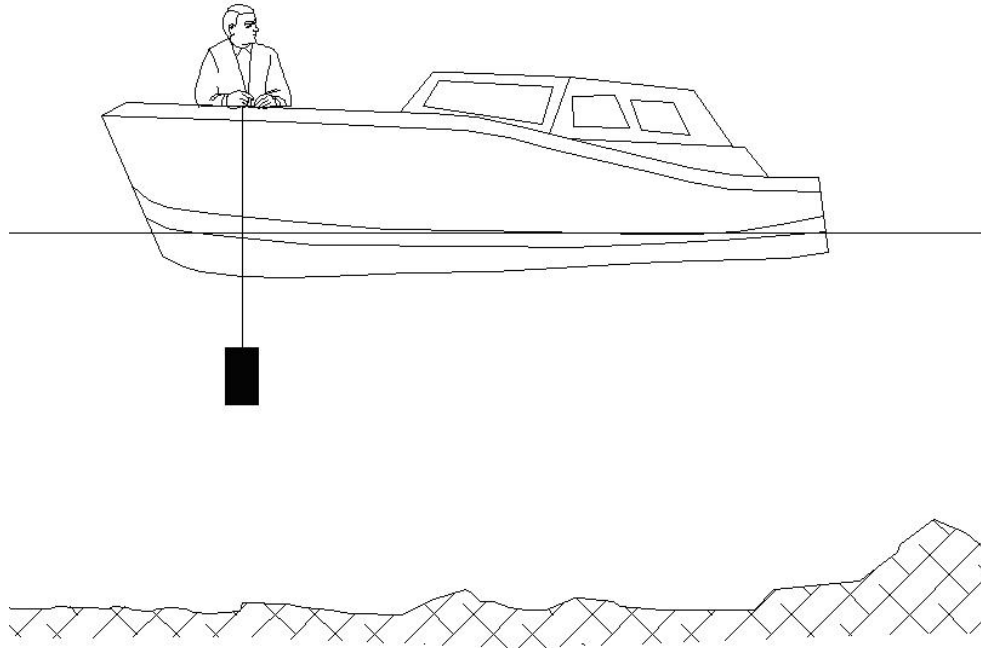
Figura 7. Toma de la muestra desde un puente.



Fuente: Investigación de los autores.

Si en el sitio de muestreo no hay ninguna estructura de muestreo, se tendrá que tomar la muestra directamente del río. En el caso de que el río sea profundo se tendrá que utilizar un bote para poder llegar al punto de muestreo, al igual que el equipo de muestreo para llegar a la profundidad deseada.

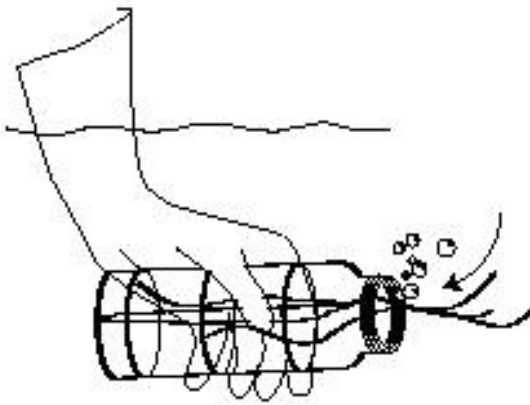
Figura 8. Toma de la muestra desde un bote.



Fuente: Investigación de los autores.

Si el río no es profundo y es seguro atravesarlo se puede tomar la muestra directamente del cauce, sumergiendo el envase de la muestra a la profundidad deseada.

Figura 9. Toma de la muestra directamente



Fuente: U.S Environmental Protection Agency

2.2.3 Envase para la recolección y envío de la muestra. El envase (botella y tapa) debe estar diseñado con materiales que eviten cualquier pérdida por evaporación y difusión o el intercambio de agua con los alrededores.

El envase apropiado para las muestras de isótopos estables debe de ser de polietileno de alta densidad, el cual permite el almacenamiento de la muestra por un periodo de unos meses, en cambio para el almacenamiento de por lo menos una década el envase debe ser de vidrio.

Este envase debe ser de cuello estrecho, ya que son los más recomendados para este tipo de muestras. Estas botellas requieren de contratapas y tapas con cierre positivo.

El tamaño de la muestra depende del laboratorio. Estos volúmenes van de 10-60 ml. En algunos laboratorios, las muestras son tan pequeñas como unos μl . Aunque normalmente son de 50 ml, pero si el almacenamiento es superior a un par de meses, es preferible recoger un volumen mayor.

Asegúrese de pedir envases suficientes, pida botellas extra de muestreo en caso de que existan roturas o contaminaciones en campo.

2.3 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La recolección de las muestras tendrá tres factores importantes que se deben tener en cuenta. El primero y más importante es la salud y la seguridad del personal profesional y técnico que participe, el segundo es la toma de muestras representativas y el tercer factor es el mantenimiento de los archivos de los sitios de muestreo.

La obtención de muestras representativas es de importancia primaria para una descripción exacta del ambiente. Para recoger una muestra representativa que de

la información requerida, los equipos en el proceso de muestreo deben ser mínimos. Además el personal de campo debe estar alerta a las condiciones que podrían comprometer la calidad de la muestra, como es el caso de tomar muestras en zonas donde el agua se encuentre estancada, ya que esto afecta la concentración isotópica debido a la evaporación.

La primera preocupación durante el proceso de muestreo, transporte y almacenamiento es evitar el fraccionamiento isotópico a través de la evaporación, y/o el intercambio isotópico con los alrededores y con el material del envase. Otras causas comunes de la contaminación de la muestra durante la recolección incluyen técnicas pobres de muestreo, el equipo inadecuadamente limpiado, y el uso del equipo construido con los materiales inadecuados para los análisis del estudio.

La contaminación de las muestras puede ser prevenida o ser reducida al mínimo adhiriendo a las buenas prácticas de campo, el uso de las técnicas de muestreo, limpieza del equipo y envases, así como contar con el envase apropiado.

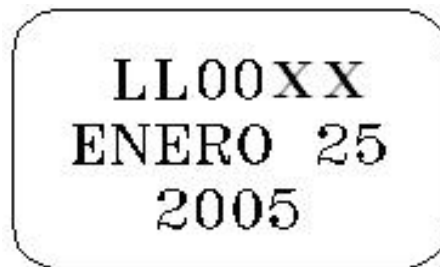
Normalmente, el método de recolección de agua superficial para los ríos y arroyos pequeños puede ser tan simple como la recolección del agua que fluye por encima o por cualquier otra profundidad.

Las muestras de agua de ríos y de arroyos han de extraerse de la zona central del río o de una zona donde fluya el agua. Se debe evitar tomar agua de las márgenes del río, ya que allí el agua no está perfectamente mezclada y puede haber sufrido efectos de evaporación o de contaminación. Este muestreo se realizara por medio del equipo ya escogido para cada sitio.

Se debe llenar el envase de muestreo completamente, siempre y cuando el transporte de las muestra se haga por vía terrestre y si es por vía aérea que no tenga la posibilidad de congelarse durante su transporte de lo contrario se llenara las dos terceras partes del envase.

El envase debe ir marcado individualmente con lápices o marcadores indelebles, debe incluir el código del sitio de muestreo, ubicación, tipo de estación y fecha. La información debe tener una referencia común entre la cartera de campo y el envase.

Figura 10. Etiqueta del envase para el muestreo.



Fuente: Investigación de los autores.

Código: LL00XX. Donde LL significa el tipo de estación de toma de niveles con la que se cuenta en el lugar de muestreo, 00 corresponde al número de inventario de la estación y XX es la sigla de la ubicación de la estación.

Se recogerán dos muestras diariamente, luego se analizará el nivel del agua para cada sitio de muestreo con el fin de determinar el nivel mínimo por semana, este nivel mínimo determinará el día en el cual el río se encontraba con flujo base, a una de las muestras de ese día se le hará el análisis de isótopos estables, para así obtener una muestra semanal de isótopos estables para flujo base.

Es muy importante registrar otros datos químicos y físicos que ayuden a la interpretación, tales como la temperatura del agua, el pH, la alcalinidad, la conductividad eléctrica y otros constituyentes químicos posibles. Dado que no se puede conocer el flujo base de cada semana sino hasta que termine esta, se analizarán los parámetros químicos y físicos en una de las muestras del día del nivel mínimo de la semana.

2.4 SEGURIDAD DEL PERSONAL DE CAMPO

La seguridad del personal de campo es lo más importante y tomando en consideración que las salidas de campo generalmente son en lugares remotos, lejos de atención medica inmediata es recomendable tener las siguientes prevenciones:

- En cualquier tipo de salida de campo siempre se debe ir acompañado, nunca se debe salir solo.
- Se debe notificar al supervisor y a un amigo o familiar de su itinerario y ubicación.
- Determinar la ubicación de los centros de atención medica más cercanos al sitio de muestreo.
- Se debe tener las inmunizaciones apropiadas del personal de campo, se recomiendan vacunas contra el tétano, hepatitis B, fiebre amarilla. Si el personal estará cerca de aguas contaminadas.
- Tomar precauciones contra reptiles e insectos venenosos e inundaciones repentinas.
- Antes de salir a campo, se tiene que averiguar como esta el orden público en el área de muestreo, como y cuando se puede ingresar al sitio sin correr peligro y si se tiene que pedir permiso a alguna persona o grupo en especial.
- Llevar identificación y si es posible un teléfono celular o un radio de comunicaciones.

Se recomienda que se hable con el personal de campo que pudo haber visitado el sitio antes que usted y le pueda dar información valiosa de seguridad. Compruebe

siempre los archivos del sitio de muestreo, la cartera de campo, y toda la información disponible antes de la salida.

3. TOMA DE MUESTRAS EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA

La toma de muestras en la cuenca superior del río Lebrija se está realizando para el estudio de la concentración isotópica del flujo base, ya que es el objetivo principal de este proyecto, además es un componente fundamental para poder realizar la separación del hidrograma.

Dado que en nuestro país no están bien identificadas las estaciones de invierno y verano, por ser un país tropical con diferentes fenómenos ambientales como son el fenómeno del niño y de la niña, se decidió realizar el muestreo durante todo el año y no únicamente durante el supuesto verano, para así poder tener un valor del comportamiento promedio de la concentración isotópica del flujo base en los diferentes meses del año.

Además el muestreo se realiza diariamente en cuatro sitios diferentes donde se escogerá, para cada sitio el nivel mínimo de la semana. A la muestra de ese día de la semana se le tomarán los parámetros químicos y se le harán los análisis de isótopos estables.

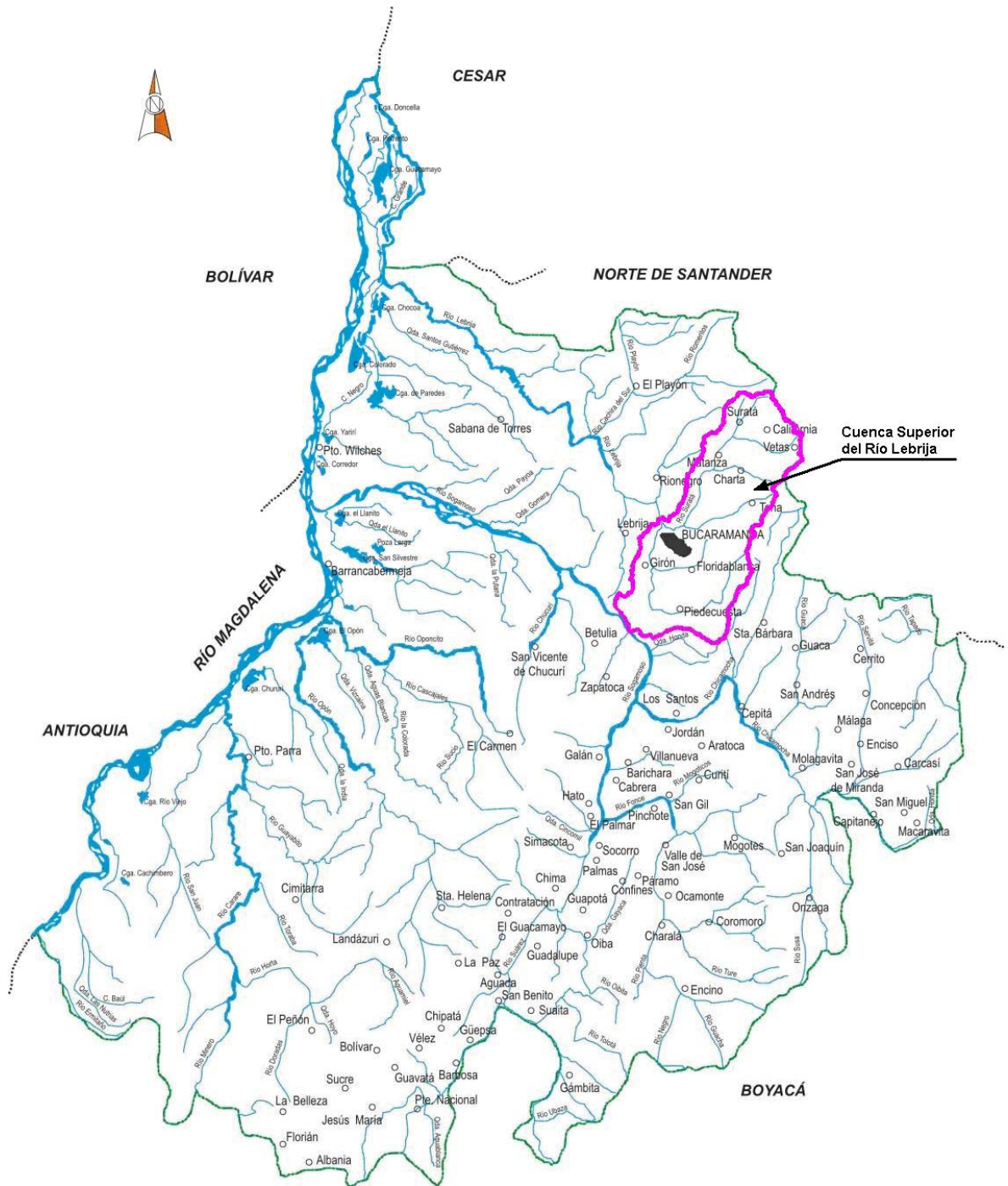
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA

La cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L), constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento de agua para Bucaramanga y toda su área metropolitana. Su superficie alcanza los 1280 km² lo que equivale a una cuenca hidrológica de tamaño medio y abarca alrededor de diez municipios del departamento de Santander.

Geográficamente la Cuenca Superior del Río Lebrija, se encuentra ubicada al nororiente del Departamento de Santander, en la Provincia de Soto, aproximadamente entre los 6°54' y 7°27' de Latitud Norte y 73°15' y 72°15' de Longitud al Oeste de Greenwich. Esta cuenca cuenta con un área de drenaje superficial aguas arriba de la unión entre los ríos Oro y Suratá, en el sitio de Café Madrid. Ver figura 12.

3.1.1 División Política. La cuenca pertenece a la provincia de Soto y hace parte de los siguientes municipios: Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Suratá, California, Vetas, Matanza, Charta y Tona.

Figura 11. Localización geográfica de la Cuenca Superior del Río Lebrija



Fuente: Secretaria de plantación del departamento de Santander, 1995

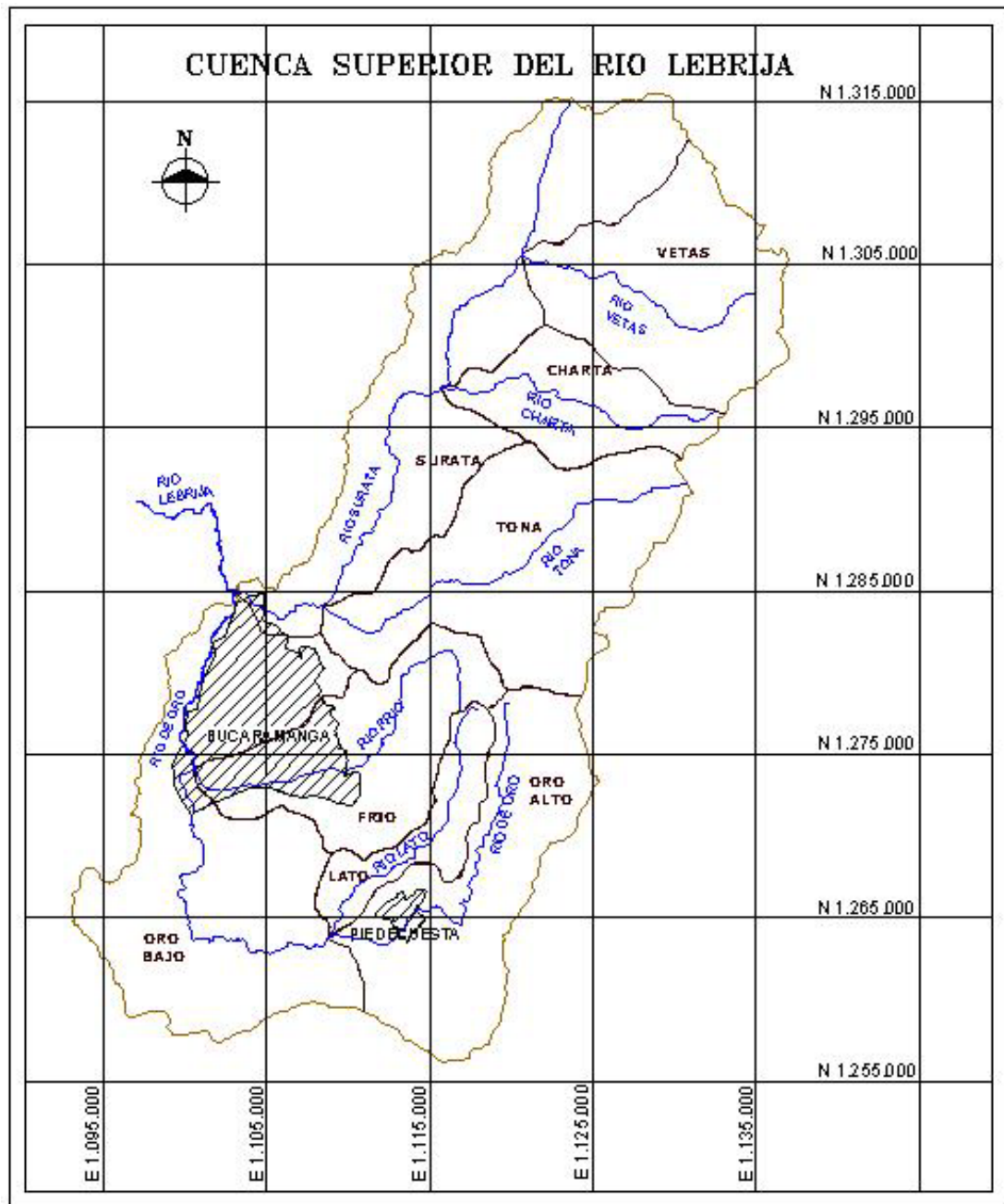
3.1.2 División de la cuenca en subcuencas. La Cuenca Superior del Río Lebrija se encuentra dividida en siete subcuencas hidrográficas que corresponden al área de captación y drenaje natural de sus corrientes principales. Ver tabla 6 y figura 13.

Tabla 7. Subcuencas de la Cuenca Superior del Río Lebrija.

Subcuenca	Corriente Principal	Poblaciones Aledañas	Área Km²
Río Suratá.	Unión de los ríos Suratá, Vetas y Charta.	Suratá, Matanza, Charta.	706
Río Vetas.	Río Vetas.	Vetas.	157
Río Tona.	Río Tona.	Tona y Bucaramanga.	206
Río Lato.	Río Lato.	Piedecuesta.	57
Río de Oro Alto.	Río de Oro.	Piedecuesta.	195
Río de Oro Bajo.	Unión de los ríos de Oro y Latos.	Piedecuesta y Floridablanca.	377
Río Frío.	Río Frío.	Girón y Floridablanca.	127

Fuente: Garzón L y Niño E, 2003.

Figura 12. Subcuencas de la Cuenca Superior del Río Lebrija



Fuente: Garzón L y Niño E, 2003.

3.1.3 Ubicación de los sitios de muestreo. En cada sitio de muestreo se cuenta con una estación de medición de caudal (limnigrafo ó limnimetro), la cual nos proporciona los niveles mínimos de cada semana para el sitio de estudio. Ver tabla 7, 8 y figura 14.

Tabla 8. Información general de los sitios de muestreo

Código	Ciudad	Nombre Estación	Corriente
LG01CM	Bucaramanga	Café Madrid	Río Lebrija
LM02RO	Piedecuesta	Conquistador	Río de Oro
LM03RF	Florida	La Esperanza	Río Frío
LM04MA	Bucaramanga	Majadas	Río Suratá

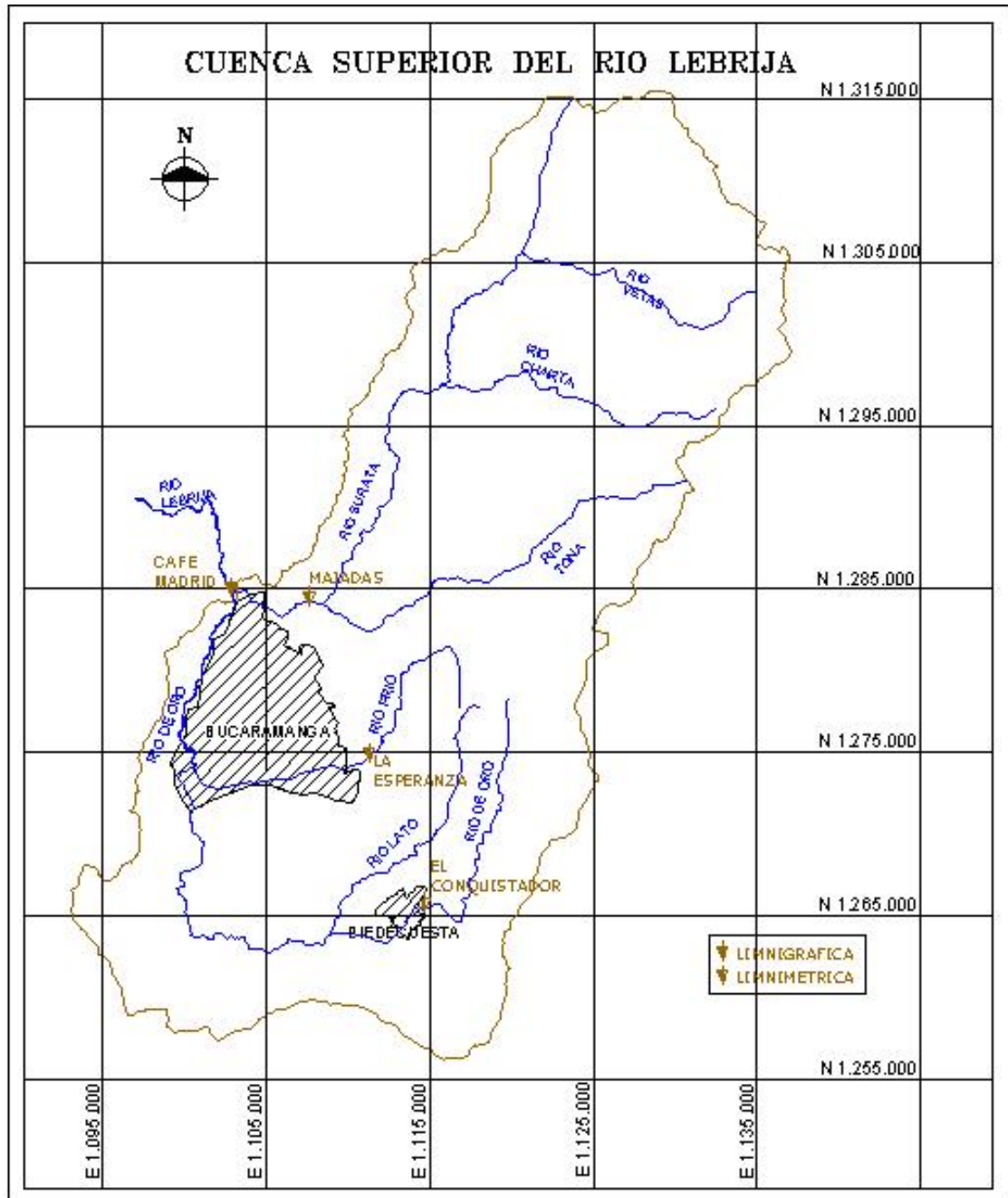
Fuente: Investigación de los autores.

Tabla 9. Información general de las estaciones

Nombre Estación	Tipo	Altitud	Longitud	Latitud	Fecha De Instalación
Café Madrid	LG	600	-73.1333	7.2833	1968/12/15
Conquistador	LM	1000	-73.0333	6.9665	1978/07/15
La Esperanza	LM	1050	-73.0833	7.0666	1977/01/15
Majadas	LM	760	-73.1500	7.1500	2001/10/15

Fuente: Red nacional hidrológica y ambiental, IDEAM

Figura 13. Ubicación de los sitios de muestreo



Fuente: Garzón L y Niño E, 2003.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO

La zona de estudio se divide en dos regiones geológicamente bien diferenciadas, En la zona oriental se presenta un relieve montañoso y pronunciado compuesto por rocas ígneas metamórficas del macizo de Santander, La zona occidental presenta un relieve mas suave que contiene formaciones denominadas “mesas”, correspondientes a depósitos cuaternarios y rocas sedimentarias (Silva N y Vega C, 1981).

3.2.1 Café Madrid (río Lebrija). El área de muestreo se encuentra localizada en el barrio El Túnel, perteneciente a la zona de Café Madrid al norte de la ciudad de Bucaramanga, este sitio de muestreo esta ubicado sobre el río Lebrija a pocos metros aguas abajo de la unión de los cauces de los ríos de Oro y Suratá. Este sitio se encuentra en el cierre de la cuenca superior del río Lebrija, donde este esta representando la zona geológica occidental.

Foto 1. Ubicación del sitio de muestreo, Café Madrid



Este sitio se contaba con un puente colgante, desde el cual se realizaba el muestreo para el análisis de isótopos estables, desafortunadamente este fue destruido por la crecida del Río de Oro del 12 de febrero de 2005, desde entonces se está realizando el muestreo desde una tarabita ubicada en el mismo sitio donde se encontraba el puente.

Por el mismo acontecimiento del 12 de febrero, la estación limnigráfica quedó fuera de servicio, por lo cual se empezó a tomar los niveles a partir de una mira ubicada en el mismo sitio.

Foto 2. Ubicación del sitio de muestreo después del 12/02/2005, Café Madrid



Foto 3. Estación limnimetrica después del 12/02/2005, Café Madrid



3.2.2 El Conquistador (río de Oro). La zona de muestreo del río de oro se encuentra localizado al sur-este del casco urbano de Piedecuesta, este sitio de muestreo se encuentra ubicado sobre el río de Oro, dentro de la subcuenca del río de Oro Alto, a unos metros aguas arriba de la bocatoma del acueducto de Piedecuesta. Esta ubicada geológicamente en el limite entre la zona oriental y occidental, donde esta representando el flujo base que proviene de la zona oriental de la C.S.R.L.

Foto 4. Ubicación del sitio de muestreo, río de Oro



En este sitio no se cuenta con ningún tipo de estación para la toma de niveles del río, por lo cual se tomara como guía, para escoger el día de la semana con menor nivel, la estación limnimetrica (el conquistador), la cual se encuentra ubicada a un kilómetros aguas abajo de el sitio de muestreo.

Foto 5. Estación Limnimetrica (mira), El Conquistador



3.2.3 La Esperanza (río Frío). El área de muestreo de Río Frío se encuentra localizada en la vereda La Judía, al este de Floridablanca, este sitio de muestreo esta ubicado sobre Río Frío, dentro de la subcuenca de Río Frío, en la bocatoma del acueducto de Floridablanca. Esta ubicada geológicamente en el limite entre la zona oriental y occidental, donde esta representando el flujo base que proviene de la zona oriental de la C.S.R.L.

Foto 6. Ubicación del sitio de muestreo, La Esperanza.



Además se contaba con una estación limnimetrica, la cual estaba ubicada aguas arriba de la bocatoma. Debido a la crecida del Río Frío el 2 de mayo de 2005, la cual causo la destrucción de la estación limnimetrica y desde entonces no se cuenta con las lecturas de los niveles del río.

Foto 7. Estación limnimetrica (mira), La Esperanza



3.2.4 Majadas (río Suratá). El área de muestreo de Majadas se encuentra localizada en la vereda Majadas, al nor-este de Bucaramanga, este sitio de muestreo esta ubicado sobre el Río Suratá, dentro de la subcuenca del Río Suratá, aguas abajo de la desembocadura del Río Tona. Esta ubicada geológicamente en el limite entre la zona oriental y occidental, donde esta representando el flujo base que proviene de la zona oriental de la C.S.R.L.

Foto 8. Ubicación del sitio de muestreo, Majadas



Además se cuenta con una estación limnimétrica, la cual se encuentra exactamente en el sitio de muestreo.

Foto 9. Estación limnimétrica (mira), Majadas



Una cartera de campo tipo para los diferentes sitios de muestreo se encuentran en el anexo A.

3.3 DETERMINACIÓN DE LAS MUESTRAS A ANALIZAR Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS

Para poder determinar las muestras a las que se les realizaran los análisis de isótopos estables, se deben escoger los días en los cuales hay flujo base, por lo cual se tienen que analizar los niveles del río de cada semana y escoger de estos el nivel mínimo.

En el caso de los sitios donde no se cuenta con esta información, como La Esperanza, se analizaran los datos de la precipitación de estaciones pluviométricas o pluviográficas cercanas al sitio de muestreo, donde se escogerá el último día de los días de la semana en el cual no haya llovido.

Una vez escogidos los días con menor nivel, se procede a tomar los parámetros químicos de cada uno de los días, los parámetros se le toman a una de las muestras que se tienen por día.

Los parámetros químicos fueron tomados por medio de la sonda de múltiparámetros ELJKELKAMP, esto parámetros son: pH, redox, electroconductividad, salinidad, % salinidad, temperatura.

Foto 10. Sonda multiparametros ELJKELKAMP.



De los parámetros químicos obtenidos durante 6 meses de muestreo de isótopos estables en la cuenca superior del río Lebrija, se observó que las muestras obtenidas del río Lebrija, río Frío y río de Oro presentan un pH promedio entre 6.6 y 6.7, lo que indica un carácter ácido en las aguas de los diferentes ríos estudiados, lo cual no muestra la relación entre el agua lluvia y la escorrentía total, ya que las lluvias presentan un carácter ácido (Camacho y Guzmán, 2005) similar al de los ríos.

Además se observa que las muestras tomadas sobre Café Madrid, presentan los más altos valores promedio de electroconductividad y salinidad, lo cual indica un grado alto de contaminación de sus aguas.

La estación de Majadas presenta el menor valor promedio de Redox, al igual que valores de electroconductividad y salinidad altos, lo cual indica gran cantidad de materia orgánica y cierto grado de contaminación de sus aguas, también es el único de río que presenta un carácter básico en sus aguas. Ver tabla 9.

Tabla 10. Valores de los parámetros químicos promedio

Corriente	pH	Redox (mv)	Elec-cond. (μ s)	Salinidad (mg/l)
río de Oro	6.67	12	83.85	44.73
río Surata	7.03	-3.37	159.13	84
río Frío	6.67	13.61	58.37	31.02
río Lebrija	6.58	19.6	206.86	109.78

Fuente: Investigación de los autores.

La lista de los días escogidos con sus respectivos parámetros químicos para cada sitio de muestreo se encuentra en el anexo B.

4. PREPARATIVOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL HIDROGRAMA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA

Para poder realizar la separación de los componentes del hidrograma por medio de isótopos estables se tiene que tener todos los parámetros necesarios, como son las concentraciones de oxígeno 18 para el flujo base, precipitación y escorrentía total, al igual que la escorrentía total o el hidrograma del evento a estudiar.

Ya que el objetivo del presente proyecto es el muestreo para la determinación de la desviación isotópica del flujo base, se hace necesario conocer la desviación isotópica de los demás parámetros para poder realizar la separación, por lo cual en este capítulo se describe brevemente la metodología de muestreo y la determinación de los demás parámetros, para que así en un futuro se pueda realizar la separación de los componentes del hidrograma en la cuenca superior del río Lebrija.

4.1 MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ISOTÓPICA DE LA PRECIPITACIÓN

La concentración isotópica de la precipitación se determina por medio de un muestreo semanal o quincenalmente, para obtener un valor promedio al mes.

Este valor se calcula por medio de un promedio ponderado donde se tiene en cuenta la cantidad de precipitación con su respectiva concentración isotópica:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (7)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación en mm y δ_i es la desviación isotópica recogida de la precipitación.

Estos sitios de muestreo deben estar localizados dentro de la cuenca o a sus alrededores y a diferentes alturas, para poder tener en cuenta la totalidad de la precipitación que afecta la cuenca. Relacionando las diferentes estaciones y así obtener un promedio mensual de la concentración isotópica de la precipitación

4.2 MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ISOTÓPICA DE LA ESCORRENTÍA TOTAL

Para la determinación de la concentración isotópica de la escorrentía total se deben hacer una serie de muestreos durante el evento a estudiar, estos muestreos se deben realizar con intervalos pequeños de 30 minutos a 1 hora, durante la etapa de ascenso del caudal y durante la curva de recesión estos intervalos pueden ser de 1 a 2 horas (Uhlenbrook S y Frey M, 2002).

El muestreo se realizara en los mismos sitios donde se realizo el muestreo para el flujo base, pero si se desea separar los componentes del hidrograma para la cuenca superior del río Lebrija, el muestreo se ara únicamente en el cierre de la cuenca, que para nuestro caso se encuentra en la estación de café Madrid.

La concentración isotópica de la escorrentía total se tomara puntualmente según el muestreo realizado y no como los demás componentes que toman el promedio mensual. Así se obtendrán una serie de valores de concentración isotópica con su respectivo caudal en un determinado tiempo.

4.3 MEDICIÓN DE LA ESCORRENTÍA TOTAL

Uno de los parámetros indispensables para la separación del hidrograma es el caudal total de salida o la escorrentía total, la cual debe ser medida en un intervalo de tiempo menor a una hora, esta medición se hace por medio de una estación automática.

En la actualidad solo contamos con una estación automática en los sitios de muestreo, la cual se encuentra en café Madrid y es de tipo limnigráfica, con esta estación es suficiente para realizar la separación de los componentes del hidrograma por medio de isótopos estables en la cuenca superior del río Lebrija, pero si se desea realizar la separación en los otros puntos de muestreo, se tiene que tener los datos necesarios de escorrentía total, por lo cual se hace necesario realizar la instalación de una estación automática, para poder obtener estos datos.

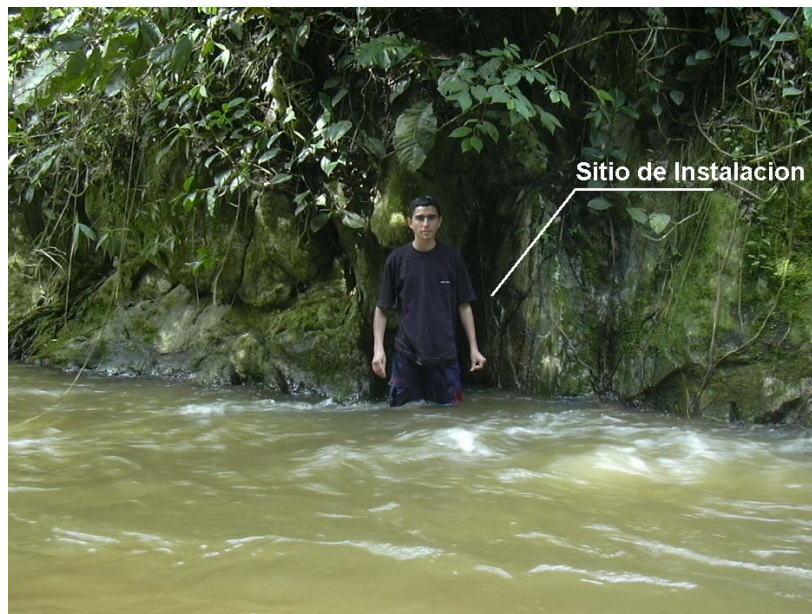
4.3.1 Ubicación De Las Estaciones Automáticas. Las estaciones automáticas que se planean instalar constan de un Diver, el cual trabaja por medio de presiones permitiendo la determinación de los niveles de agua. Estos sitios de instalación se encuentran a lo largo de la cuenca, en tres ríos diferentes. Los cuales son; río de Oro, río Frío y río surata.

Para la elección del sitio de instalación se tienen que tener en cuenta las siguientes características:

- La sección longitudinal del río debe ser de rangos rectos, con contorno inferior uniforme y estable, de manera que las variaciones que tenga la curva de gastos sea razonablemente pequeña.
- En una de las márgenes del río se debe contar con una pared de roca o una roca lo bastante grande para poder anclar la estación a ella, de tal manera que nunca sea destruida por una avenida.

- La estación no debe estar afectada por tomas o desvíos de agua, por lo cual la estación debe situarse aguas arriba de estos, si es posible.
 - El sitio de instalación de la estación tiene que ser en una parte accesible, ya sea por la facilidad de llevar los materiales para la instalación, como por la comodidad de ir a supervisar el funcionamiento de la estación, en cualquier tiempo y bajo cualquier condición.
 - La estación debe ser capaz de medir todo el rango de niveles que puedan ocurrir. la tubería de acceso del agua a la estación debe estar por debajo del nivel mínimo y la posición del barodiver debe quedar siempre arriba del nivel máximo del agua.
- **Río de Oro.** La ubicación de la estación automática de medición de niveles sobre el río de Oro, se hará a unos metros aguas arriba del sitio de muestreo de isótopos estables. Este sitio se encuentra ubicado dentro de la subcuenca del río de Oro Alto, unos metros aguas arriba de la bocatoma del acueducto de Piedecuesta.

Foto 11. Sitio de instalación de la estación automática, río de Oro



- **Río Frío.** El sitio de instalación de la estación esta localizado sobre río Frío, dentro de la subcuenca de Río Frío y aguas arriba de la bocatoma del acueducto de Floridablanca y del sitio de muestreo para isótopos estables.

Foto 12. Sitio de instalación de la estación automática, río Frío



- **Río Suratá.** La ubicación de la estación sobre el río Suratá, se encuentra dentro de la subcuenca del Río Suratá, aguas abajo de la desembocadura del Río Tona y en el mismo sitio de muestreo de isótopos estables y de una estación limnimétrica.

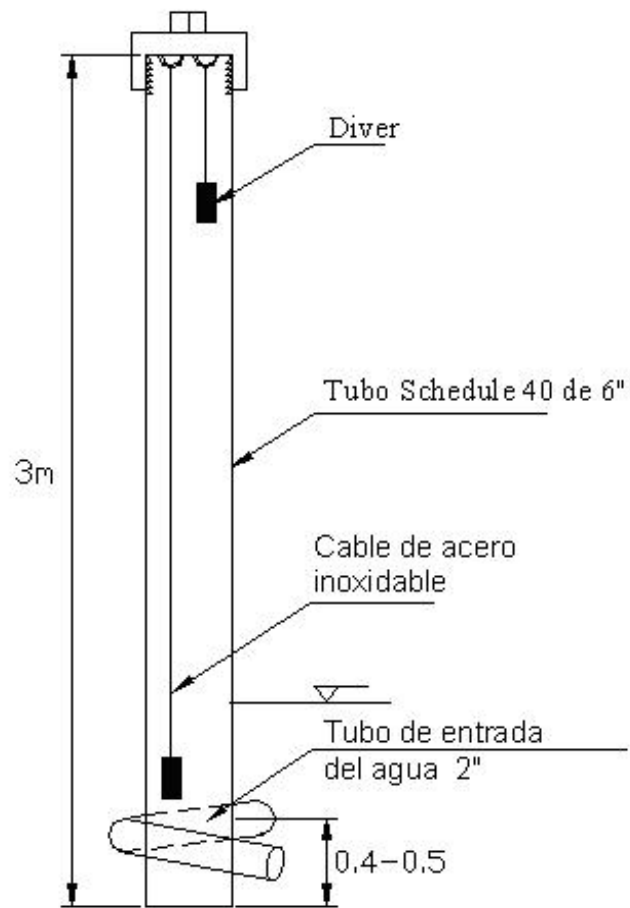
Foto 13. Sitio de instalación de la estación automática, río Suratá



4.3.2 Diseño De La Estación Automática. El diseño de la estación debe cumplir con ciertas características:

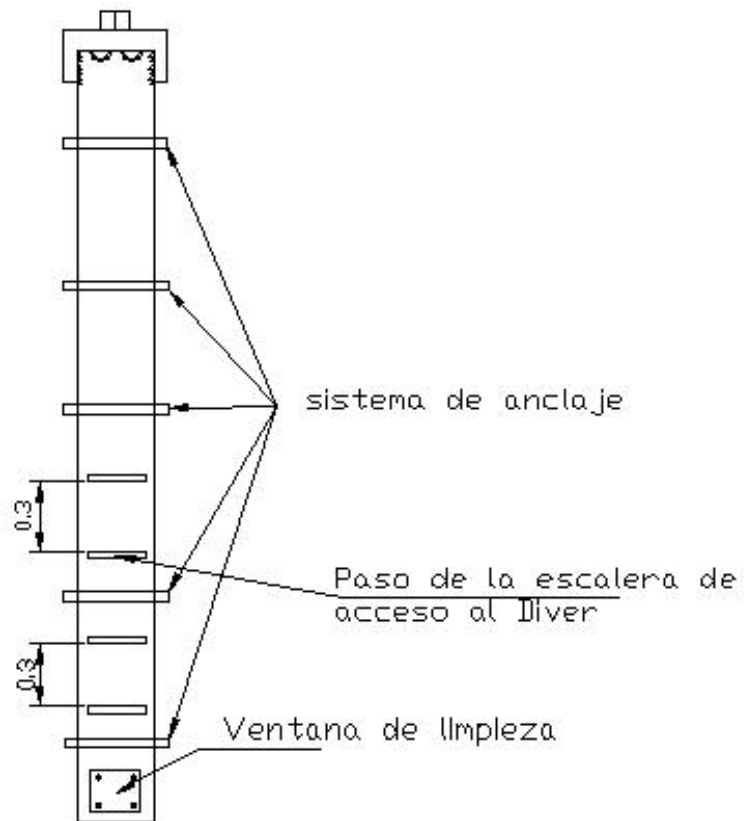
- El diseño debe ser simple y funcional
- Debe tener la suficiente seguridad para evitar vandalismos y el robo de los Diver.
- El sistema de anclaje debe ser seguro, para evitar la pérdida de la estación por una avalancha y debe ser de fácil instalación.
- El modo de acceso al los Diver debe de ser fácil, pero seguro.

Figura 14. Plano general N° 1 de la estación



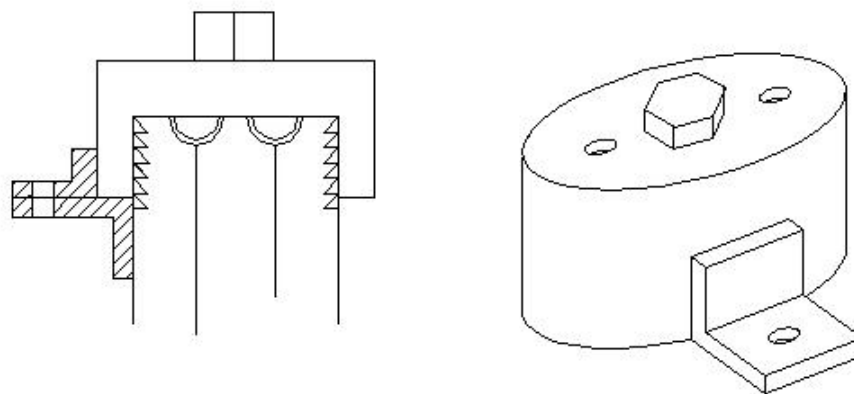
Fuente: Investigación de los autores.

Figura 15. Plano general N° 2 de la estación



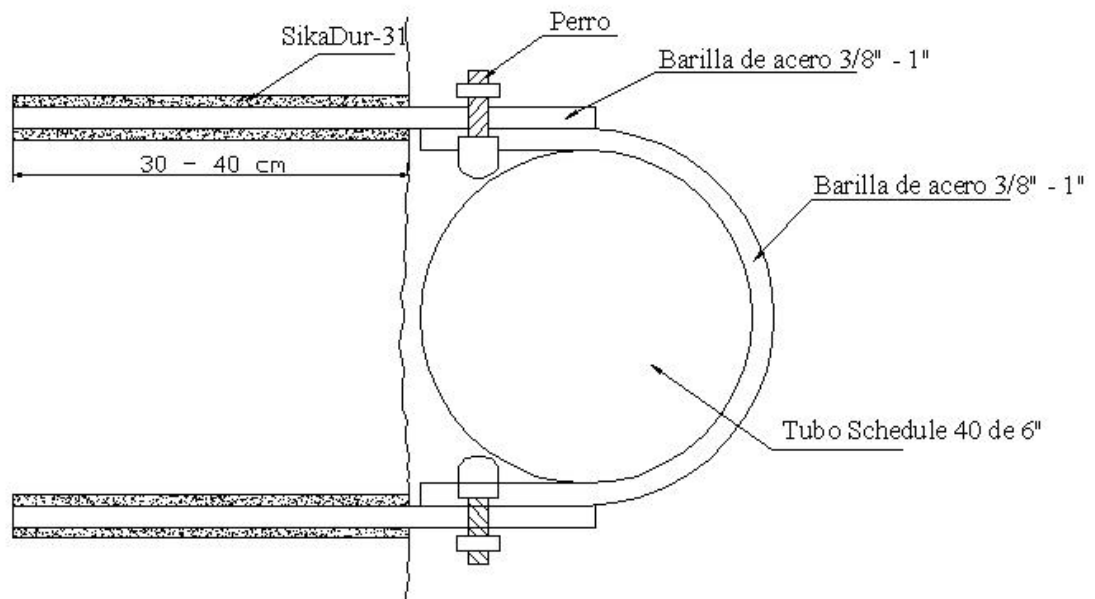
Fuente: Investigación de los autores.

Figura 16. Plano de detalles de la tapa



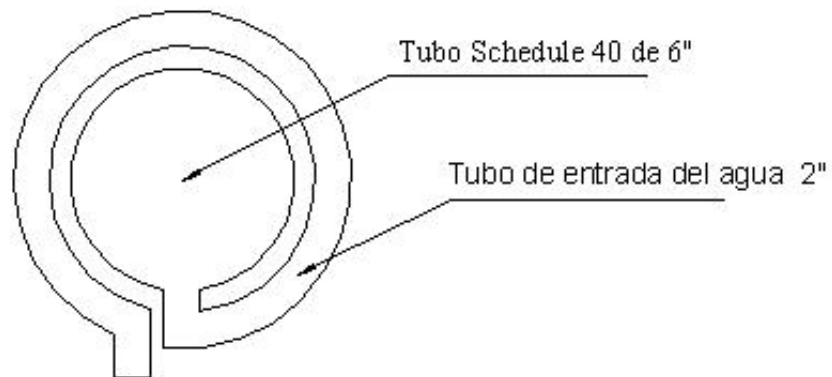
Fuente: Investigación de los autores.

Figura 17. Plano de detalles del anclaje



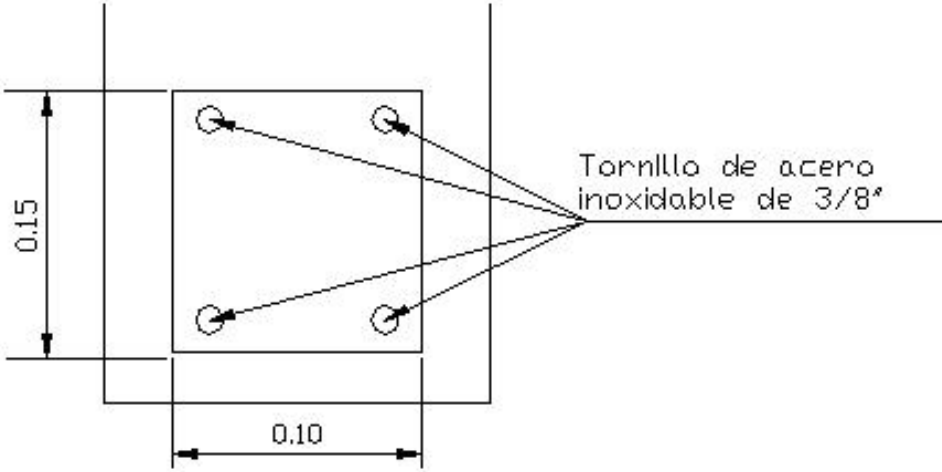
Fuente: Investigación de los autores.

Figura 18. Plano de detalles de la entrada de agua a la estación



Fuente: Investigación de los autores.

Figura 19. Plano de detalles de la ventana de limpieza



Fuente: Investigación de los autores.

Tabla 11. Presupuesto de la estación automática

N°	Descripción	Und	Cant	Vr unitario	Vr total	Proveedor
1	Tubo Schedule 40 de 6"	ml	3	183,000.00	549,000.00	IMR Carrera 15 N° 24-06 tel. 6704502
2	Tapa Galvanizada para un tubo de 6"	und	1	60,000.00	60,000.00	IMR Carrera 15 N° 24-06 tel. 6704502
3	Elaboración e instalación de la tubería curva de 2"	gl			20,000.00	Laminas y Cortes Ltda Cr. 12 N° 24-40 tel. 6338245
4	Galvanizado de la tubería de 2"	und	1	20,000.00	20,000.00	Laminas y Cortes Ltda Cr. 12 N° 24-40 tel. 6338245
5	Elaboración e instalación de las correas	und	3	21,000.00	63,000.00	Laminas y Cortes Ltda Cr. 12 N° 24-40 tel. 6338245
6	Arreglo de la tapa	gl			10,000.00	Laminas y Cortes Ltda Cr. 12 N° 24-40 tel. 6338245
7	Elaboración e instalación de los pasos de las escaleras	und	5	8,000.00	40,000.00	Laminas y Cortes Ltda Cr. 12 N° 24-40 tel. 6338245
8	Elaboración de la ventana de ventilación	und	1	15,000.00	10,000.00	Laminas y Cortes Ltda Cr. 12 N° 24-40 tel. 6338245
9	Tornillos de acero inoxidable de 3/8"	und	4	1,000.00	4,000.00	IMR Carrera 15 N° 24-06 tel. 6704502
10	Guaya de acero inoxidable de 1/4"	ml	3	2,000.00	6,000.00	Almacén Bodega Eléctrica Ltda. Cr. 17 N° 36-20 tel. 6307080
11	Pintura epoxica verde oliva Pintuco	galón	1	90,000.00	90,000.00	Distribuidora Pintuco Av. La rosita N° 17-42 tel. 6526162
12	Wash preiner	galón	0.5	98,400.00	49,200.00	Distribuidora Pintuco Av. La rosita N° 17-42 tel. 6526162
13	Transporte de la estación al sitio de instalación	gl			100,000.00	
14	Mano de obra para la instalación	und	5	24,000.00	120,000.00	
15	Diver	und	2	3,500,000.00	7,000,000.00	Suministrado por la OIEA
Valor Costo directo					8,141,200.00	
Imprevistos 5%					407,060.00	
Valor total por estación					8,548,260.00	

Fuente: Investigación de los autores.

5. APLICACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL HIDROGRAMA

En este trabajo, se aplicó el método de isótopos estables a dos eventos diferentes, el primero fue para los datos recogidos durante una tormenta en la subcuenca central del Río Kentucky al este de Estados Unidos, en el verano de 1995. La segunda se realizó para dos tormentas en la cuenca de Brugga al sur-oeste de Alemania, del 22 al 26 de agosto de 1998. Estas aplicaciones no se realizaron con datos de cuencas Colombianas, debido a que en la actualidad el muestreo realizado no es suficiente para poder realizar la aplicación del método.

5.1 SUBCUENCA CENTRAL DE KENTUCKY

La cuenca del Río Kentucky está ubicada al este de Estados Unidos y subdividida en subcuencas más pequeñas entre las cuales se encuentra la subcuenca central, donde esta subcuenca está caracterizada por su terreno montañoso, su rápida respuesta a la escorrentía superficial y por el lento drenaje del agua subterránea.

5.1.1 Análisis de los datos. Los datos obtenidos de la tormenta son, las desviaciones de Oxígeno 18 y la concentración de dióxido de Silicio para el agua subterránea de flujo lento, flujo rápido, escorrentía superficial y escorrentía total, además de su respectivo hidrograma. Con estos datos se puede realizar la separación del hidrograma para dos y tres componentes.

Además nos proporciona una comprensión del modo de muestreo para la escorrentía total, en el que el intervalo de muestreo para la rama ascendente del hidrograma es menor en comparación con el intervalo de muestreo para la curva de recesión, tanto para el ^{18}O como para el SiO_2 .

También se muestra que el comportamiento de la desviación del ^{18}O y la concentración de SiO_2 para el agua subterránea de flujo lento, flujo rápido, y escorrentía superficial es constante durante el evento, en cambio la concentración de la escorrentía total es variable en el evento.

Tabla 12. Datos respecto al tiempo de la concentración de los trazadores y del hidrograma.

Tiempo (día)	SiO_2 (mg/lit)	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Qt (m3/s)
0,1	4,3	-4,7	3
0,5	4,95	-4,4	10
1	5,63	-4,24	22
2	6,6	-4,28	15
3	7,83	-4,7	8
5	9,11	-5,1	4
10	11,2	-5,8	2
Agua Subterránea (flujo lento)	12	-6	
Lluvia	0,1	-2	
Agua Subterránea (flujo rápido)	3,5	-4,8	

Fuente: Clark y Fritz, 1997

5.1.2 Separación del hidrograma por medio de isótopos estables. Con los datos anteriores se puede realizar la separación del hidrograma en tres componentes, ya que se cuenta con dos trazadores (^{18}O y SiO_2) y las respectivas concentraciones para el agua subsuperficial.

- **Separación del hidrograma en dos componentes.** La separación se realizó utilizando la desviación de ^{18}O , el hidrograma de la tabla 11 y la ecuación 12.

$$Q_o = Q_r \left(\frac{\delta_r - \delta_s}{\delta_o - \delta_s} \right) \quad (12)$$

El calculo tipo, con la desviación de ^{18}O para: $\delta_r = -4.7$, $\delta_s = -2$, $\delta_{GW} = -6$ y con un escorrentía total de $3 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Se obtiene la escorrentía subterránea:

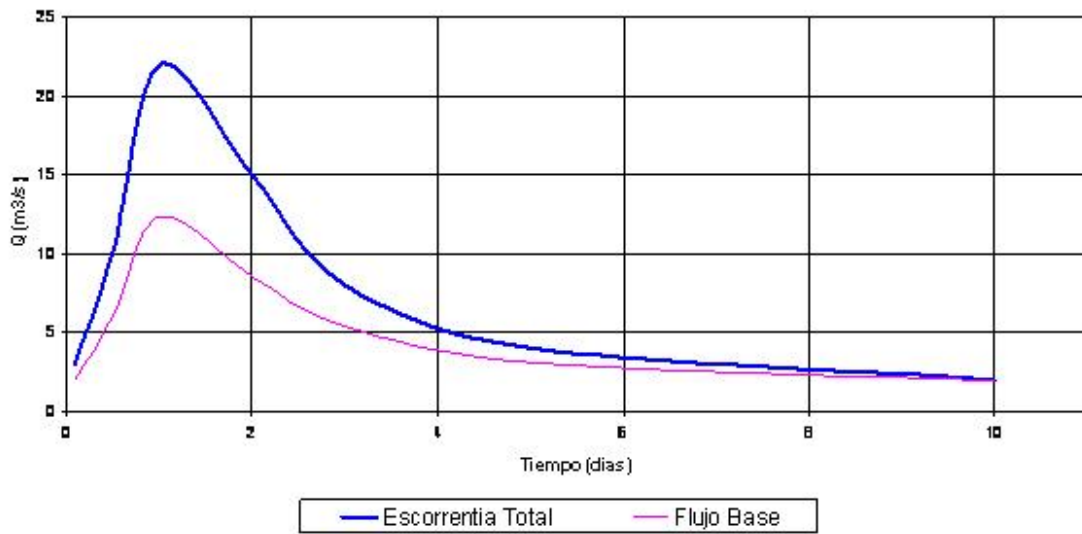
$$Q_{GW} = 3 * \left(\frac{(-4.7) - (-2)}{(-6) - (-2)} \right) = 2.025 m^3 / s$$

Tabla 13. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico

Tiempo (día)	$\delta^{18}O$ ‰	Qt (m ³ /s)	Qgw (m ³ /s)	% gw
0,1	-4,7	3	2,025	67,5
0,5	-4,4	10	6	60
1	-4,24	22	12,32	56
2	-4,28	15	8,55	57
3	-4,7	8	5,4	67,5
5	-5,1	4	3,1	77,5
10	-5,8	2	1,9	95

Fuente: Investigación de los autores

Figura 20. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico



Fuente: Investigación de los autores

Para una mejor comprensión del comportamiento de los componentes del hidrograma y del método de separación, se determino el volumen de cada componente del hidrograma.

- Volumen de la escorrentía total = 5840640 m³
- Volumen del flujo base según Isótopos = 3853008 m³
- % del flujo base según isótopos = 66 %

• **Separación del hidrograma en tres componentes.** Esta separación se realizo utilizando la desviación de ¹⁸O, la concentración de SiO₂, el hidrograma de la tabla 11 y las ecuaciones 13, 14 y 15.

$$Q_T = Q_S + Q_{SB} + Q_{GW} \quad (13)$$

$$Q_S = \frac{Q_T(\delta_T - \delta_{GW}) - Q_{SB}(\delta_{SB} - \delta_{GW})}{\delta_S - \delta_{GW}} \quad (14)$$

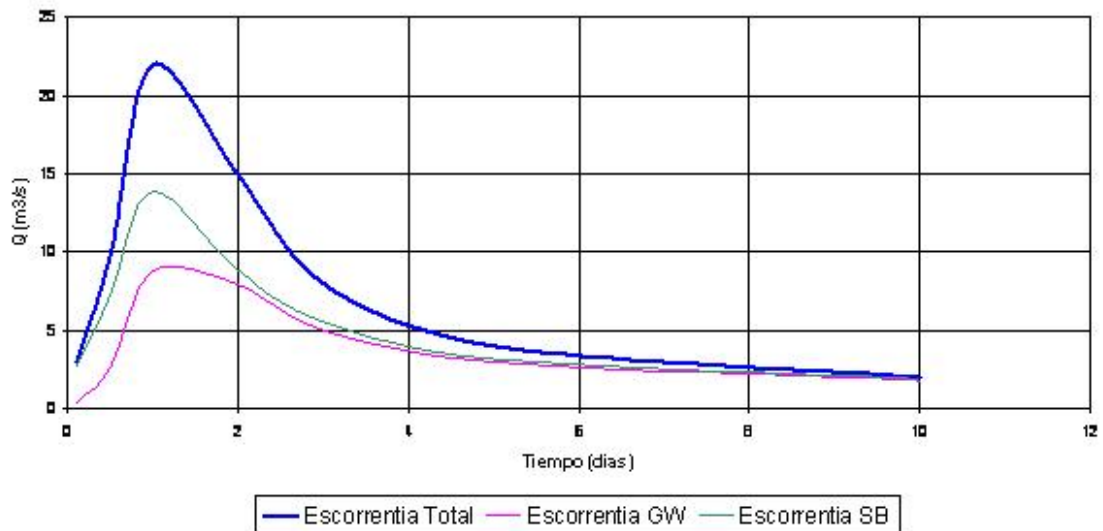
$$Q_{GW} = \frac{Q_T(Si_T - Si_S) - Q_{SB}(Si_{SB} - Si_S)}{Si_{GW} - Si_S} \quad (15)$$

La solución de estas ecuaciones se realizo por medio de una hoja electrónica utilizando la herramienta de búsqueda de objetivo, ya que la solución de estas ecuaciones se debe realizar iterativamente.

Tabla 14. Separación del hidrograma en tres componentes, método isotópico

Tiempo (día)	Qt (m ³ /s)	Q sb (m ³ /s)	Q s (m ³ /s)	Q gw (m ³ /s)	% gw
0,1	3	2,33	0,28	0,39	13,08
0,5	10	4,65	2,61	2,75	27,48
1	22	5,06	8,16	8,78	39,90
2	15	0,86	6,19	7,95	52,98
3	8	0,49	2,45	5,06	63,20
5	4	0,17	0,85	2,98	74,48
10	2	0,08	0,08	1,84	92,09

Figura 21. Separación del hidrograma en tres componentes, método isotópico



Fuente: Investigación de los autores

- Volumen de la escorrentía total = 5840640 m^3
- Volumen del agua subterránea (lenta) según Isótopos = 3323158 m^3
- Volumen del agua subterránea (rápida) según Isótopos = 756929 m^3
- % del agua subterránea (lenta) según isótopos = 57%
- % del agua subterránea (rápida) según isótopos = 13%

5.1.3 Separación Del Hidrograma Por medio del Método de Algoritmo de un parámetro. La separación para este evento se realizó por medio de los métodos de algoritmos, dado que proporcionan una mejor comprensión que los demás métodos, ya que este toma el comportamiento del flujo base similar al del hidrograma y no constante como lo asumen los métodos gráficos y de intervalo.

El primer paso es determinar la constante de recesión K y el flujo base antes del acontecimiento, Una vez establecidos estos valores se procede a realizar la separación por medio del método de algoritmo de un parámetro.

- **Determinación de la constante de recesión K.** Para la determinación de K se debe conocer los datos históricos de varios hidrogramas, para poder realizar la curva maestra de recesión y así calcular la pendiente de esta curva maestra, la cual es K.

Ya que la intención de aplicar este método, es la de conocer el comportamiento de este, para poder realizar una comparación contra el método isotópico. La determinación de la constante K se realiza de forma aproximada por medio de la ecuación de la curva de recesión:

$$Q_n = Q_{n-1} * e^{-t/\tau} = Q_{n-1} * K^t \quad (16)$$

Donde el valor de K obtenido se empieza a variar en la ecuación del método de algoritmo, hasta que la separación en la curva de recesión se aproxime a la escurrentía total y sin que el valor del flujo base supere al de escurrentía total.

El valor de K según la ecuación de la curva de recesión es 0.5.

- **Determinación del flujo base.** La determinación del flujo base se realiza observando los datos anteriores del hidrograma y escogiendo el caudal mínimo antes del acontecimiento. Para nuestro caso es 3 m³/s.

- **Separación del hidrograma en dos componentes.** Una vez determinado los valores de K y del flujo base inicial, se procede a realizar la separación por medio de la ecuación 4

$$Q_o(i) = \frac{k}{2-k} Q_o(i-1) + \frac{1-k}{2-k} Q_T(i) \quad (4)$$

El calculo tipo, con la constante K = 0.5, Q_{o(i-1)} = 3 m³/s y Q_T = 10 m³/s. Se obtiene el flujo base para el tiempo 0.5 días.

Se obtiene el flujo base:

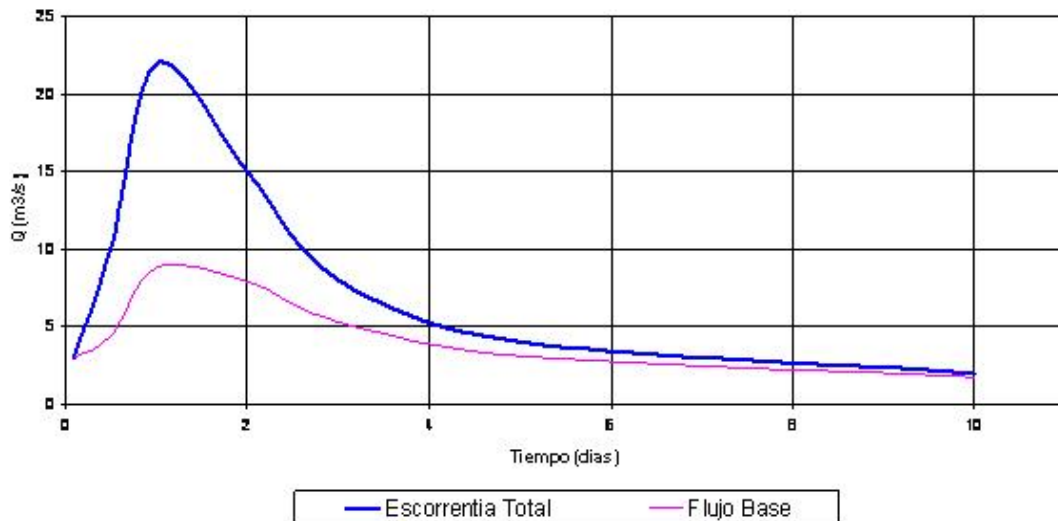
$$Qo(i) = \frac{0.5}{2-0.5} 3 + \frac{1-0.5}{2-0.5} 10 = 4.33 m^3 / s$$

Tabla 15. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo

Tiempo (día)	Qt (m3/s)	Qo (m3/s)	% Qo
0,1	3	3,0	100,0
0,5	10	4,2	41,9
1	22	8,3	37,5
2	15	7,8	52,0
3	8	5,5	69,2
5	4	3,4	85,7
10	2	2,0	99,0

Fuente: Investigación de los autores

Figura 22. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo



Fuente: Investigación de los autores

- Volumen de la escorrentía total = 5840640 m³
- Volumen del flujo base según Algoritmos = 3604881,975 m³
- % del flujo base según Algoritmos = 61,72 %

5.2 CUENCA DE BRUGGA

Esta cuenca tiene un área aproximada de 40 km² y se encuentra localizada al sur del Bosque Negro, al suroeste de Alemania. Cuenta con una topografía montañosa y una elevación entre 434 a 1493 metros sobre el nivel del mar.

5.2.1 Análisis De Los Datos De Concentración Isotópica. Al analizar los datos de la cuenca de Brugga se observó que el modo de muestreo para obtener las concentraciones isotópicas de los componentes del hidrograma, son similares al modo de muestreo utilizado en la cuenca de Kentucky. En el cual el intervalo de muestreo para la rama ascendente del hidrograma es menor en comparación con el intervalo de muestreo para la curva de recesión.

El intervalo de muestreo para la escurrentía total es menor que el utilizado para la cuenca de Kentucky, lo cual es lo aconsejable para la realización del muestreo de este componente, ya que así, se obtiene una buena representación de la concentración isotópica de la escurrentía total. Además el muestreo de la precipitación se realizó para cada una de las tormentas a estudiar, obteniendo así una concentración isotópica promedio para cada una de las precipitaciones y no el promedio mensual de las precipitaciones, lo cual es lo acostumbrado a realizar.

Además los datos presentan algunas inconsistencias, como la falta de datos isotópicos de la escurrentía total, por lo cual se omitieron esos datos para la separación del hidrograma por medio de isótopos estables.

Tabla 16. Datos respecto al tiempo de la concentración isotópica y del hidrograma.

Tiempo	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Qt (m ³ /s)
22/08/1998 15:30	-9,94	0,36
22/08/1998 16:00	-9,75	0,38
22/08/1998 16:30	-9,55	0,43
22/08/1998 17:00	-9,38	0,48
22/08/1998 17:30	-9,53	0,53

Tiempo	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Qt (m3/s)
22/08/1998 18:00	-9,14	0,57
22/08/1998 18:30	-9,10	0,67
22/08/1998 19:00	-9,31	0,76
22/08/1998 19:30	-8,98	0,99
22/08/1998 20:00	-8,47	1,22
22/08/1998 20:30	-8,81	1,85
22/08/1998 21:00	-8,98	2,47
22/08/1998 21:30	-8,78	3,02
22/08/1998 22:00	-8,48	3,56
22/08/1998 23:00	-8,77	4,07
23/08/1998 0:00	-8,73	3,40
23/08/1998 1:00	-8,52	2,62
23/08/1998 5:00	-9,15	1,11
23/08/1998 6:00	-9,08	1,02
23/08/1998 7:00	-9,04	0,92
23/08/1998 8:00	-8,86	0,92
23/08/1998 9:00	-9,38	0,84
23/08/1998 10:00	-9,21	0,76
23/08/1998 12:00	-9,09	0,69
23/08/1998 13:00	-9,22	0,69
23/08/1998 14:00	-9,24	0,63
23/08/1998 15:00	-8,72	0,63
23/08/1998 16:00	-9,12	0,52
23/08/1998 17:00	-8,99	0,57
23/08/1998 18:00	-9,01	0,57
23/08/1998 19:00	-8,99	0,57
23/08/1998 20:00	-9,56	0,57
23/08/1998 21:00	-9,41	0,52
23/08/1998 22:00	-8,74	0,52
23/08/1998 23:00	-9,36	0,52
24/08/1998 0:00	-8,55	0,52
24/08/1998 1:00	-8,57	0,52
24/08/1998 2:00	-8,60	0,52
24/08/1998 3:00	-8,62	0,52
24/08/1998 4:00	-8,55	0,48
24/08/1998 5:00	-8,65	0,48
24/08/1998 6:00	-8,65	0,52
24/08/1998 7:00	-8,75	0,69
24/08/1998 8:00	-8,80	0,84
24/08/1998 9:00	-8,92	1,67
24/08/1998 10:00	-8,96	6,27
24/08/1998 11:00	-9,00	7,95
24/08/1998 11:30	-9,01	7,84

Tiempo	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Qt (m3/s)
24/08/1998 12:00	-9,02	7,73
24/08/1998 12:30	-9,04	7,00
24/08/1998 13:00	-8,90	6,27
24/08/1998 13:30	-8,90	5,71
24/08/1998 14:00	-9,04	5,14
24/08/1998 14:30	-8,93	4,78
24/08/1998 15:00	-8,89	4,42
24/08/1998 15:30	-8,73	4,08
24/08/1998 16:00	-8,83	3,73
24/08/1998 16:30	-8,76	3,48
24/08/1998 17:00	-8,74	3,23
24/08/1998 17:30	-8,90	3,08
24/08/1998 18:00	-8,90	2,92
24/08/1998 18:30	-9,01	2,77
24/08/1998 19:00	-8,88	2,62
24/08/1998 19:30	-9,03	2,48
24/08/1998 20:00	-9,15	2,33
24/08/1998 20:30	-9,16	2,26
24/08/1998 21:00	-9,10	2,19
24/08/1998 21:30	-9,25	2,12
24/08/1998 22:00	-9,21	2,05
24/08/1998 22:30	-9,68	1,99
24/08/1998 23:00	-9,44	1,92
24/08/1998 23:30	-9,39	1,86
25/08/1998 0:00	-9,19	1,79
25/08/1998 0:30	-9,47	1,79
25/08/1998 1:00	-9,62	1,79
25/08/1998 1:30	-9,73	1,73
25/08/1998 2:30	-9,33	1,67
25/08/1998 3:00	-9,32	1,67
25/08/1998 3:30	-9,53	1,61
25/08/1998 4:00	-8,96	1,55
25/08/1998 4:30	-9,41	1,55
25/08/1998 5:00	-9,12	1,55
25/08/1998 5:30	-9,21	1,49
25/08/1998 6:00	-9,37	1,43
25/08/1998 6:30	-9,40	1,38
25/08/1998 7:00	-9,22	1,32
25/08/1998 7:30	-9,13	1,32

Fuente: Uhlenbrook S, Frey M, 2002

Tabla 17. Concentraciones isotópicas de precipitación y flujo base

Cuenca de Brugga	$\delta^{18}\text{O}$ ‰
Tormenta 1	-7.76
Tormenta 2	-6.16
Flujo base	-9.94

Fuente: Uhlenbrook S, Frey M, 2002

5.2.2 Separación Del Hidrograma Por Medio De Isótopos Estables. Una vez depurados los datos se realizó la separación del hidrograma en dos componentes. Ya que no se cuenta con la concentración isotópica del agua subsuperficial ni de otro trazador, para realizar la separación del hidrograma en tres componentes.

La separación se realizó utilizando la desviación de ^{18}O de la tabla 5.5 y 5.6, el hidrograma de la tabla 15 y la ecuación 12.

$$Q_o = Q_T \left(\frac{\delta_T - \delta_s}{\delta_o - \delta_s} \right) \quad (12)$$

El calculo tipo, con la desviación de ^{18}O ; $\delta_T = -9.014$, $\delta_s = -7.76$, $\delta_o = -9.94$ y con una escorrentía total de $0.57 \text{ m}^3/\text{seg}$, se obtiene el flujo base.

$$Q_o = 0.57 * \left(\frac{(-9.014) - (-7.76)}{(-9.94) - (-7.76)} \right) = 0.328 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Tabla 18. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico

Fecha	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Qt (m3/s)	Qo (m3/s)	% Qo
22/08/98 15:30	-9.941	0.36	0.360	100.00
22/08/98 16:00	-9.748	0.38	0.347	91.19
22/08/98 16:30	-9.550	0.43	0.353	82.11
22/08/98 17:00	-9.378	0.48	0.356	74.22
22/08/98 17:30	-9.534	0.525	0.427	81.38
22/08/98 18:00	-9.144	0.57	0.362	63.49

Fecha	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Qt (m3/s)	Qo (m3/s)	% Qo
22/08/98 18:30	-9.101	0.665	0.409	61.51
22/08/98 19:00	-9.305	0.76	0.539	70.87
22/08/98 19:30	-8.979	0.99	0.554	55.92
22/08/98 20:00	-8.465	1.22	0.395	32.34
22/08/98 20:30	-8.814	1.845	0.892	48.35
22/08/98 21:00	-8.983	2.47	1.386	56.10
22/08/98 21:30	-8.784	3.015	1.416	46.97
22/08/98 22:00	-8.483	3.56	1.181	33.17
22/08/98 23:00	-8.773	4.07	1.891	46.47
23/08/98 00:00	-8.733	3.4	1.518	44.63
23/08/98 01:00	-8.520	2.62	0.913	34.86
23/08/98 05:00	-9.153	1.11	0.709	63.90
23/08/98 06:00	-9.083	1.02	0.619	60.69
23/08/98 07:00	-9.036	0.92	0.538	58.53
23/08/98 08:00	-8.859	0.92	0.464	50.41
23/08/98 09:00	-9.380	0.84	0.624	74.31
23/08/98 10:00	-9.212	0.76	0.506	66.61
23/08/98 12:00	-9.092	0.69	0.422	61.10
23/08/98 13:00	-9.221	0.69	0.462	67.02
23/08/98 14:00	-9.235	0.63	0.426	67.66
23/08/98 15:00	-8.719	0.63	0.277	43.99
23/08/98 16:00	-9.116	0.52	0.323	62.20
23/08/98 17:00	-8.988	0.57	0.321	56.33
23/08/98 18:00	-9.014	0.57	0.328	57.52
23/08/98 19:00	-8.992	0.57	0.322	56.51
23/08/98 20:00	-9.563	0.57	0.471	82.71
23/08/98 21:00	-9.413	0.52	0.394	75.83
23/08/98 22:00	-8.740	0.52	0.234	44.95
23/08/98 23:00	-9.362	0.52	0.382	73.49
24/08/98 00:00	-8.554	0.52	0.189	36.42
24/08/98 01:00	-8.570	0.52	0.332	63.76
24/08/98 02:00	-8.600	0.52	0.336	64.55
24/08/98 03:00	-8.620	0.52	0.338	65.08
24/08/98 04:00	-8.550	0.48	0.303	63.23
24/08/98 05:00	-8.650	0.48	0.316	65.87
24/08/98 06:00	-8.650	0.52	0.343	65.87
24/08/98 07:00	-8.750	0.69	0.473	68.52
24/08/98 08:00	-8.800	0.84	0.587	69.84
24/08/98 09:00	-8.920	1.67	1.219	73.02
24/08/98 10:00	-8.960	6.27	4.644	74.07
24/08/98 11:00	-9.000	7.95	5.973	75.13
24/08/98 11:30	-9.010	7.84	5.911	75.40
24/08/98 12:00	-9.020	7.73	5.849	75.66

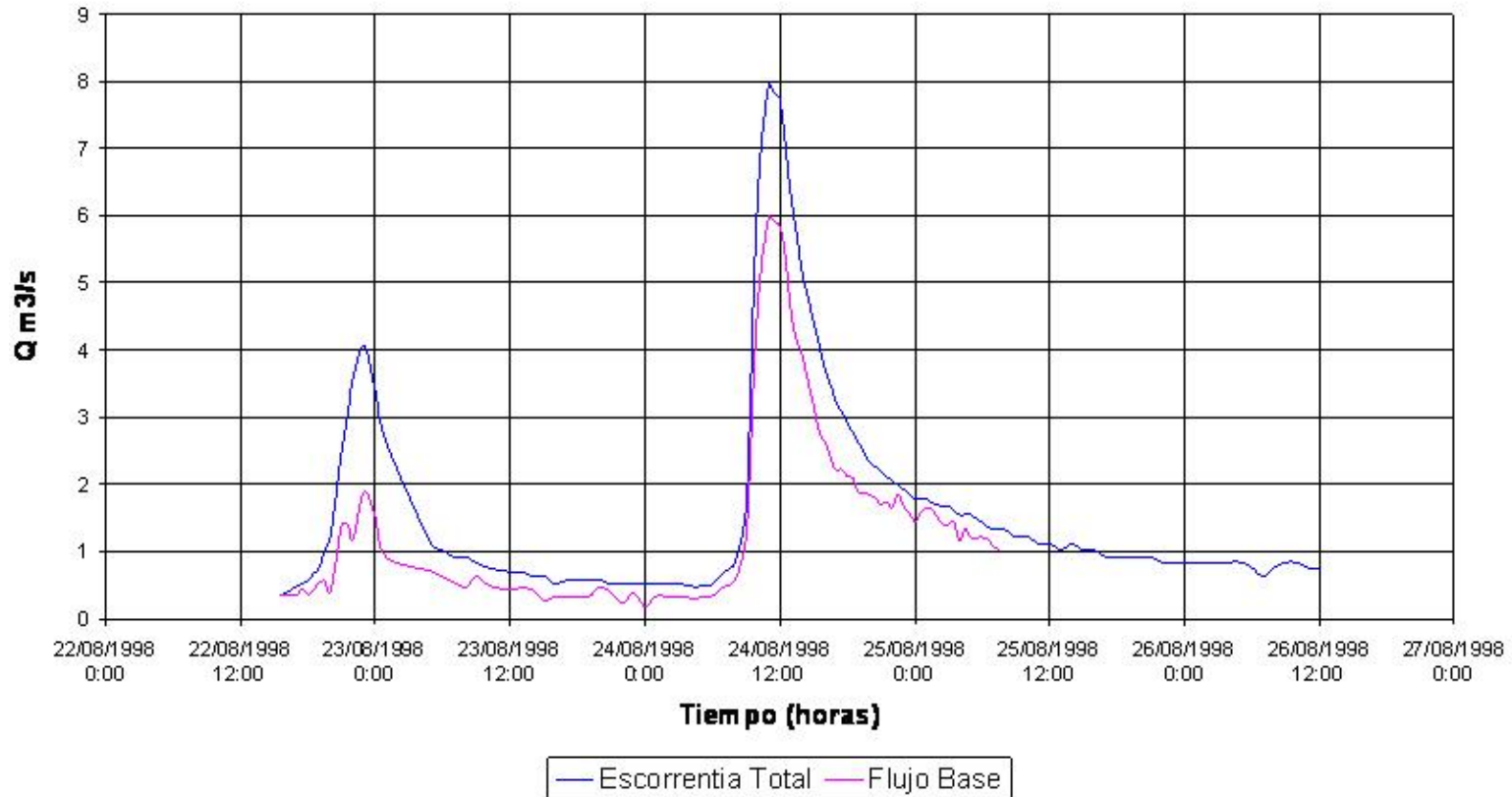
Fecha	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Qt (m3/s)	Qo (m3/s)	% Qo
24/08/98 12:30	-9.043	7	5.340	76.28
24/08/98 13:00	-8.899	6.27	4.544	72.46
24/08/98 13:30	-8.897	5.705	4.131	72.40
24/08/98 14:00	-9.044	5.14	3.922	76.31
24/08/98 14:30	-8.935	4.78	3.509	73.40
24/08/98 15:00	-8.890	4.42	3.192	72.21
24/08/98 15:30	-8.729	4.075	2.770	67.97
24/08/98 16:00	-8.832	3.73	2.637	70.69
24/08/98 16:30	-8.757	3.48	2.391	68.69
24/08/98 17:00	-8.745	3.23	2.208	68.37
24/08/98 17:30	-8.898	3.075	2.227	72.43
24/08/98 18:00	-8.897	2.92	2.114	72.41
24/08/98 18:30	-9.010	2.77	2.088	75.40
24/08/98 19:00	-8.876	2.62	1.883	71.85
24/08/98 19:30	-9.030	2.475	1.879	75.93
24/08/98 20:00	-9.153	2.33	1.845	79.17
24/08/98 20:30	-9.161	2.26	1.794	79.39
24/08/98 21:00	-9.099	2.19	1.703	77.74
24/08/98 21:30	-9.253	2.12	1.734	81.82
24/08/98 22:00	-9.215	2.05	1.657	80.82
24/08/98 22:30	-9.681	1.985	1.849	93.15
24/08/98 23:00	-9.437	1.92	1.665	86.70
24/08/98 23:30	-9.394	1.855	1.587	85.56
25/08/98 00:00	-9.193	1.79	1.436	80.25
25/08/98 00:30	-9.468	1.79	1.567	87.52
25/08/98 01:00	-9.624	1.79	1.641	91.65
25/08/98 01:30	-9.729	1.73	1.633	94.42
25/08/98 02:30	-9.329	1.67	1.400	83.85
25/08/98 03:00	-9.320	1.67	1.396	83.61
25/08/98 03:30	-9.531	1.61	1.436	89.18
25/08/98 04:00	-8.958	1.55	1.147	74.02
25/08/98 04:30	-9.413	1.55	1.334	86.07
25/08/98 05:00	-9.118	1.55	1.213	78.26
25/08/98 05:30	-9.210	1.49	1.202	80.68
25/08/98 06:00	-9.367	1.43	1.213	84.83
25/08/98 06:30	-9.402	1.375	1.179	85.78
25/08/98 07:00	-9.224	1.32	1.070	81.06
25/08/98 07:30	-9.131	1.32	1.037	78.59

Fuente: Investigación de los autores

El volumen calculado para los componentes del hidrograma de esta cuenca, se estimaron únicamente hasta el tiempo en el cual se cuentan con datos isotópicos.

- Volumen de la escorrentía total = 417168 m^3
- Volumen del flujo base según Isótopos = $281538,61 \text{ m}^3$
- % del flujo base según isótopos = $67,5 \%$

Figura 23. Separación del hidrograma en dos componentes, método isotópico



Fuente: Investigación de los autores

5.2.3 Separación Del Hidrograma Por medio del Método de Algoritmo de un parámetro. El primer paso que se debe hacer es determinar la constante de recesión K y el flujo base antes del acontecimiento, Una vez establecidos estos valores se procede a realizar la separación por medio del método de algoritmo de un parámetro.

- **Determinación de la constante de recesión K.** Ya que la intención de aplicar este método, es el de conocer el comportamiento de este, para poder realizar una comparación contra el método isotópico. La determinación de la constante K se realiza de forma similar a la determinada en la cuenca de Kentucky. Donde el valor de K según la ecuación de la curva de recesión es 0.93

- **Determinación del flujo base.** La determinación del flujo base se realiza observando los datos anteriores del hidrograma y escogiendo el caudal mínimo antes del acontecimiento. Para nuestro caso es $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$.

- **Separación del hidrograma en dos componentes.** Una vez determinado los valores de K y del flujo base inicial, se procede a realizar la separación por medio de la ecuación 4.

$$Q_o(i) = \frac{k}{2-k} Q_o(i-1) + \frac{1-k}{2-k} Q_T(i) \quad (4)$$

El calculo tipo, con la constante $K = 0.93$, $Q_o(i-1) = 0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_T = 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$. Se obtiene el flujo base para el tiempo 16:00:00 del día 22/08/1998.

$$Q_o(i) = \frac{0.93}{2-0.93} 0.36 + \frac{1-0.93}{2-0.93} 0.38 = 0.338 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Tabla 19. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo

Tiempo	$Q_T(m^3/s)$	$Q_O(m^3/s)$	% Q_O
22/08/1998 15:30	0,36	0,36	100,00
22/08/1998 16:00	0,38	0,33	87,50
22/08/1998 16:30	0,43	0,31	72,91
22/08/1998 17:00	0,48	0,30	62,83
22/08/1998 17:30	0,53	0,30	56,24
22/08/1998 18:00	0,57	0,29	51,51
22/08/1998 18:30	0,67	0,30	45,10
22/08/1998 19:00	0,76	0,31	41,17
22/08/1998 19:30	0,99	0,34	34,58
22/08/1998 20:00	1,22	0,39	31,61
22/08/1998 20:30	1,85	0,47	25,61
22/08/1998 21:00	2,47	0,60	24,12
22/08/1998 21:30	3,02	0,74	24,65
22/08/1998 22:00	3,56	0,91	25,59
22/08/1998 23:00	4,07	1,09	26,85
23/08/1998 0:00	3,40	1,19	35,03
23/08/1998 1:00	2,62	1,21	46,19
23/08/1998 5:00	1,11	1,10	99,49
23/08/1998 6:00	1,02	1,01	98,84
23/08/1998 7:00	0,92	0,92	99,94
23/08/1998 8:00	0,92	0,85	91,86
23/08/1998 9:00	0,84	0,78	92,43
23/08/1998 10:00	0,76	0,71	93,72
23/08/1998 12:00	0,69	0,65	94,62
23/08/1998 13:00	0,69	0,60	87,40
23/08/1998 14:00	0,63	0,56	88,33
23/08/1998 15:00	0,63	0,52	82,13
23/08/1998 16:00	0,52	0,48	91,49
23/08/1998 17:00	0,57	0,44	78,05
23/08/1998 18:00	0,57	0,42	73,51
23/08/1998 19:00	0,57	0,40	69,71
23/08/1998 20:00	0,57	0,38	66,52
23/08/1998 21:00	0,52	0,36	69,21
23/08/1998 22:00	0,52	0,34	66,10
23/08/1998 23:00	0,52	0,33	63,50
24/08/1998 0:00	0,52	0,32	61,31
24/08/1998 1:00	0,52	0,31	59,48
24/08/1998 2:00	0,52	0,30	57,95
24/08/1998 3:00	0,52	0,29	56,66
24/08/1998 4:00	0,48	0,29	59,54
24/08/1998 5:00	0,48	0,28	58,00
24/08/1998 6:00	0,52	0,28	52,97

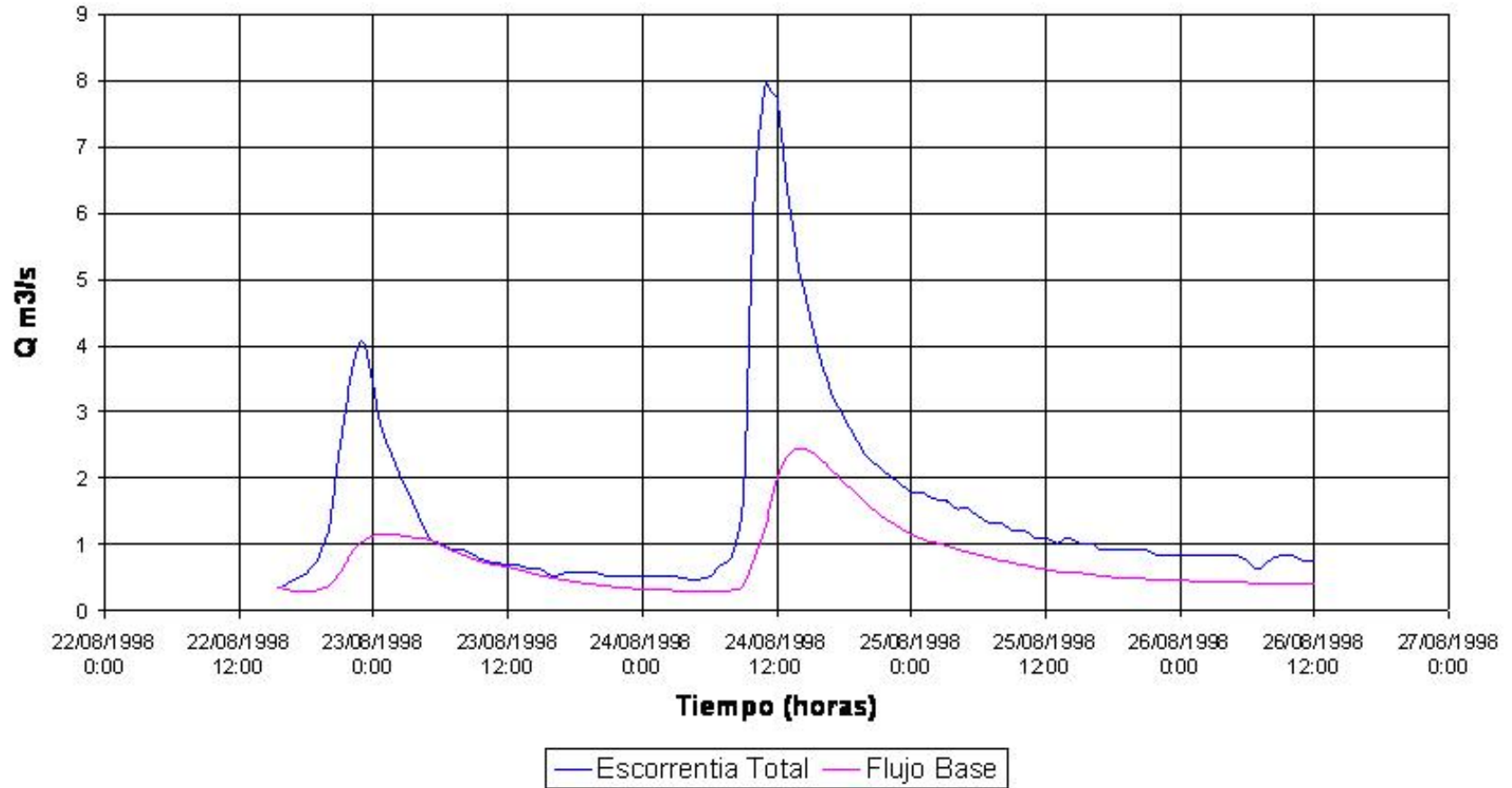
Tiempo	Q_T(m³/s)	Q_O (m³/s)	% Q_O
24/08/1998 7:00	0,69	0,29	41,55
24/08/1998 8:00	0,84	0,31	36,70
24/08/1998 9:00	1,67	0,39	23,56
24/08/1998 10:00	6,27	0,84	13,35
24/08/1998 11:00	7,95	1,34	16,91
24/08/1998 11:30	7,84	1,76	22,46
24/08/1998 12:00	7,73	2,10	27,19
24/08/1998 12:30	7,00	2,33	33,25
24/08/1998 13:00	6,27	2,46	39,21
24/08/1998 13:30	5,71	2,52	44,21
24/08/1998 14:00	5,14	2,53	49,22
24/08/1998 14:30	4,78	2,51	52,45
24/08/1998 15:00	4,42	2,46	55,64
24/08/1998 15:30	4,08	2,39	58,67
24/08/1998 16:00	3,73	2,31	61,82
24/08/1998 16:30	3,48	2,21	63,63
24/08/1998 17:00	3,23	2,12	65,55
24/08/1998 17:30	3,08	2,02	65,81
24/08/1998 18:00	2,92	1,93	66,18
24/08/1998 18:30	2,77	1,84	66,57
24/08/1998 19:00	2,62	1,76	67,08
24/08/1998 19:30	2,48	1,67	67,61
24/08/1998 20:00	2,33	1,59	68,29
24/08/1998 20:30	2,26	1,52	67,10
24/08/1998 21:00	2,19	1,45	66,13
24/08/1998 21:30	2,12	1,39	65,36
24/08/1998 22:00	2,05	1,33	64,74
24/08/1998 22:30	1,99	1,27	64,13
24/08/1998 23:00	1,92	1,22	63,67
24/08/1998 23:30	1,86	1,17	63,33
25/08/1998 0:00	1,79	1,13	63,10
25/08/1998 0:30	1,79	1,09	60,98
25/08/1998 1:00	1,79	1,06	59,20
25/08/1998 1:30	1,73	1,03	59,44
25/08/1998 2:30	1,67	1,00	59,70
25/08/1998 3:00	1,67	0,97	58,13
25/08/1998 3:30	1,61	0,94	58,63
25/08/1998 4:00	1,55	0,92	59,14
25/08/1998 4:30	1,55	0,89	57,66
25/08/1998 5:00	1,55	0,87	56,42
25/08/1998 5:30	1,49	0,85	57,29
25/08/1998 6:00	1,43	0,83	58,12
25/08/1998 6:30	1,38	0,81	58,76
25/08/1998 7:00	1,32	0,78	59,39

Tiempo	Q_T(m³/s)	Q_O (m³/s)	% Q_O
25/08/1998 7:30	1,32	0,76	57,87
25/08/1998 8:00	1,32	0,75	56,60
25/08/1998 8:30	1,27	0,73	57,40
25/08/1998 9:00	1,22	0,71	58,17
25/08/1998 9:30	1,22	0,69	56,85
25/08/1998 10:00	1,22	0,68	55,74
25/08/1998 10:30	1,17	0,66	57,02
25/08/1998 11:00	1,11	0,65	58,25
25/08/1998 11:30	1,11	0,63	56,92
25/08/1998 12:00	1,11	0,62	55,80
25/08/1998 12:30	1,07	0,61	56,84
25/08/1998 13:00	1,02	0,59	57,83
25/08/1998 13:30	1,07	0,58	54,52
25/08/1998 14:00	1,11	0,58	51,93
25/08/1998 14:30	1,07	0,57	53,46
25/08/1998 15:00	1,02	0,56	54,88
25/08/1998 15:30	1,02	0,55	54,09
25/08/1998 16:00	1,02	0,54	53,43
25/08/1998 16:30	0,97	0,54	55,18
25/08/1998 17:00	0,92	0,52	56,86
25/08/1998 17:30	0,92	0,51	55,75
25/08/1998 18:00	0,92	0,50	54,82
25/08/1998 18:30	0,92	0,50	54,04
25/08/1998 19:00	0,92	0,49	53,39
25/08/1998 19:30	0,92	0,49	52,84
25/08/1998 20:00	0,92	0,48	52,38
25/08/1998 21:00	0,92	0,48	51,99
25/08/1998 22:00	0,84	0,47	55,82
25/08/1998 23:00	0,84	0,46	54,88
26/08/1998 0:00	0,84	0,45	54,09
26/08/1998 1:00	0,84	0,45	53,43
26/08/1998 2:00	0,84	0,44	52,87
26/08/1998 3:00	0,84	0,44	52,41
26/08/1998 4:00	0,84	0,44	52,02
26/08/1998 5:00	0,84	0,43	51,69
26/08/1998 6:00	0,76	0,43	55,98
26/08/1998 7:00	0,63	0,41	64,70
26/08/1998 8:00	0,76	0,40	53,04
26/08/1998 9:00	0,84	0,41	48,32
26/08/1998 10:00	0,84	0,41	48,59
26/08/1998 11:00	0,76	0,40	53,10
26/08/1998 12:00	0,76	0,40	52,60

Fuente: Investigación de los autores.

- Volumen de la escorrentía total = 417168 m^3
- Volumen del flujo base según Algoritmos = $205066,362 \text{ m}^3$
- % del flujo base según Algoritmos = 49%

Figura 24. Separación del hidrograma en dos componentes, método de Algoritmo



Fuente: Investigación de los autores.

5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la separación de los dos componentes del hidrograma usando ^{18}O , se observa que el flujo base domina la descarga pico, además presenta un comportamiento similar al del hidrograma, en donde el flujo base aumenta a medida que aumenta la escorrentía total. También se puede concluir que el aporte del flujo base es mayor que el del agua superficial en los eventos, tanto en la subcuenca central de Kentucky como en la cuenca de Brugga. Lo cual da como resultado, que el componente que presenta el mayor aporte al hidrograma es el flujo base. Ver tabla 20.

Tabla 20. Volumen de los dos componentes del hidrograma, Método Isotópico.

Cuenca	Componentes	% Volumen Total
Kentucky	Escorrentía Superficial	34
	Flujo Base	66
Brugga	Escorrentía Superficial	32.5
	Flujo Base	67.5

Fuente: Investigación de los autores.

En la separación de los tres componentes del hidrograma usando ^{18}O y SiO_2 , en la subcuenca central de Kentucky, se puede apreciar que el volumen del agua subterránea de flujo lento es el 57% de la escorrentía total y que sigue siendo el componente que presenta el mayor aporte al hidrograma. Además el agua subterránea de flujo rápido aporta un volumen considerable de agua al hidrograma, por lo cual este componente no deja de ser importante en el comportamiento del hidrograma. Ver tabla 21.

Tabla 21. Volumen de los tres componentes del hidrograma, Método Isotópico.

Cuenca	Componentes	% Volumen Total
Kentucky	Escoorrentía Superficial	30
	Flujo Subterráneo	57
	Flujo Subsuperficial	13

Fuente: Investigación de los autores.

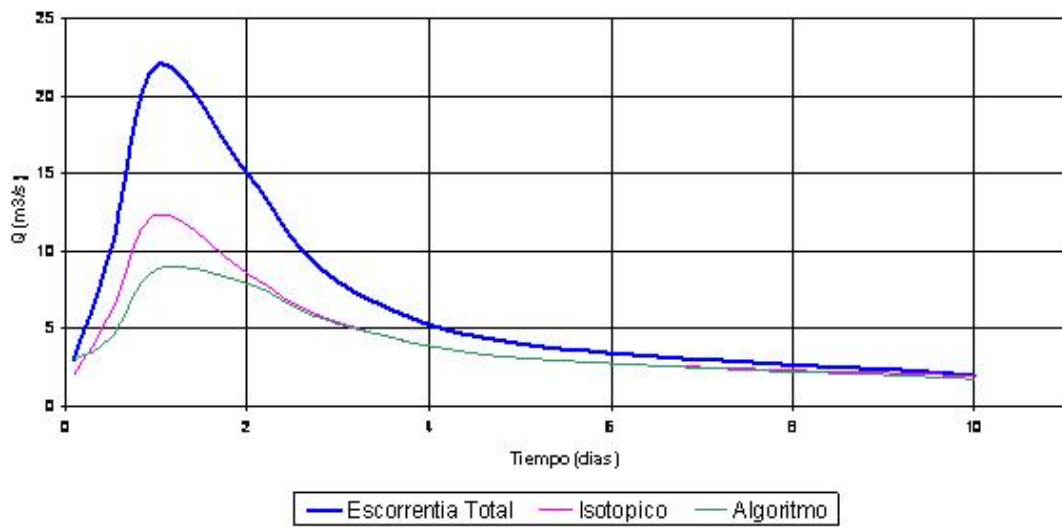
Al comparar los métodos de separación, isotópico y de algoritmo, se puede apreciar cierta similitud en los métodos, ya que para ambos el flujo base presenta un comportamiento similar al del hidrograma, aunque el método de algoritmo junto con los métodos tradicionales de separación subestiman el flujo base en comparación con el método isotópico. Ver tabla 22 y figura 25 y 26.

Tabla 22. Volumen del flujo base por el método de isótopos y de algoritmo.

Cuenca	Componentes	% Volumen Total
Kentucky	Flujo base (isótopos)	66
	Flujo Base (Algoritmo)	62
Brugga	Flujo base (isótopos)	67.5
	Flujo Base (Algoritmo)	49

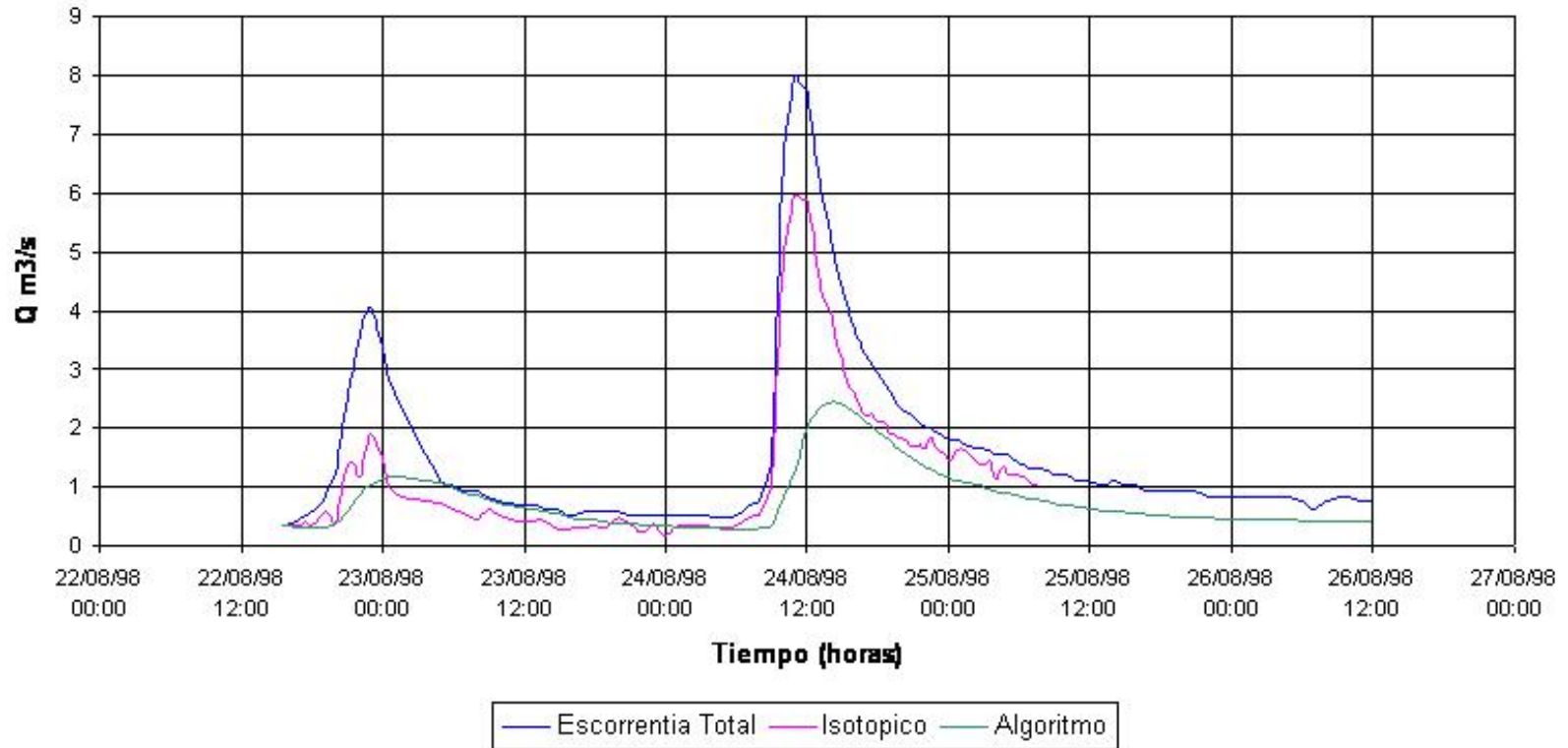
Fuente: Investigación de los autores.

Figura 25. Comparación de los métodos de separación del hidrograma, Kentucky



Fuente: Investigación de los autores.

Figura 26. Comparación de los métodos de separación del hidrograma, Brugga



Fuente: Investigación de los autores.

6. CONCLUSIONES

Al realizar la comparación entre los diferentes métodos de separación del hidrograma, se encontró que los métodos tradicionales asumen a menudo que el flujo base aumenta ligeramente en forma lineal durante el aumento de la escurrentía total. Mientras que la técnica isotópica muestra que el comportamiento del flujo base es similar al del hidrograma, por lo tanto el aporte del flujo base (57-68%) es mayor que el de la escurrentía superficial (30-34%). Esto nos proporciona una comprensión más real del comportamiento de cada uno de los componentes del hidrograma.

Actualmente es imposible implementar el método de separación del hidrograma por medio de isótopos estables en nuestro país, ya que no se cuentan con datos históricos de escurrentía total y de desviaciones isotópicas de forma simultánea. Por esta razón para iniciar con el estudio del método isotópico, se aplicó el método a dos cuencas fuera de Colombia que contaban con los datos apropiados.

Al comparar las técnicas isotópicas y de algoritmo en la separación del hidrograma en las cuencas de Kentucky y de Brugga, se pudo apreciar cierta similitud en su comportamiento, ya que para ambos métodos el flujo base aumenta a medida que aumenta la escurrentía total, aunque el método de algoritmo (menos del 60%) junto con los métodos tradicionales de separación, subestima el flujo base en comparación con el isotópico (entre el 60 y 70%). Donde este método se proyecta como una buena alternativa para la estimación del flujo base.

Se elaboró un protocolo de muestreo de isótopos estables en el flujo base para las condiciones técnicas, sociales y políticas de nuestra región, el cual fue implementado sobre cuatro puntos de la cuenca superior del Río Lebrija durante 6 meses, con el fin de caracterizar la composición isotópica del flujo base. Este protocolo permitirá la continuidad del estudio del flujo base a largo plazo sobre la cuenca superior del río Lebrija.

A fin de realizar la aplicación de la separación del flujo base en la cuenca superior del río Lebrija por medio de isótopos estables, se realizaron los preparativos y mejoras necesarias para la implementación de este método en un futuro, estos preparativos van desde el muestreo diario de isótopos estables en la estación Café Madrid sobre el río Lebrija, La Esperanza sobre el río Frío, El conquistador sobre río de Oro y Majadas sobre el río Surata, hasta la ubicación del sitio, diseño y presupuesto (\$ 8'600.000 por estación) de la estructura de la estación automática de medición de niveles.

7. RECOMENDACIONES

Es importante continuar con el muestreo de isótopos estables en el flujo base, para poder conocer el comportamiento de la concentración de isótopos estables a lo largo de todo el año y así poder realizar la separación de los componentes del hidrograma en cualquier época o mes del año.

Se recomienda realizar un análisis detallado de los parámetros químicos de las muestras recogidas, con el fin de tener una mejor interpretación del comportamiento del agua.

Es necesario para futuras investigaciones realizar estudios y muestreos de los demás componentes del hidrograma, como la concentración isotópica de la escorrentía total y la precipitación, para así poder realizar la separación del hidrograma en la cuenca superior del río Lebrija.

A fin de validar la efectividad de la aplicación del método en la separación del hidrograma por medio de isótopos estables en la cuenca superior del río Lebrija, se recomienda realizar la separación con la misma técnica pero por medio de otros trazadores.

Es necesaria la implementación de sistemas que permitan evaluar el desempeño de los operadores de las estaciones, a fin de mejorar los procedimientos de muestreo; En el caso específico de la estación la Esperanza, se sugiere el cambio del operador o en dado caso el cambio de la estación sobre otro sitio del río frío.

BIBLIOGRAFÍA

APARICIO, Francisco J. Fundamentos de hidrología de superficie., Noriega editores Limusa, 1987. p. 27-35.

BLEASDALE, A y BOULTON, J. Study and assessment of water resources. En: Conservation of Water Resources, Institution of Civil Engineers, London, 1963. p.121-136.

BOUGHTON, W. C. A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. En: Hidrological Processes, 1993. p. 317-324.

CAMACHO, Hernan y GUZMAN, Diego. Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables para obtener la recta meteórica local. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2005.

CHAPMAN, T. G. y MAXWELL, A. I. Baseflow separation, comparison of numerical methods with tracer experiments. En: Water Resources Research. 1996. p. 539-545.

CLARK, Ian. y FRITZ, Peter. Environmental Isotopes in Hydrogeology. En: Hydrograph Separation in Cathment Studies. Lewis Publishers, 1997. p. 99-102.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. Hidrología Subterránea. 2 ed. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1996. p 1265 – 1273. Volumen 2.

_____._____, 1995. Secretaria de planeación departamental de Santander.

DAVIS, S. y MURPHY, E. Dating Groundwater and the Evaluation of Repositories for Radioactive Waste. En: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1987. ISSN: NUREG/CR-4912.

DINCER, T. y FLORKOWSKI, J. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. En: Water Resources Research, Vol.6,1970. p. 110– 124.

FRANCESKA, D; WILDE, Dean. B; RADTKE, Jacob y RICK, T. Chapter A1. Preparations For Water Sampling. En: National field manual for the collection of water-quality data.

FRANCESKA, D; WILDE, Dean. B; RADTKE, Jacob y RICK, T. Chapter A2. Selection Of Equipment For Water Sampling. En: National field manual for the collection of water-quality data.

FRANCESKA, D; WILDE, Dean. B; RADTKE, Jacob y RICK, T. Chapter A4. Collection Of Water Samples. En: National field manual for the collection of water-quality data. (1998)

FREEZE, R. y CHERRY, J. Groundwater. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, NJ. 1979.

GARZON, Lina y NIÑO, Edward. Estudio de la curva de recesión en la cuenca superior del río Lebrija. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2003.

GONOIANTINI, R. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. Nature. 1978. p. 271.

_____._____, U. S. Environmental Protection Agency.

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

LAUDON Hjalmar, SEIBERT Jan, KOHLER Stephan, y BISHOP Kevin. Hydrological flow paths during snowmelt: Congruence between hydrometric measurements and oxygen 18 in meltwater, soil water and runoff. En: Water Resources Research, VOL. 40, 2004. W03102, ISSN: 10.1029/2003WR002455.

MANZANO, Marisol. Isótopos Estables. En: Hidrología Isotópica, 39 Curso Internacional De Hidrología Subterránea, Enero / Julio 2005 – Barcelona <http://www.fcih.org/pub/formacio/10.htm?Submit2=%3C>

MCDONNELL, J.J. y BONELL, M. Deuterium Variations in Storm Rainfall: Implications for Stream Hydrograph Separation. En: Water Resources Research, 1991. p. 455-458.

MCDONNELL, J. J y KENDALL. Capitulo 2. Fundamentals of isotope geochemistry. Isotope Tracers in Catchment Hydrology, 1998. p. 51-86.

NAVIA DIAZ, María del Rosario y SUAREZ NOVOA, Martín alonso. Aplicación de isótopos en hidrológia. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1994.

NORMAN, E. Peters. Biogeochemistry of Small Catchments, the M S Swaminathan Research Foundation En: Hydrologic Processes, Chennai, India. <http://www.icsu-e.org/downloadpubs/scope51/chapter09.html>

RICE, K. Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, headwater catchment. En: Water Resources Research, VOL. 34, NO. 7, JULY 1998. p. 1755–1766.

ROZANSKI, Casimires; FROEHLICH, Klaus y MOOK, Willem. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico, Principios y Aplicaciones. Sección III, Agua Superficial, Madrid: Editores, 2002.

ROZANSKI, Casimires; FROEHLICH, Klaus y MOOK, Willem. Sección I Capítulo 10 Muestreo en el agua y su tratamiento en el laboratorio, Isótopos ambientales en el Ciclo Hidrológico. 2002.

RUEDA SANCHEZ, Irene y SARMIENTO AMADO Mauricio. Revisión de metodologías para la estimación de la recarga en acuíferos mediante balances de agua. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2003.

SLOTO, Ronal y CROUSE, Michele. Hysep: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. En: U.S. Geological Survey Water Resources, 1996. p. 53.

STINCHLER, W. Application of ^2H and ^{18}O in Hydrological Studies, Simposio Interamericano de hidrologia isotópica, Bogota, Colombia, Agosto 18 de 1980.

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

UHLENBROOK, Stefan; FREY, Markus; LEIBUNDGUT, Christian y MALOSZEWSKI, Piotr. Hydrograph separations in a mesoscale mountainous basin at event and seasonal timescale. En: Water Resources Research, Vol. 38. No. 6, 2002. ISSN:10.1029/2001 WRR000938.


_____._____, Manejo Integrado y Sostenible de los Recursos Hídricos Subterráneos en América Latina, Proyecto Regional del OIEA – RLA/8/031, Universidad de Piura.

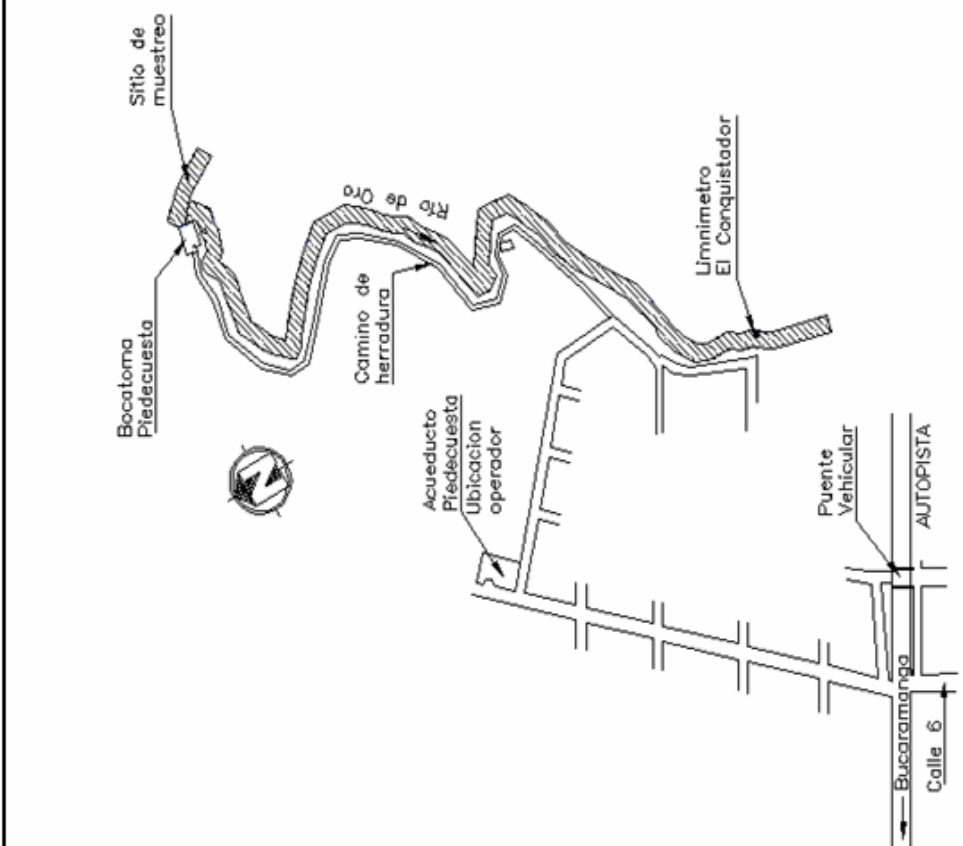
<http://www.udep.edu.pe/recursoshidricos/PAU3.htm>.

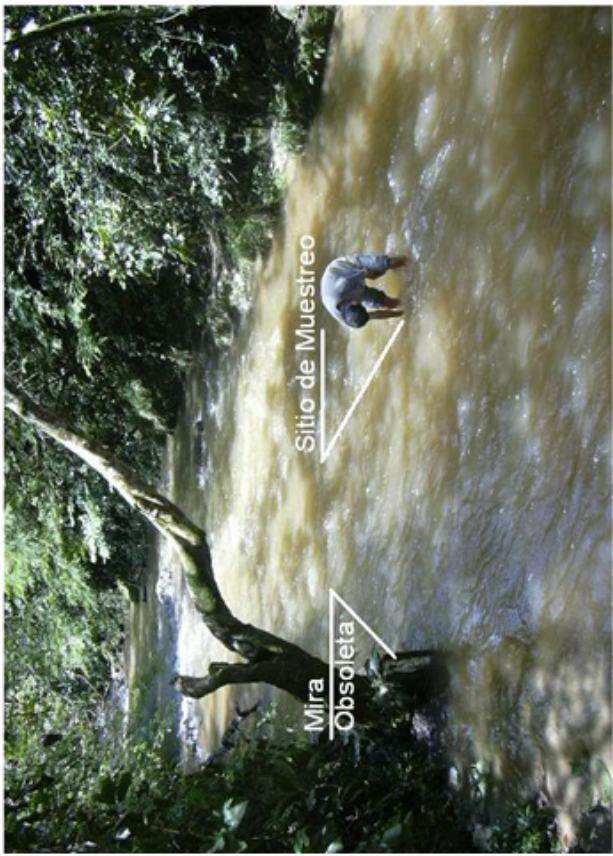
ANEXOS

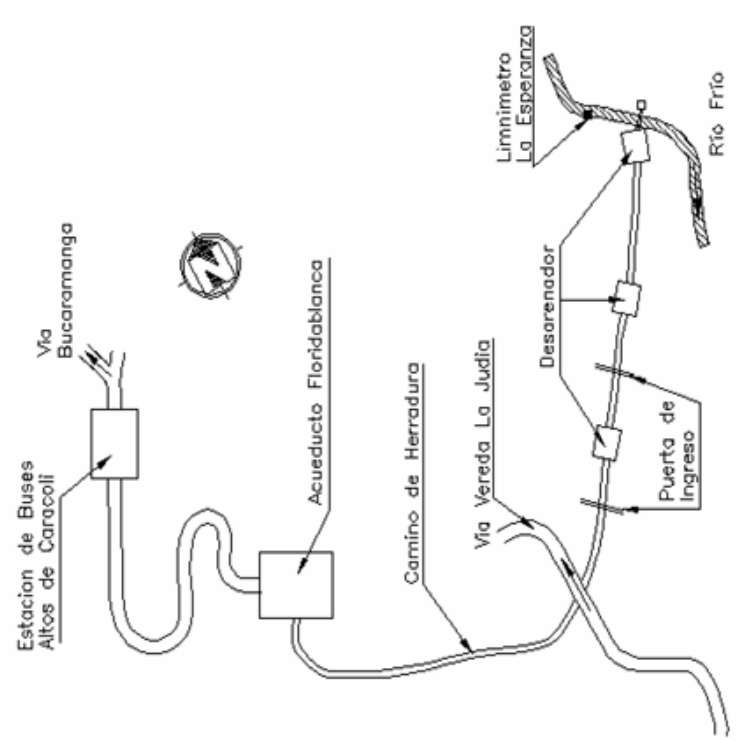
ANEXO A
MODELO DE CARTERA DE CAMPO


<p>CARTERA DE CAMPO</p>	<p>Código Estación: LG01CM</p>	<p>Fecha: 22 de Diciembre del 2004</p>
<p>CROQUIS</p>		
<p>Nombre de la Estación : Café Madrid</p>		
<p>Localización de la Estación: Barrio el Túnel "Café Madrid"</p>		
<p>Nombre del Operador: María de la Cruz Adarme</p>		
<p>Teléfono del Operador: 6408963</p>		
<p>Modo de Desplazamiento: Se puede llegar por medio de cualquier bus que lo deje en la estación de Café Madrid</p>		
<p>Instrucciones de acceso al sitio: Se ingresa por medio de un puente colgante</p>		
	<p>Plantel o Sitio de Emergencia mas Cercano: Hospital del Norte Tel: 6405735</p>	
	<p>Numero Telefónico del Jefe o Supervisor: 300-2809366</p>	
	<p>Información de Seguridad: Se recomienda ir al sitio en las horas de la mañana, para poder encontrar al operador, tipo 6:00 o 7:00 Am. Además para no tener problemas de orden publico "Ladrones". También hay que tener cuidado con los perros de la finca del operador.</p>	

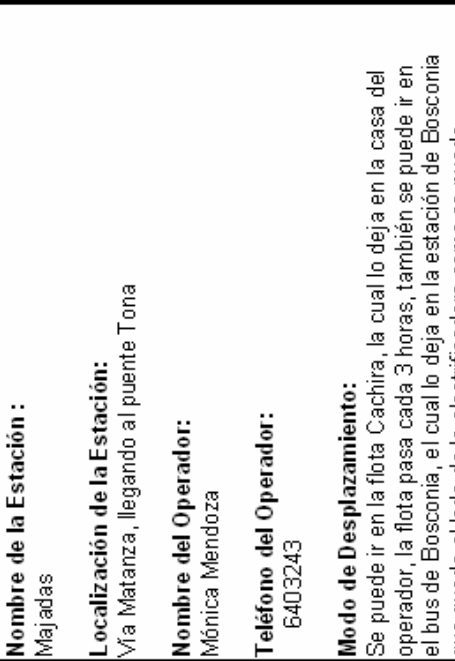
CARTERA DE CAMPO	Código Estación: LG01CM	Fecha: 22 de Diciembre del 2004
FOTOS		
<p>Puntos de Toma de Fotos: De espaldas a la estación del IDEAM tanto para aguas arriba como para aguas abajo.</p> <p>Equipo Necesario: Muestreador de canastilla o marco, botella para recoger la muestra y laso.</p> <p>Numero de Muestras Recogidas:</p> <p>Próxima Visita al sitio: Ultima semana de Enero antes del 3 de Febrero.</p> <p>Observaciones: *Se realizó el reconocimiento del área para determinar el sitio de muestreo, éste sitio fue elegido cerca de la estación limnigráfica del IDEAM, ya que en este sitio contamos con lecturas de los niveles del río para así poder identificar el aparente flujo base de cada semana, además se contó con el apoyo de un operador perteneciente al IDEAM el cual está encargado de tomar muestras de sedimentos de dicho río.</p> <p>*Se acordó con dicho operario (Maria de la Cruz Adarme) la toma de muestras de agua para el análisis de isótopos estables, en el cual se pactó un pago de veinte mil pesos. (\$20000) mensualmente.</p> <p>*Se capacitó al operario para la realización de la toma de muestras, la cual se debe realizar desde un puente colgante por medio de un equipo de canastilla o de marco.</p> <p>*Se hizo entrega al operario del equipo y el envase de muestreo, se le suministró dos envases para la recolección y el almacenamiento de cada día, suficientes para un mes.</p>		


<p>CARTERA DE CAMPO</p>	<p>Código Estación: LMD2RO</p> <p>Fecha: 23 de Diciembre del 2004</p> <p style="text-align: center;">CROQUIS</p> 
<p>Nombre de la Estación : El conquistador</p> <p>Localización de la Estación: Bocatoma del Acueducto de Piedecuesta</p> <p>Nombre del Operador: Jesús Castillo</p> <p>Teléfono del Operador: Planta: 6554100</p> <p>Modo de Desplazamiento: Para poder llegar el sitio de muestreo, se tiene que desplazarse hasta el municipio de Piedecuesta una vez allí se dirige a la autopista con calle 6 y se sube hasta el acueducto de Piedecuesta, en el acueducto se pregunta por la ingeniera Yolanda o por el operador (Jesús Castillo), los cuales están colaborando con el muestreo.</p> <p>Instrucciones de acceso al sitio: Para poder ingresar al sitio de muestreo se tiene que ir obligatoriamente con el operador, ya que el tiene las llaves de las dos puertas para el ingreso al sitio de muestreo.</p> <p>Plantel o Sitio de Emergencia mas Cercano:</p> <p>Numero Telefónico del Jefe o Supervisor: 300-2609366</p> <p>Información de Seguridad: Se recomienda llevar ropa ligera y bebidas hidratantes ya que la bocatoma se encuentra a una hora del acueducto. También hay que llevar protección contra el sol y tener cuidado con los animales salvajes (culebras).</p>	

CARTERA DE CAMPO	Código Estación: LMD2RO	Fecha: 22 de Diciembre del 2004
<p>Puntos de Toma de Fotos: Se toman las fotos del río, tanto para aguas arriba como para aguas abajo.</p> <p>Equipo Necesario: No se necesita equipo, ya que se toma la muestra directamente del río.</p> <p>Numero de Muestras Recogidas:</p> <p>Próxima Visita al sitio: Ultima semana de Enero antes del 3 de Febrero.</p> <p>Observaciones: *Ya que la estación limnimétrica del IDEAM, se encuentra ubicada aguas abajo de la bocatoma del acueducto de Piedecuesta, esto puede estar variando los análisis del estudio, ya que no se tiene en cuenta una parte importante del caudal de la zona de estudio y a su vez puede haber cambios significativos en la composición isotópica del agua por lo que se decidió que el sitio de muestreo quedara unos metros aguas arriba de la bocatoma y que el día de su nivel mínimo correspondería al mismo día del de la estación limnimétrica aguas abajo.</p> <p>*se decidió tomar muestras semanales, este muestreo se realizara por los autores de este libro, hasta que se consiga un operador permanente, el cual pueda realizar el muestreo diariamente.</p> <p>*La toma de muestras para este sitio de muestreo se realiza de forma directa, se sumergirá el envase para el muestreo directamente en el agua, se llenara, se tapara y almacenara.</p> <p>*Se hizo entrega al operario del envase de muestreo, se le suministró dos envases para la recolección y el almacenamiento de cada día, suficientes para un mes.</p>	<p>FOTOS</p> 	

CARTERA DE CAMPO	Código Estación: LMD3RF	Fecha: 22 de Diciembre del 2004
<p>Nombre de la Estación: La Esperanza</p> <p>Localización de la Estación: Bocatoma del acueducto de Floridablanca</p> <p>Nombre del Operador: José Ángel Monsalve</p> <p>Teléfono del Operador: Casa: 6580698 Planta: 6500427</p> <p>Modo de Desplazamiento: Para poder llegar el sitio de muestreo, se tiene que desplazar hasta la estación de buses de altos de caracoli, atravesar la estación y subir hasta el acueducto de Floridablanca, una vez en el acueducto se pregunta por el operador José Ángel Monsalve, y se dirige con el operador por el camino de herradura hasta el sitio de muestreo.</p> <p>Instrucciones de acceso al sitio: Para poder ingresar al sitio de muestreo se tiene que ir obligatoriamente con el operador, ya que el tiene las llaves de las dos puertas para el ingreso al sitio de muestreo.</p> <p>Plantel o Sitio de Emergencia mas Cercano:</p> <p>Numero Telefónico del Jefe o Supervisor: 300-2809366</p> <p>Información de Seguridad: Se recomienda llevar ropa ligera y bebidas hidratantes ya que la bocatoma se encuentra a una hora del acueducto. También hay que llevar protección contra el sol y tener cuidado con los animales salvajes (culebras).</p>	<p style="text-align: center;">CROQUIS</p> 	

CARTERA DE CAMPO	Código Estación: LMO3RF	Fecha: 22 de Diciembre del 2004
<p>Puntos de Toma de Fotos: Se toman las fotos del río, tanto para aguas arriba como para aguas abajo, sobre la piedra grande que se encuentra entre la bocatomina y la mira.</p> <p>Equipo Necesario: No se necesita equipo, ya que se toma la muestra directamente del río.</p> <p>Numero de Muestras Recogidas:</p> <p>Próxima Visita al sitio: Ultima semana de Enero antes del 3 de Febrero.</p> <p>Observaciones: *Se eligió la ubicación del sitio de muestreo sobre la estación limnimétrica, ya que en este sitio contamos con lecturas de los niveles del río para así poder identificar el aparente flujo base de cada semana, además se contó con el apoyo de un operador perteneciente al acueducto de Floridablanca el cual está encargado de hacerle mantenimiento a la estación.</p> <p>*Se acordó con dicho operario (José Ángel Monsalve) la toma de muestras de agua para el análisis de isótopos estables, en el cual se pactó un pago de veinte mil pesos. (\$20000) mensualmente.</p> <p>*Se capacitó al operario para la realización de la toma de muestras, la cual se realiza de forma directa, se sumergirá el envase para el muestreo directamente en el agua, se llenara se tapara y almacenara.</p> <p>*Se hizo entrega al operario del envase de muestreo, se le suministró dos envases para la recolección y el almacenamiento de cada día, suficientes para un mes.</p>	<p>FOTOS</p> 	

CARTERA DE CAMPO	Código Estación: LMD4MA	Fecha: 22 de Diciembre del 2004
CROQUIS		
<p>Nombre de la Estación : Majadas</p> <p>Localización de la Estación: Vía Matanza, llegando al puente Tona</p> <p>Nombre del Operador: Mónica Mendoza</p> <p>Teléfono del Operador: 6403243</p> <p>Modo de Desplazamiento: Se puede ir en la flota Cachira, la cual lo deja en la casa del operador, la flota pasa cada 3 horas, también se puede ir en el bus de Bosconia, el cual lo deja en la estación de Bosconia que queda al lado de la electrificadora como se puede apreciar en el croquis.</p> <p>Instrucciones de acceso al sitio: La entrada al sitio no tiene ninguna complicación.</p> <p>Plantel o Sitio de Emergencia mas Cercano: Hospital del Norte Tel: 6405735</p> <p>Numero Telefónico del Jefe o Supervisor: 300-2809366</p> <p>Información de Seguridad: Se recomienda ir en las horas de la mañana, para evitar posibles insolaciones, si se tiene que caminar desde la estación de Bosconia al sitio de muestreo, ya que queda aproximadamente de 45 min a 1 hora.</p>		

CARTERA DE CAMPO	Código Estación: LM04MA	Fecha: 22 de Diciembre del 2004
<p>Puntos de Toma de Fotos: En la mitad del puente, tanto para aguas arriba, como para aguas abajo.</p> <p>Equipo Necesario: Muestreador de canastilla ó marco, botella para recoger la muestra y laso.</p> <p>Numero de Muestras Recogidas:</p> <p>Próxima Visita al sitio: Ultima semana de Enero antes del 3 de Febrero.</p> <p>Observaciones: *Se eligió la ubicación del sitio de muestreo sobre la estación limnimétrica, ya que en este sitio contamos con lecturas de los niveles del río para así poder identificar el aparente flujo base de cada semana, además se contó con el apoyo del operador de dicha estación el cual está encargado de tomar las mediciones de la mira.</p> <p>*Se acordó con dicho operario (Mónica Mendoza) la toma de muestras de agua para el análisis de isótopos estables, en el cual se pactó un pago de veinte mil pesos. (\$20000) mensualmente.</p> <p>*Se capacitó al operario para la realización de la toma de muestras, la cual se debe realizar desde un puente por medio de un equipo de canastilla o de marco.</p> <p>*Se hizo entrega al operario del equipo y el envase de muestreo, se le suministró dos envases para la recolección y el almacenamiento de cada día, suficientes para un mes.</p>	<p>FOTOS</p> 	

ANEXO B
PARÁMETROS QUÍMICOS

PARÁMETROS QUÍMICOS RÍO DE ORO									
Nombre: Café Madrid			Tipo: LG		Ubicación: Bucaramanga				
Coordenadas		Longitud: -73.1333			Fecha de funcionamiento : 3 de Enero de 2005				
		Latitud: 7.2833							
Nº	Código	Fecha	Corriente	Parámetros químicos					
				pH	Redox (mv)	Cond. (µs)	Sal. (mg/l)	Sal %	T° (°C)
1	LG01CM	06/01/05	Río Lebrija	6.84	5	199	106	0.1	21.8
2	LG01CM	10/01/05	Río Lebrija	6.95	-4	213	113	0.1	22.2
3	LG01CM	23/01/05	Río Lebrija	6.81	6	189	100	0.1	22
4	LG01CM	27/01/05	Río Lebrija	6.67	14	198	105	0.1	22.2
5	LG01CM	02/02/05	Río Lebrija	6.78	7	203	108	0.1	21.2
6	LG01CM	07/02/05	Río Lebrija	6.84	4	55.5	29.5	0	21.1
7	LG01CM	15/02/05	Río Lebrija	6.58	20	207	110	0.1	22.2
8	LG01CM	24/02/05	Río Lebrija	6.68	15	230	122	0.1	22
9	LG01CM	04/03/05	Río Lebrija	7.06	-7	210	111	0.1	22.2
10	LG01CM	13/03/05	Río Lebrija	6.57	16	254	135	0.1	20.7
11	LG01CM	19/03/05	Río Lebrija	6.4	26	263	140	0.1	21.1
12	LG01CM	25/03/05	Río Lebrija	6.27	34	240	127	0.1	20.7
13	LG01CM	31/03/05	Río Lebrija	6.34	31	256	136	0.1	20.7
14	LG01CM	05/04/05	Río Lebrija	6.42	25	248	132	0.1	20.8
15	LG01CM	17/04/05	Río Lebrija	6.12	42	245	130	0.1	20.6
16	LG01CM	19/04/05	Río Lebrija	6.52	19	260	138	0.1	20.8
17	LG01CM	29/04/05	Río Lebrija	6.3	32	244	129	0.1	20.9
18	LG01CM	02/05/05	Río Lebrija	6.6	19	187	99	0.1	22.2
19	LG01CM	13/05/05	Río Lebrija	6.47	27	176	93	0.1	22.3
20	LG01CM	16/05/05	Río Lebrija	6.57	22	148	78	0.1	22.3
21	LG01CM	27/05/05	Río Lebrija	6.66	16	233	124	0.1	22.4
22	LG01CM	30/05/05	Río Lebrija	6.56	22	254	135	0.1	22.2
23	LG01CM	06/06/05	Río Lebrija	6.35	34	130	68	0.1	22.2
24	LG01CM	14/06/05	Río Lebrija	6.32	36	151	81	0.1	22.2
25	LG01CM	23/06/05	Río Lebrija	6.42	30	178	95	0.1	21.9

PARÁMETROS QUÍMICOS RÍO DE ORO									
Nombre: El Conquistador			Tipo: LM		Ubicación: Piedecuesta				
Coordenadas		Longitud: -73.0333			Fecha de funcionamiento : 3 de Enero de 2005				
		Latitud: 6.9665							
N°	Código	Fecha	Corriente	Parámetros químicos					
				pH	Redox (mv)	Cond. (µs)	Sal. (mg/l)	Sal %	T° (°C)
1	LM02RO	11/01/05	Río de Oro	7.01	-5	73.4	39	0	20.80
2	LM02RO	21/01/05	Río de Oro	6.75	10	72.3	38.3	0	21.90
3	LM02RO	27/01/05	Río de Oro	6.93	-1	72.7	38.6	0	21.40
4	LM02RO	06/02/05	Río de Oro	6.95	-2	73.3	38.8	0	21.80
5	LM02RO	13/02/05	Río de Oro	6.91	0	80.2	42.6	0	21.70
6	LM02RO	16/02/05	Río de Oro	6.48	25	156	82	0.1	21.40
7	LM02RO	22/02/05	Río de Oro	6.93	-1	73.8	39.3	0	21.60
8	LM02RO	04/03/05	Río de Oro	6.55	17	61.4	32.7	0	22.20
9	LM02RO	13/03/05	Río de Oro	6.60	14	59.6	31.7	0	21.80
10	LM02RO	19/03/05	Río de Oro	6.60	14	62.8	33.3	0	21.50
11	LM02RO	24/03/05	Río de Oro	6.57	16	60.8	32.3	0	21.60
12	LM02RO	30/03/05	Río de Oro	7.28	-27	61.4	32.6	0	21.80
13	LM02RO	10/04/05	Río de Oro	6.65	10	55.6	29.6	0	21.40
14	LM02RO	16/04/05	Río de Oro	6.82	1	63.9	34	0	21.70
15	LM02RO	21/04/05	Río de Oro	6.47	22	243	129	0.1	22.30
16	LM02RO	30/04/05	Río de Oro	6.26	35	86	45.7	0	21.60
17	LM02RO	02/05/05	Río de Oro	6.68	9	64.8	34.6	0	21.60
18	LM02RO	15/05/05	Río de Oro	6.67	10	85.5	45.5	0	21.60
19	LM02RO	16/05/05	Río de Oro	6.47	22	108	57	0.1	21.20
20	LM02RO	26/05/05	Río de Oro	6.04	48	71.8	38.2	0	21.40
21	LM02RO	03/06/05	Río de Oro	6.92	2	70.8	37.6	0	22.40
22	LM02RO	12/06/05	Río de Oro	6.56	22	92.1	48.4	0.1	21.90
23	LM02RO	18/06/05	Río de Oro	6.66	16	84.2	50.2	0.1	22.00
24	LM02RO	21/06/05	Río de Oro	6.40	31	79	42.5	0	22.50

PARÁMETROS QUÍMICOS RÍO FRÍO									
Nombre: La Esperanza			Tipo: LM		Ubicación: Floridablanca				
Coordenadas		Longitud: -73.0833			Fecha de funcionamiento : 3 de Enero de 2005				
		Latitud: 7.0666							
Nº	Código	Fecha	Corriente	Parámetros químicos					
				pH	Redox (mv)	Cond. (µs)	Sal. (mg/l)	Sal %	Tº (°C)
1	LM03RF	04/01/05	Río Frío	6.75	9	65.1	34.6	0	20.4
2	LM03RF	14/01/05	Río Frío	6.75	9	56.2	29.9	0	20.4
3	LM03RF	17/01/05	Río Frío	6.53	22	52.7	28	0	21.6
4	LM03RF	28/01/05	Río Frío	6.79	7	54.3	28.9	0	22.4
5	LM03RF	02/02/05	Río Frío	6.95	-3	64.5	34.3	0	21.7
6	LM03RF	08/02/05	Río Frío	6.79	7	55.7	29.6	0	21.8
7	LM03RF	15/02/05	Río Frío	6.36	33	55.3	29.4	0	21.8
8	LM03RF	27/02/05	Río Frío	6.65	17	62.1	33	0	22.1
9	LM03RF	06/03/05	Río Frío	6.72	11	58.1	30.9	0	21.9
10	LM03RF	13/03/05	Río Frío	6.64	16	56.9	30.2	0	23.1
11	LM03RF	20/03/05	Río Frío	6.84	6	71.3	37.9	0	23
12	LM03RF	27/03/05	Río Frío	6.58	18	57.4	30.5	0	22.7
13	LM03RF	01/04/05	Río Frío	6.62	17	59.6	31.7	0	22.9
14	LM03RF	08/04/05	Río Frío	6.55	20	58.8	31.2	0	22.8
15	LM03RF	17/04/05	Río Frío	6.66	15	57.7	30.6	0	22.9
16	LM03RF	18/04/05	Río Frío	6.74	10	55.3	29.4	0	22.9
17	LM03RF	23/04/05	Río Frío	6.53	22	57.2	30.4	0	22.7
18	LM03RF	01/05/05	Río Frío	6.75	9	52.6	27.9	0	22.7

PARÁMETROS QUÍMICOS RÍO SURATA									
Nombre: Majadas			Tipo: LM		Ubicación: Bucaramanga				
Coordenadas		Longitud: -73.1500			Fecha de funcionamiento : 3 de Enero de 2005				
		Latitud: 7.1500							
Nº	Código	Fecha	Corriente	Parámetros químicos					
				pH	Redox (mv)	Cond. (µs)	Sal. (mg/l)	Sal %	T° (°C)
1	LM04MA	09/01/05	Río Surata	7.41	-22	163	87	0.1	23.5
2	LM04MA	13/01/05	Río Surata	7.2	-11	152	81	0.1	24.4
3	LM04MA	21/01/05	Río Surata	7.12	-5	163	87	0.1	23.8
4	LM04MA	29/01/05	Río Surata	7.2	-10	164	87	0.1	23.8
5	LM04MA	05/02/05	Río Surata	7.35	-19	169	90	0.1	23.6
6	LM04MA	08/02/05	Río Surata	7.29	-15	172	91	0.1	23.6
7	LM04MA	19/02/05	Río Surata	7.22	-10	168	89	0.1	24.4
8	LM04MA	26/02/05	Río Surata	7.35	-19	178	95	0.1	24.2
9	LM04MA	02/03/05	Río Surata	7.12	-6	167	89	0.1	24
10	LM04MA	11/03/05	Río Surata	7.2	-10	176	93	0.1	24.3
11	LM04MA	15/03/05	Río Surata	7.19	-11	181	96	0.1	24
12	LM04MA	27/03/05	Río Surata	7.2	-11	180	96	0.1	24.3
14	LM04MA	06/04/05	Río Surata	6.67	16	168	89	0.1	20.4
15	LM04MA	17/04/05	Río Surata	6.96	-1	177	94	0.1	20.6
16	LM04MA	18/04/05	Río Surata	7.06	-7	176	93	0.1	20.3
17	LM04MA	30/04/05	Río Surata	7.01	-4	173	92	0.1	19.9
18	LM04MA	02/05/05	Río Surata	6.68	15	127	68	0.1	20.2
19	LM04MA	13/05/05	Río Surata	6.71	11	132	71	0.1	20.1
20	LM04MA	16/05/05	Río Surata	6.79	8	137	73	0.1	20.2
21	LM04MA	29/05/05	Río Surata	6.84	6	142	75	0.1	20.6
22	LM04MA	04/06/05	Río Surata	6.84	6	143	76	0.1	20.4
23	LM04MA	06/06/05	Río Surata	6.85	5	135	72	0.1	21.7
24	LM04MA	18/06/05	Río Surata	6.74	11	144	76	0.1	21.7
25	LM04MA	26/06/05	Río Surata	6.8	2	132	70	0.1	22.8