

**USO DE TRAZADORES AMBIENTALES Y ESTUDIO DE LA RECARGA**

**MARIA DEL PILAR DUARTE BAUTISTA  
CAMILO ANDRES SANCHEZ FORERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2005**

**USO DE TRAZADORES AMBIENTALES Y ESTUDIO DE LA RECARGA**

**MARIA DEL PILAR DUARTE BAUTISTA  
CAMILO ANDRES SANCHEZ FORERO**

**Tesis de Grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director**

**Ing. Msc. PhD Sully Gómez Isidro**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2005**

A Dios,

A mis padres,

A mis hermanos,

A mi novio,

Maria del Pilar Duarte Bautista

A Dios,  
A mis padres,  
A mis tíos,

Camilo Andrés Sánchez Forero

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Doctora Sully Gómez Isidro, directora del proyecto, por su dedicación, apoyo y entrega en la dirección de este trabajo.

A los ingenieros, Msc. Jorge Alberto Guzmán, Ángel Anaya, por sus aportes y colaboración.

A las entidades: IDEAM, AMB y CENICAFE, por su valiosa colaboración y a la CDMB, quien nos facilitó el transporte hasta las estaciones durante los seis meses de muestreo.

Al CEIAM quienes realizaron los análisis del ión cloruro durante los seis meses de manera responsable y oportuna.

Y especialmente, a nuestros padres, quienes no solo con su apoyo moral y económico, sino también con su paciencia y entendimiento nos ayudaron en la consecución de este proyecto.

## RESUMEN

### **TITULO:**

USO DE TRAZADORES AMBIENTALES Y ESTUDIO DE LA RECARGA.\*

### **AUTORES:**

Maria del Pilar Duarte Bautista  
Camilo Andrés Sánchez Forero.\*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Recarga, balance de masa de cloruros, tritio, Cuenca Superior del Río Lebrija, parámetros fisicoquímicos.

### **DESCRIPCION:**

El objetivo principal de este proyecto es implementar el ión cloruro como trazador ambiental en la Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L), para la estimación de la recarga, por medio del Método de Balance de Masa de Cloruros (BMC).

Este proyecto empieza con la revisión de los conceptos básicos relacionados con el ión cloruro en el estudio de la recarga, posteriormente fue necesario establecer e implementar un protocolo de muestreo para el ión cloruro en el agua lluvia y agua subterránea, aplicándose en seis estaciones de agua lluvia y cinco de agua subterránea ya existentes distribuidas a lo largo de la cuenca por un periodo de seis meses. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), y a partir de los resultados obtenidos se dieron los primeros estimativos de la recarga para la Cuenca Superior del Río Lebrija, valores de recarga que fueron comparados con otros estudios donde se aplicaron diferentes métodos.

Además se realizó un seguimiento de los parámetros fisicoquímicos completando un periodo de un año en once estaciones de precipitación distribuidas a lo largo de la zona de estudio y un análisis de la edad del agua, basado en datos de concentraciones de tritio ( $H^3$ ) existentes para la Cuenca Superior del Río Lebrija, identificándose así tres grupos de agua según su edad.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Sully Gómez

## ABSTRACT

**TITLE:**

USE OF THE ENVIROMENTAL TRACERS AND THE RECHARGE STUDY.\*

**AUTHORS:**

Maria del Pilar Duarte Bautista  
Camilo Andrés Sánchez Forero.\*\*

**KEYWORDS:**

Recharge, chloride mass balance, tritium, Lebrija Upper River Basin, physical-chemical parameters.

**DESCRIPTION:**

The objective of this project is to implementate the Chloride ion as a enviromental tracer in the Lebrija Upper River Basin (C.S.R.L) for the recharge estimation using the Chloride Mass Balance Method (CMB).

This project begins with the review of the basic concepts related with the chloride ion in the study of the recharge rates, then was necessary to establish and to implement a sampling protocol for the chloride ion in the rainwater and in the groundwater, this sampling protocol was applied on six rainwater and five groundwater stations already existing and distributed along the basin by a period of six months. The samples were analyzed in the laboratory of the Center of Studies and Environmental Investigations (CEIAM), and from the obtained results give the first recharge rates for the Lebrija Upper River Basin, this results where compared with other studies where different methods were applied.

Besides a follow-up of the physical-chemical parameters completing a one year period on eleven rainwater stations distributed along the study area and a water age analysis based in information of tritium (H3) concentrations exisiting for the Lebrija Upper River Basin, three water groups where identified according to its age.

---

\* Thesis.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Sully Gómez.

## CONTENIDO

	Pág.
<b><u>INTRODUCCION</u></b>	<b>1</b>
<b><u>1. TRAZADORES AMBIENTALES EN LA HIDROLOGIA</u></b>	<b>3</b>
1.1 TRAZADORES AMBIENTALES	3
1.2 IONES COMO TRAZADORES AMBIENTALES	6
1.3 EL ION CLORURO COMO TRAZADOR DE AGUA SUBTERRANEA	7
1.4 ESTIMACION DE LA RECARGA POR MEDIO DEL BALANCE DE MASA DE CLORUROS	9
1.4.1 Concepto de Recarga	9
1.4.2 Balance de masa de cloruros en la zona saturada	10
1.4.3 Método de balance de cloruros en la zona no saturada-perfiles de cloruros	14
1.4.3.1 El movimiento del agua en la zona no saturada	15
1.4.3.2 Flujo tipo pistón y flujo tipo preferencial	15
1.4.3.3 Perfiles de cloruros en la zona no saturada	16
1.5 MEDIDA DEL ION CLORURO EN EL LABORATORIO	21
1.6 TRAZADORES RADIOACTIVOS	22
1.6.1 Tritio	22
1.6.1.1 El tritio en la zona no saturada	24
1.6.1.2 Limitaciones del tritio como trazador	25
1.6.2 Carbono 14	26
1.6.2.1 Datación a partir de carbono 14	29
1.6.3 Cloro 36	30

<b><u>2. PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRA PARA ANALISIS DE CLORUROS</u></b>	<b>33</b>
2.1 NÚMERO Y FRECUENCIA DE LAS MUESTRAS	33
2.2 METODOLOGIA DE MUESTREO	34
2.2.1 Consideraciones generales	34
2.2.2 Metodología de muestreo para agua lluvia	36
2.2.3 Metodología para muestreo de agua subterránea	40
2.2.4 Determinación de las pruebas de campo	43
2.3 ANALISIS EN EL LABORATORIO	49
<b><u>3. LOCALIZACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO</u></b>	<b>52</b>
3.1 GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO	52
3.1.1 Cuenca Superior del Río Lebrija	53
3.1.2 Descripción Climática	54
3.1.3 Descripción Geológica	56
3.2 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	57
3.3 ESTACIONES SELECCIONADAS PARA ANALISIS DEL ION CLORURO	59
3.3.1 Estaciones de agua lluvia	59
3.3.2 Estaciones para muestreo de agua Subterránea	64
3.4 MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA	68
<b><u>4. DATOS OBTENIDOS Y RECOPIRADOS</u></b>	<b>70</b>
4.1 CLORUROS	70
4.1.1 Datos obtenidos	71
4.2 TRITIO	74
4.2.1 Datos recopilados	74
4.3 PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE AGUA LLUVIA	76

4.3.1 Datos recopilados	76
4.3.2 Datos obtenidos	79
<b>5. ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>83</b>
5.1 CLORUROS	83
5.2 ESTIMACION DE LA RECARGA MEDIANTE LA IMPLEMENTACION DEL BALANCE DE MASA DE CLORUROS EN LA C.S.R.L	88
5.2.1 Primera hipótesis	89
5.2.2 Segunda hipótesis	89
5.3 PARAMETROS FISICO-QUIMICOS	92
5.3.1 Precipitación	93
5.3.2 PH	94
5.3.3 Potencial Redox	96
5.3.4 PH Vs Potencial Redox	97
5.3.5 Salinidad y Electroconductividad	98
5.4 EDAD DEL AGUA Y TIEMPO DE RESIDENCIA DEL AGUA	99
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>109</b>
6.1 CONCLUSIONES	109
6.2 RECOMENDACIONES	111
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>112</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>115</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> El ión cloruro en el sistema hidrológico	11
<b>Figura 2.</b> Perfiles esquemáticos de concentraciones de cloruro en el agua del suelo	18
<b>Figura 3.</b> Curva de Decaimiento del tritio	23
<b>Figura 4.</b> Decaimiento radioactivo de carbono 14	28
<b>Figura 5.</b> Mapa de Santander y ubicación de la zona de estudio	53
<b>Figura 6.</b> Mapa de la Provincia de Soto	54
<b>Figura 7.</b> Comportamiento Bimodal de la precipitación en la cuenca.	56
<b>Figura 8.</b> Distribución espacial de las estaciones seleccionadas para agua lluvia	60
<b>Figura 9.</b> Distribución espacial de las estaciones seleccionadas para agua subterránea	66
<b>Figura 10.</b> Variación mensual de la precipitación durante el periodo de muestreo (Oct.2004-Sep.2005)	93
<b>Figura 11.</b> Variación mensual del PH (Oct.2004-Sep.2005)	94
<b>Figura 12.</b> Variación mensual del Potencial Redox (Oct.2004-Sep.2005)	96
<b>Figura 13.</b> PH Vs. P. Redox (Oct.2004-Sep.2005)	97
<b>Figura 14.</b> Variación mensual de la Salinidad (Oct.2004-Sep.2005)	98
<b>Figura 15.</b> Variación mensual de la Electroconductividad (Oct.2004-Sep.2005)	98
<b>Figura 16.</b> Decaimiento de Tritio en la ciudad de Bogotá (1971-2002)	105
<b>Figura 17.</b> Decaimiento de Tritio en la ciudad de Barranquilla (1971-1989)	105
<b>Figura 18.</b> Ajuste exponencial para la ciudad de Bogotá (1971-2002)	107
<b>Figura 19.</b> Ajuste exponencial para la ciudad de Barranquilla (1971-1989)	107
<b>Figura 20.</b> Clasificación de las aguas según la edad en la C.S.R.L.	108

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
<b>Foto 1.</b> Características del muestreador utilizado capacidad máxima 20 Litros	37
<b>Foto 2.</b> Características del muestreador utilizado en la estación de Piedecuesta	38
<b>Foto 3.</b> Muestreador de agua subterránea (Piezómetros)	41
<b>Foto 4.</b> Detalle de muestreador de agua subterránea	42
<b>Foto 5.</b> Medidor de niveles	42
<b>Foto 6.</b> Sonda EIJKELKAMP	44
<b>Foto 7.</b> Laboratorio CEIAM	49
<b>Foto 8.</b> Potenciómetro	51
<b>Foto 9.</b> Almacenamiento de muestras	51
<b>Foto 10.</b> Estación No1 Granja Piedecuesta (1000 msnm). IDEAM	61
<b>Foto 11.</b> Estación No2 Aeropuerto Palonegro (1189 msnm). IDEAM	62
<b>Foto 12.</b> Estación No3 La Galvicia (1848 msnm). IDEAM	62
<b>Foto 13.</b> Estación No4 La Mariana (2481 msnm). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga	63
<b>Foto 14.</b> Estación No5 La Casita (2660 msnm). Cuenca Experimental Río Sucio	63
<b>Foto 15.</b> Estación No6 Berlín (3306.7 msnm). IDEAM	64
<b>Foto 16.</b> Estación No3 Piezómetro Pan de Azúcar Inferior	67
<b>Foto 17.</b> Estación No5 Piezómetros La Flora Inferior	67
<b>Foto 18.</b> Estación No1 Dren La Rosita	68
<b>Foto 19.</b> Estación San Antonio (1531.58 msnm). IDEAM	88

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Clasificación del agua según el PH	46
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del agua según la salinidad	48
<b>Tabla 3.</b> Estaciones de precipitación	60
<b>Tabla 4.</b> Estaciones de aguas subterráneas	65
<b>Tabla 5.</b> Estaciones de isótopos estables	69
<b>Tabla 6.</b> Fechas Muestreos Estaciones de agua lluvia en el año 2005	70
<b>Tabla 7.</b> Fechas de Muestreos de Agua Subterránea en el año 2005	71
<b>Tabla 8.</b> Resultados del mes de Abril	71
<b>Tabla 9.</b> Resultados del mes de Mayo	71
<b>Tabla 10.</b> Resultados del mes de Junio	72
<b>Tabla 11.</b> Resultados del mes de Julio	72
<b>Tabla 12.</b> Resultados del mes de Agosto	72
<b>Tabla 13.</b> Resultados del mes de Septiembre	73
<b>Tabla 14.</b> Resultados del primer muestreo de agua subterránea (Junio 2005)	73
<b>Tabla 15.</b> Resultados del segundo muestreo de agua subterránea (Agosto 2005)	73
<b>Tabla 16.</b> Puntos de Muestreo de Tritio (2003)	75
<b>Tabla 17.</b> Puntos de Muestreo de Tritio (Junio de 2004)	75
<b>Tabla 18.</b> Parámetros físico-químicos mes de Octubre de 2004	76
<b>Tabla 19.</b> Parámetros físico-químicos mes de Noviembre de 2004	77
<b>Tabla 20.</b> Parámetros físico-químicos mes de Diciembre de 2004	77
<b>Tabla 21.</b> Parámetros físico-químicos mes de Enero de 2005	78
<b>Tabla 22.</b> Parámetros físico-químicos mes de Febrero de 2005	78
<b>Tabla 23.</b> Parámetros físico-químicos mes de Marzo de 2005	79
<b>Tabla 24.</b> Parámetros físico-químicos mes de Abril de 2005	80

<b>Tabla 25.</b> Parámetros físico-químicos mes de Mayo de 2005	80
<b>Tabla 26.</b> Parámetros físico-químicos mes de Junio de 2005	81
<b>Tabla 27.</b> Parámetros físico-químicos mes de Julio de 2005	81
<b>Tabla 28.</b> Parámetros físico-químicos mes de Agosto de 2005	82
<b>Tabla 29.</b> Parámetros físico-químicos mes de Septiembre de 2005	82
<b>Tabla 30.</b> Escorrentía Superficial en la C.S.R.L.	84
<b>Tabla 31.</b> Concentración de cloruros en agua lluvia en la C.S.R.L.	84
<b>Tabla 32.</b> Concentración de cloruros en aguas subterráneas (Junio 2005)	86
<b>Tabla 33.</b> Concentración de cloruros en aguas subterráneas (Agosto 2005)	87
<b>Tabla 34.</b> Estimación de la recarga promedio anual en la C.S.R.L (Hipótesis 1)	89
<b>Tabla 35.</b> Estimación de la recarga promedio anual en la C.S.R.L (Hipótesis 2)	90
<b>Tabla 36.</b> Cuadro comparativo entre los diferentes métodos evaluados para determinar la recarga sobre la C.S.R.L.	91
<b>Tabla 37.</b> Cuadro comparativo de resultados de análisis de tritio en la C.S.R.L. para los años 2003 y 2004	100

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>A. BASE DE DATOS ISOHIS PARA BARRANQUILLA, COLOMBIA</b>	116
<b>B. BASE DE DATOS ISOHIS PARA BOGOTA, COLOMBIA</b>	120
<b>C. BASE DE DATOS ISOHIS PARA MARACAY, VENEZUELA.</b>	126
<b>D. RESULTADOS DE LABORATORIO CEIAM ANALISIS DE CLORUROS</b>	128

## INTRODUCCION

Este proyecto busca implementar el ión cloruro como trazador ambiental en estado estacionario en la zona saturada para realizar las primeras estimaciones de las tasas de recarga en la Cuenca Superior del río Lebrija a partir del Balance de Masa de Cloruro, con este propósito se realizará un muestreo durante seis meses en agua lluvia, agua subterránea y escorrentía superficial, con el apoyo de instituciones como la CDMB y el IDEAM, en estaciones ya existentes a lo largo de la cuenca.

Se busca también afianzar los conceptos relacionados con los trazadores ambientales como herramientas para estudiar diferentes procesos hidrológicos a partir de su detección y medición; dentro de los estos se encuentra el ión cloruro como trazador de aguas subterráneas y que se caracteriza por ser un ión estable en solución, no precipitable y que no reacciona con el medio.

Actualmente la aplicación que se le ha dado al ión cloruro en la región correspondiente a la Cuenca Superior del río Lebrija en estudios hidrológicos es poca; por lo tanto no se cuenta con la información de las concentraciones de este ión en el agua lluvia, aguas subterráneas, etc.

También se busca llevar acabo un seguimiento a los parámetros fisicoquímicos del agua lluvia en la precipitación, de todas las estaciones con que cuenta el GPH en la actualidad; además nos enfocaremos en el tritio como trazador radioactivo, para lo que se cuenta con datos existentes para la zona baja de la Cuenca Superior del río Lebrija en aguas subterráneas y aguas lluvias, realizados con anterioridad por el grupo de investigación; dichos datos serán analizados con el fin de estimar la edad del agua subterránea en la zona y su tiempo de residencia.

Paralelamente a este proceso se realizará la segunda fase del muestreo en aguas lluvias de isótopos estables.

En General, en el primer capítulo se darán a conocer las pautas básicas necesarias para lograr dichos objetivos; en el capítulo dos nos enfocaremos en el procedimiento adecuado que se debe llevar a cabo en las diferentes estaciones para la recolección de las muestras para análisis del ión cloruro; en el capítulo tres estableceremos las características generales de la cuenca y las estaciones en las cuales se llevarán a cabo los muestreos; los datos obtenidos y recopilados estarán en el cuarto capítulo, así en el quinto capítulo se realizará el análisis y se evaluarán los posibles factores que puedan llegar a alterar los resultados para cada una de las estaciones existentes en la zona; finalmente se presentarán las conclusiones y recomendaciones en el sexto capítulo.

## **1. TRAZADORES AMBIENTALES EN LA HIDROLOGIA**

En el presente capítulo se establecerán los conceptos básicos necesarios para comprender la importancia de algunos trazadores ambientales como herramientas en el estudio de los recursos hídricos, los cuales a través de los años se han venido implementando cada vez con mayor frecuencia y de manera más diversa y eficiente en la hidrología. Los trazadores ambientales permiten a los investigadores estudiar y comprender el comportamiento del recurso agua en una región de interés lo cual es muy importante ya que así se pueden definir las bases necesarias en el desarrollo de una adecuada planificación hidrológica que permita la preservación del recurso, en una determinada escala espacial y temporal.

Se presentarán así sus diferentes características, las cuales definirán sus ventajas y limitaciones en un área de estudio determinada.

También se buscará establecer las bases del uso e implementación del tritio como trazador radioactivo indicativo de la edad del agua y su tiempo de residencia.

### **1.1 TRAZADORES AMBIENTALES**

Los trazadores son sustancias que se introducen en un sistema con el fin de estudiar la evolución temporal y/o espacial de determinado proceso químico, físico, biológico o industrial, a través de su detección o medición; se encuentran en el seno del agua y se pueden detectar por medios visuales o analíticos. De esta manera, estas sustancias se comportan como verdaderos “espías”, introduciéndose en un sistema en forma prácticamente desapercibida, brindando luego información acerca del mismo, a un observador externo.

Algunos autores como Gardner y Eli (1967), dieron la siguiente definición para los trazadores ambientales: “El método de los trazadores es una técnica para obtener información sobre un sistema hidrogeológico o parte del mismo, observando el comportamiento de una sustancia específica (trazador), que se ha añadido (inyectado) al sistema por procesos naturales, aunque su producción puede ser natural o resultar de la acción global del hombre”.

Gran variedad de trazadores han venido siendo usados en la hidrología para comprender diferentes procesos como: el movimiento del agua, el tiempo de residencia, la reactividad de materiales presentes en la cuenca; también para cuantificar y modelar el transporte del agua y sustancias contaminantes. Por otra parte, la utilización de trazadores puede ayudar a determinar características del acuífero como conductividad hidráulica, porosidad, dispersividad y otros parámetros hidrogeológicos importantes; en diferentes casos la variabilidad de un soluto o parámetro ha sido utilizada para comprender la hidrología de un acuífero.

Los trazadores ambientales o naturales se encuentran en la atmósfera o en el ambiente, bien como resultado de la actividad humana o como consecuencia de procesos exclusivamente naturales y son aplicados generalmente al suelo a través de la lluvia; a diferencia de los trazadores artificiales, los cuales son aplicados de manera específica dependiendo del propósito de su inclusión a un sistema.

En general, bajo condiciones favorables, la utilización de trazadores en un sistema hidrológico permite estimar con cierta precisión componentes fundamentales del balance hídrico a partir de un número limitado de ensayos.

Existen distintas clases de trazadores utilizados en estudios hidrogeológicos y de aguas subterráneas, los más simples son los colorantes, los cuales se aplican como solutos al agua de infiltración detectándose visualmente. Los tipos de colorantes que se han utilizado ya sean orgánicos o inorgánicos tienen un inconveniente en su aplicación ya que generalmente interaccionan con el suelo.

Por otra parte, muchos de los colorantes orgánicos están sujetos a absorción por parte de la arcilla, así como a las degradaciones químicas y biológicas, retardando así, su transporte. El proceso de detección del colorante en el agua subterránea es destructivo, por lo que este resulta laborioso y difícil cuanto mayor sea la profundidad a estudiar.

Una alternativa al uso de trazadores ópticos es la utilización de sustancias que sean detectables por medios analíticos, como lo son las sales disueltas, pero al igual que el caso anterior presentan problemas debido a las interacciones con el medio. Los solutos también están sujetos a la difusión y al fenómeno de la dispersión hidrodinámica (Hillel et al. 1980), como resultado de la no uniformidad en la velocidad del flujo dentro de los poros del suelo. Estos procesos hacen que el frente inicial de solutos se vaya haciendo más difuso conforme este avanza a través del medio poroso. De esta forma, considerando el frente de solutos con la forma de una onda, esta se disipa gradualmente en profundidad hasta que llega un momento en que su forma no es claramente discernible. La profundidad efectiva de detección de un trazador dependerá, por lo tanto, de la concentración inicial, de las propiedades del suelo y del flujo del agua y su velocidad.

También se encuentran los trazadores que incluyen especies isotópicas, en forma de iones solubles, añadidas en cantidades mínimas de modo que la masa no afecte a las condiciones de flujo.

Un buen trazador del agua subterránea debe ser móvil, soluble y no debe ser retardado por la matriz de suelo del acuífero, su comportamiento físico y químico debe ser conocido y comprendido en el agua y en el acuífero, además, no debe modificar ni la densidad ni la conductibilidad hidráulica. Idealmente el trazador debe ser no reactivo, y no sufrir transformaciones durante su transporte. Es claro que el trazador necesita ser fácil de obtener y medir. Si se utiliza un trazador artificial debe cumplir también otras consideraciones, como lo son: baja toxicidad,

baja radioactividad y bajos niveles naturales del trazador en el ambiente. Para trazadores ambientales, es deseable que la variación de sus concentraciones en el ambiente sean identificables.

Es importante resaltar que es casi imposible encontrar un trazador que cumpla con cada uno de los requisitos nombrados con anterioridad; por esto, la escogencia del trazador juega un papel importante en cualquier estudio hidrogeológico. Estas consideraciones ratifican que generalmente solo los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ) o las moléculas isotópicas. ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ , y  $^3\text{H}$ ) pueden ser usadas.

Los isótopos estables han sustituido a los radiactivos irrumpiendo con gran fuerza en múltiples aplicaciones. Contrariamente los radiactivos que habían generado gran expectativa en los años 50 y 60 han visto limitado su uso por su precio, restricciones medioambientales y dificultad de manipulación.

## **1.2 IONES COMO TRAZADORES AMBIENTALES**

Los compuestos iónicos o fácilmente ionizables, han sido ampliamente utilizados como trazadores de agua subterránea. Esta categoría de trazadores incluye aquellos compuestos que se ionizan en el agua, dando elementos con carga positiva (cationes) y con carga negativa (aniones). La carga de un ión afecta su movimiento a través de los acuíferos por medio de numerosos mecanismos. Algunos trazadores iónicos comunes son: el Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), bromuro ( $\text{Br}^-$ ), litio ( $\text{Li}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), yoduro ( $\text{I}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), aniones orgánicos (como benzoato) y aniones orgánicos fluorinados (como M-TFMBA). Los iones mencionados han sido probados satisfactoriamente como trazadores en condiciones variadas tanto en campo como en el laboratorio.

Los trazadores iónicos han sido empleados en una gran variedad de problemas hidrológicos. Los más comunes son la determinación de caminos de flujo, tasas de recarga, tiempos de residencia y propiedades hidráulicas del acuífero.

En la mayoría de las situaciones, los aniones no son afectados por el medio acuífero, sin embargo algunos minerales como los minerales de arcilla y los detritus orgánicos pueden retener o producir intercambio de aniones. En condiciones de bajas permeabilidades y tasas de flujo (indicativo de una amplia fracción de arcilla), la fase sólida del suelo podría tener una considerable capacidad para absorber un componente iónico.

Los cationes reaccionan mucho más frecuentemente con los minerales de arcilla, produciéndose intercambio de cationes que introduce a otros como sodio y calcio dentro de la solución, por esta razón se ha trabajado poco con cationes. Una ventaja de los trazadores iónicos simples es que no se descomponen y por tanto no se pierden en el sistema.

### **1.3 EL ION CLORURO COMO TRAZADOR DE AGUA SUBTERRANEA**

El ión cloruro como trazador tiene diversas aplicaciones en estudios hidrológicos y de movimiento de aguas subterráneas y puede brindarnos información a partir de las concentraciones presentes en los acuíferos subterráneos, así como en la matriz de suelo en la zona no saturada. El cloruro es una forma ionizada del cloro, debido a que el cloruro es altamente soluble, es uno de los iones más comunes en aguas naturales y es el ión prevaleciente en el agua de mar. El cloruro es un constituyente abundante de las aguas subterráneas, pero escaso en los minerales de la corteza, pues los cloruros son muy estables en solución y difícilmente se precipitan (es decir son iones móviles o conservativos en el agua), el cloruro no reacciona ni es absorbido por la mayoría de los componentes de las rocas y

suelos, no forma solutos complejos con otros iones a menos que las concentraciones de cloruro sean muy altas, no forma sales de baja solubilidad y juega roles bioquímicos poco vitales (Hem et al.1985). Las fuentes subsuperficiales de cloruros están restringidas a evaporitas, sedimentos marinos o rocas porosas que han estado en contacto con el océano.

El cloruro esta presente en la lluvia y en la nieve debido a procesos físicos que introducen solutos marinos en el aire provenientes de la superficie del océano. Una vez que el ión cloruro es transportado a la atmósfera alcanza la superficie del suelo a través de la precipitación (deposición húmeda), o a través del viento (deposición seca). Las concentraciones normales van de 10 a 250 mg/l; más de 300 mg/l dan sabor salado al agua.

El ión cloruro es utilizado también, en estudios relacionados con los procesos de intrusión de agua salada a fuentes de suministro de agua potable de tipo superficial y subterráneo, así como en estudios de contaminación y calidad del agua, pues muchas de las actividades humanas generan residuos con altas concentraciones de ión cloruro, (plantas de soda cáustica, campos de explotación y producción de petróleo, plantas desalinizadoras, industrias de curtiembres, fábricas de baterías, rellenos sanitarios, pozos sépticos, la agricultura y la ganadería intensiva, entre otras).

La utilización del ión cloruro como trazador en estudios hidrológicos puede complementarse con la implementación de otros tipos de trazadores, como lo son los isótopos estables del agua, para obtener y correlacionar información adicional acerca de los procesos hidrológicos que se presentan en una determinada zona de estudio; así mismo, la implementación conjunta del ión cloruro, junto con los demás iones mayoritarios del agua, permiten obtener la caracterización hidroquímica del agua tanto superficial, subterránea o agua lluvia, para evaluar la calidad del agua.

## 1.4 ESTIMACION DE LA RECARGA POR MEDIO DEL BALANCE DE MASA DE CLORUROS

Allison (1994)<sup>3</sup> señala que de todas las técnicas de trazadores disponibles, la del balance de cloruros es la mas simple, económica y de uso mas universal para estimación de la recarga

**1.4.1 Concepto de recarga** Los procesos de recarga y su distribución espacial son componentes importantes del ciclo hidrológico y el parámetro mas importante requerido en la planificación y explotación exitosa del agua subterránea en un acuífero en particular. Múltiples métodos existen para cuantificar la recarga, dentro de los que se encuentran los métodos químicos, utilización de lisímetros, fluctuación de niveles de agua, modelación numérica y método de Darcy entre otros.

Se denomina recarga de un acuífero al volumen de agua que se infiltra o flujo descendente en un intervalo de tiempo que alcanza el nivel freático formando o aumentando las reservas de agua. Las formas de recarga natural a los acuíferos son por agua de lluvia, por aguas superficiales y por transferencias entre acuíferos, siendo la recarga por agua de lluvia la principal.

Se distinguen dos tipos de recarga natural: la directa (local o difusa) y la indirecta (localizada o preferencial). La recarga directa se define como el agua que se une a la reserva de agua subterránea por percolación vertical directa de la precipitación a través de la zona no saturada (zns) procedente de los excedentes de humedad en el suelo y de la evapotranspiración. La recarga indirecta es el resultado de la percolación hasta la superficie freática de la escorrentía superficial y de la

---

<sup>3</sup> Allison, G.B., Gee, G.W., Tyler, S.W. (1994) Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions. Soil Science Society of America Journal 58:6-14.

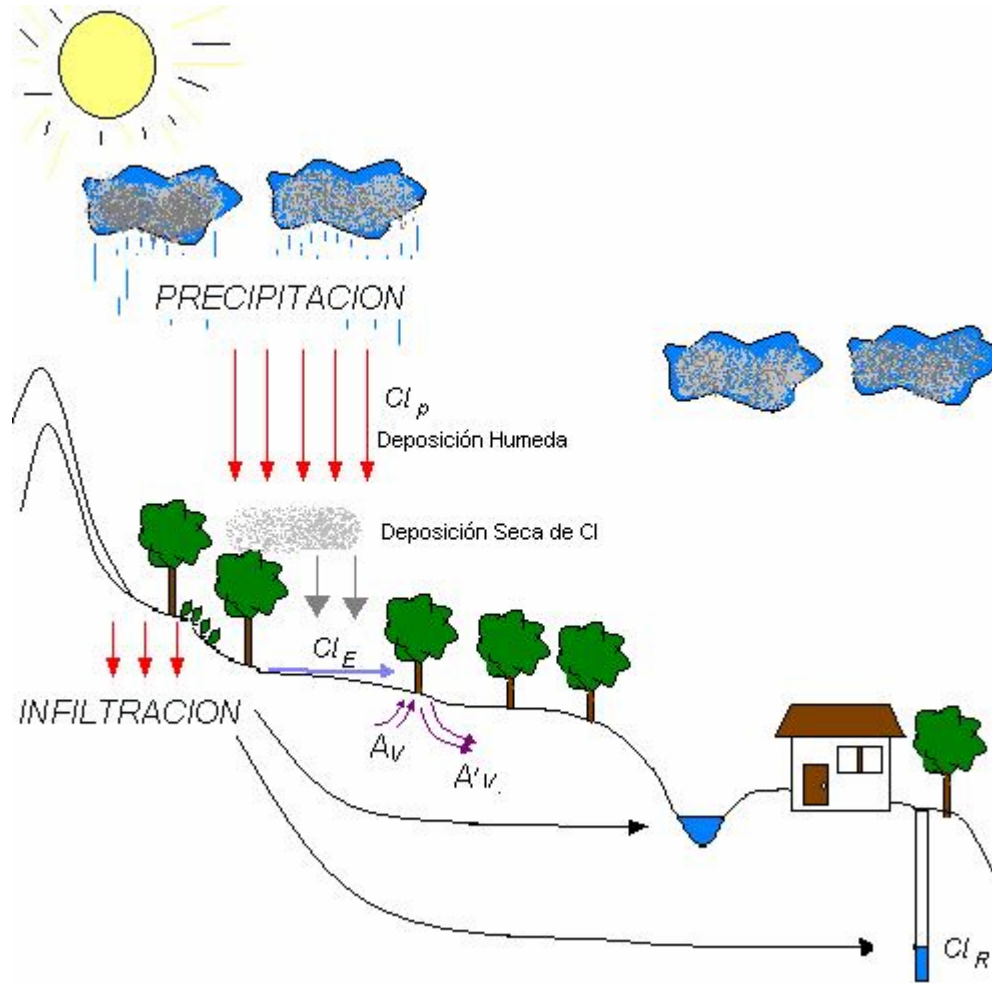
localizada en depresiones topográficas como zonas estancadas, lagunas etc. De Vries & Simmers et al. (2002), emplean esta terminología para referirse a la: “Recarga directa (como percolación difusa con flujo tipo pistón), indirecta (como flujo por macro poros a través de canales de raíces, grietas de desecación y fisuras) y localizada (como flujo preferencial causado por frentes húmedos inestables y por características físicas diferenciadas en el mismo perfil de suelo)”.

Las tasas de recarga pueden ser estimadas utilizando el balance de masa de cloruros en la zona saturada y en la zona no saturada (perfiles de cloruros), estos métodos tienen la misma base conceptual, pero su método de aplicación varía entre sí.

**1.4.2 Balance de masa de cloruro en la zona saturada** El balance de masa del ión cloruro en la zona saturada es una técnica sencilla, confiable, segura, económica y una de las más utilizadas en estudios cuya finalidad es obtener las tasas de recarga que se presentan en un determinado acuífero; es importante tener un amplio conocimiento de la zona a estudiar, para tener en cuenta los aspectos que pueden afectar los resultados obtenidos y así realizar una estimación acertada de las tasas de recarga obtenidas a partir de la implementación del método.

La estimación de la recarga mediante el balance de cloruros del agua en el suelo tiene su justificación en las propiedades del ión, descritas previamente (altamente conservativo, normalmente no es aportado por el terreno, muy soluble, no interacciona con el medio, no sufre reacciones de absorción, adsorción, reducción y oxidación).

Figura 1. El ión cloruro en el sistema hidrológico.



Este método se basa en la comparación del aporte de cloruro en la lluvia y en el viento como únicas aportaciones del ión al suelo con respecto al contenido de cloruro que transporta el agua de recarga al nivel freático. Para la realización del balance de cloruros se requiere conocer la aportación media de cloruro en el agua lluvia, agua subterránea y la escorrentía superficial. La estimación del flujo de entrada de cloruro al sistema es complicada y es la fuente de muchos errores. En diversos estudios de parámetros químicos de la lluvia, se ha mostrado que las concentraciones de cloruro en la lluvia son inversamente proporcionales a la distancia al océano, que es la fuente principal de las sales. El aporte seco (Cloruro

transportado por el aire), puede ser muy importante en la contribución del flujo de entrada total de cloruro, de esta manera es importante cuantificar las fuentes de cloruro para lograr una buena aproximación de la recarga. El flujo total de entrada puede obtenerse mediante la realización de un plan de muestreo, ya sea de tipo puntual durante eventos de precipitación individuales o de tipo compuesto, este último puede ser diario, semanal o mensual, sin embargo se requiere un prolongado tiempo de muestreo que puede llegar a ser hasta de dos años si no se cuenta con valores para la zona de estudio que se hayan obtenido en estudios anteriores, esto con el fin de obtener valores promedio para una escala de tiempo mayor y que aseguren un comportamiento estable de las variables utilizadas en los cálculos. Según Custodio (1997)<sup>4</sup> esta caracterización del cloruro atmosférico en la zona de estudio puede ser adecuado para utilizarlo como un valor característico de un lugar, es cartografiable y por lo que los resultados de una futura estimación de la recarga serían regionales o fácilmente regionalizables.

El cloruro proveniente de la deposición húmeda (precipitación) y en la deposición seca, (aire), es transportado a la zona no saturada mediante el proceso de infiltración del agua, el cloruro es un ión no volátil y no es removido por la evaporación o por la transpiración de las plantas por lo que su concentración aumenta en la zona radicular y sus concentraciones deberán permanecer constantes bajo esta zona si las tasas de recarga no varían en el tiempo; la estimación cualitativa de las tasas relativas de recarga pueden ser estimadas usando la concentraciones de cloruros en la precipitación y la deposición seca como las únicas fuentes de cloruro en la subsuperficie; las concentraciones de cloruro en el agua subterránea son inversamente proporcionales a las tasas de recarga, bajas concentraciones de cloruro en el agua subterránea indican una alta recarga, por que el cloruro esta fluyendo fuera del sistema, mientras que altas

---

<sup>4</sup> CUSTODIO, Gimena E. Evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. 1 ed. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. 1997. P. 181-208.

concentraciones del ión cloruro indican una baja recarga, debido a que la acumulación del ión aumenta en el proceso de evapotranspiración.

Con el fin de aplicar la técnica de los trazadores ambientales en aguas subterráneas, se implementará el método de balance de masa de cloruros en la zona saturada, en la Cuenca Superior del Río Lebrija, en donde anteriormente se han utilizado otros métodos para la cuantificación de la recarga. Para este propósito partiremos de la ecuación de balance de masa propuesta por Custodio y Llamas (1983)<sup>5</sup>.

FLUJO DE ENTRADA=FLUJO DE SALIDA

$$P * C_P + A_S + A'_V = R * C_R + A_V + E * C_E$$

Despejando para obtener la recarga:

$$R * C_R = P * C_P - E * C_E + A_S - A_V + A'_V$$

Donde:

R: Recarga promedio anual (mm/año).

P: Precipitación media multianual en la zona de estudio (mm/año).

E: Escorrentía Superficial media (mm/año).

C<sub>P</sub>: Contenido medio de Cl<sup>-</sup> en el agua lluvia (mg L<sup>-1</sup>).

C<sub>R</sub>: Contenido medio de Cl<sup>-</sup> en el agua de Recarga (mg L<sup>-1</sup>).

C<sub>E</sub>: Contenido medio de Cl<sup>-</sup> en el agua de Escorrentía superficial (mg L<sup>-1</sup>).

A<sub>S</sub>: Aporte de Cl<sup>-</sup> tomados del suelo o aportados artificialmente (g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>).

A<sub>V</sub>: Retención de Cl<sup>-</sup> tomados por la vegetación (g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>).

A'<sub>V</sub>: Devolución de Cl<sup>-</sup> del suelo al morir la vegetación (g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>).

---

<sup>5</sup>CUSTODIO E.: Llamas, M.R. Hidrología Subterránea. Editorial Omega. Barcelona (Vol 2). 1983 p.1-2350.

Luego de tener esta ecuación se plantea la hipótesis que no existen aportes de tipo artificial al sistema y que la retención de cloruros por la vegetación existente es igual a la aportada al suelo en el momento que esta muere; de esta forma se simplifica la ecuación así:

$$R * C_R = P * C_P - E * C_E$$

Donde el termino  $P * C_P$  indica el flujo entrante al sistema condicionado únicamente por la deposición húmeda y seca. El termino  $E * C_E$  es considerado en la ecuación si se supone que existe un lavado previo de los cloruros en la superficie del suelo antes que se produzca la infiltración del agua y el soluto.

Las limitaciones de la aproximación del balance de masa del ión cloruro es su inhabilidad de evaluar la variabilidad espacial de la recarga dentro de un área determinada de estudio y una inhabilidad de distinguir la recarga local de la recarga proveniente de otras fuentes, sin embargo cuando se combina el método con análisis de otros iones como Bromuro (Br) y sulfato ( $SO_4$ ) se puede obtener información que ayude a identificar estos procesos. Es importante tener en cuenta que el método debe restringirse en áreas subyacidas por evaporitas y debe tenerse especial precaución en áreas cercanas al océano o en sistemas de rocas fracturadas si hay producción de cloruro adicional ya que esto lleva a que los resultados obtenidos con el balance de masa sean mínimos.

**1.4.3 Método de balance de cloruros en la zona no saturada- perfiles de cloruros** Allison y Hughes (1978)<sup>6</sup>, modificaron las ecuaciones generales del balance de masa de cloruros en el agua subterránea de Eriksson y Khunakasem

---

<sup>6</sup> Allison, G.B., Hughes, M.W. (1978) The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. Aust. J. Soil Res. 16: 181-195

(1969)<sup>7</sup>, para utilizar el método en la zona no saturada, donde en lugar de medir directamente los flujos de agua, los métodos de trazadores como el cloruro pueden utilizarse para realizar una estimación de recarga invirtiendo los perfiles de soluto obtenidos en el campo. Obteniendo un valor representativo para un determinado tipo de suelo o uso de suelo.

**1.4.3.1 El movimiento del agua en la zona no saturada** Típicamente la mayor parte de la precipitación se infiltra excepto bajo condiciones de precipitación muy intensa, una porción del agua se evapora y transpira por las plantas (Evapotranspiración). Si lo que se infiltra es mayor que lo que se evapotranspira resulta flujo descendiente o percolación lateral.

Si la zona no saturada es poco profunda o las tasas de percolación altas, la tasa de recarga en el nivel freático se puede aproximar a la tasa de percolación a largo plazo; por otra parte si la zona no saturada es profunda y las tasas de percolación bajas la tasa de recarga pueden estar fuera de la fase temporal con las condiciones cerca de la superficie en el momento, en estos casos es importante diferenciar entre medidas de percolación profunda en la zona no saturada y estimaciones de la recarga hecha a la profundidad del nivel freático.

**1.4.3.2 Flujo tipo pistón y flujo tipo preferencial** El flujo pistón es un flujo uniforme del agua (descendente) en la matriz del suelo. El agua infiltrada reemplaza el agua presente inicialmente; mientras que el flujo preferencial es un movimiento no uniforme a través de vías como fracturas o caminos creados, debido a cambios en las características del suelo. El flujo preferencial es importante en regiones húmedas con altas tasas de precipitación. En suelos

---

<sup>7</sup> Eriksson, E., Khunakasem, V. (1969) Chloride concentrations in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain. *Journal of Hydrology* 7: 178-197.

uniformes a bajas ratas de movimiento de agua en el suelo se presenta flujo tipo pistón particularmente si el suelo se encuentra inicialmente seco, en este tipo de flujo el agua vieja es desplazada y se mueve bajo el agua nueva infiltrada; bajo ciertas condiciones una parte del agua vieja es desplazada y otra se mueve por caminos de flujo preferencial.

El flujo preferencial es un proceso donde el agua y los solutos se mueven por caminos preferenciales en un medio poroso; en el flujo preferencial los frentes de humedad locales pueden propagarse a profundidades considerables en un perfil de suelo; la rata y la profundidad de la infiltración en este tipo de flujo es mayor bajo áreas de superficie inunbables y tierras altas; mientras que el flujo pistón se encuentra generalmente en lugares donde los sedimentos están sujetos a encharcamientos intermitentes o continuos.

El flujo tipo pistón puede identificarse utilizando trazadores ambientales como el  $^{36}\text{Cl}$  analizando la forma que presentan los perfiles de  $^{36}\text{Cl}$  en una columna de suelo, dicho comportamiento sugiere que el bombeo relacionado al  $^{36}\text{Cl}$  adicionado a la superficie en los años 60 se ha movido hacia abajo uniformemente y mantiene un perfil tipo campana. Por el contrario, si no se presenta flujo tipo pistón el perfil de  $^{36}\text{Cl}$  tiene un comportamiento errático con altos y bajos, correspondientes a la combinación de flujo lento y rápido del agua.

**1.4.3.3 Perfiles de cloruros en la zona no saturada** El cloruro soluble presente en la precipitación y el viento, cae a la superficie del suelo. El agua que pasa de la interfase suelo-atmósfera lleva cloruro disuelto al perfil del suelo. Las raíces extraen una porción del agua infiltrada selectivamente dejando atrás los iones cloruro en la solución de agua del suelo. La evaporación en la superficie puede concentrar algunas sales siendo menos común en áreas con abundante vegetación.

Estos dos procesos: agua trayendo cloruro y la evapotranspiración, generan un enriquecimiento progresivo en la zona radicular, sin embargo, grandes cantidades de cloruros pueden ser sacadas de la matriz de suelo si el agua se mueve rápidamente a través del perfil como resultado del encharcamiento y el incremento de la infiltración.

La ausencia de cloruro en el agua del suelo indica tanto que el flujo de agua es grande minimizando la acumulación de cloruro o que grandes flujos de agua sacaron el flujo acumulado previamente, si los flujos de agua subsuperficial son altos, la ocurrencia de altas concentraciones de cloruro es una buena evidencia de bajos niveles de flujo de agua por periodos de tiempo prolongados.

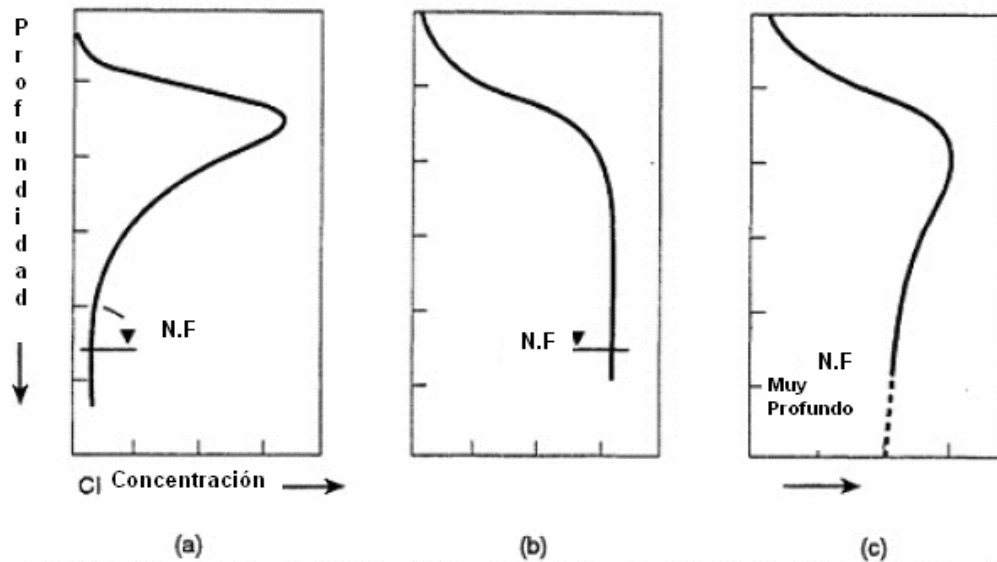
Los dos procesos que mueven el cloruro bajo la zona radicular son: la difusión y advección.

El cloruro y otras sales excluidas por las plantas se difunden hacia el nivel freático como resultado de los gradientes de concentración. La figura 2(a) muestra un perfil típico de transporte por difusión; las concentraciones más altas están justo bajo la zona radicular y van disminuyendo hasta el nivel freático. La zona radicular permanece con bajas concentraciones de cloruros debido a que la lluvia saca las sales que se han difundido mas arriba.

La advección o percolación del agua bajo la zona radicular es la cantidad de agua que escapa de la evapotranspiración y desciende al nivel freático llevando consigo oxígeno disuelto así como iones y sales. Como no se presentan mas mecanismos de enriquecimiento de cloruros bajo la zona radicular la concentración permanece uniforme bajo la línea de las aguas subterráneas donde si la percolación es la única fuente de recarga del acuífero el agua del suelo y el agua subterránea tendrán la misma concentración. Si el agua subterránea es recargada

principalmente de otro lugar las concentraciones del agua del suelo y el agua de recarga no coinciden necesariamente. La figura 2(b) muestra un perfil típico de transporte advectivo.

Figura 2. Perfiles esquemáticos de concentraciones de cloruro en el agua del suelo. (a) Extracción del agua por las raíces de las plantas seguida de pérdida por difusión de cloruro hacia el nivel freático o flujo preferencial a través y bajo la zona radicular; (b) flujo pistón de agua con extracción del agua a través de la zona radicular; (c) perfil de cloruro que refleja condiciones de recarga pasadas.



Extraída de <http://www.zonanosaturada.com/publics/V6/p403-408.pdf>

Bajo estas condiciones la tasa de recarga o percolación puede darse por:

$$R = J_{CL} / C_{SW}$$

Donde  $J_{CL}$  es el flujo de cloruro en la superficie y  $C_{SW}$  es la concentración de cloruros bajo la zona radicular.

La concentración media de cloruro en el agua del suelo del perfil  $C_{sw}$  puede establecerse según (Campbell, 1993)<sup>8</sup>:

$$C_{sw_i} = \frac{\sum_i \rho B * M_i * d_i}{\sum_i d_i * \theta_i}$$

Donde,  $\rho B$  es la densidad seca aparente del suelo o “*bulkdensity*” en  $\text{kg/m}^3$ ;  $M_i$  es el contenido de cloruro en  $\text{mg/kg}$  del suelo seco;  $d_i$  es el intervalo de profundidad en metros y  $\theta_i$  es el contenido volumétrico de agua.

Esta técnica es bastante aceptada en la estimación de la recarga especialmente en climas áridos.

El método más común para presentar los datos obtenidos en los perfiles y determinar la concentración media ( $C_{sw}$ ), es dibujar el contenido de agua acumulada frente al cloruro acumulado. El agua acumulada representa un parámetro estrechamente relacionado con la cantidad total de recarga (a una cierta profundidad) y proporciona una manera de comparar los perfiles con diferente composición estructural. El cloruro acumulado se puede interpretar como una aproximación de tiempo si se asume un flujo constante de cloruro en la precipitación a lo largo del tiempo.

Una suposición en la utilización del balance de masa de cloruros para estimar el flujo descendiente en un perfil de suelo es el equilibrio, donde la entrada de cloruro al sistema se balancea exactamente con descarga del cloruro al nivel freático.

---

<sup>8</sup> Campbell, A., Phillips, F., Shurbaji, A. (1993) Stable isotope study of soil and groundwater WIPP Site, New Mexico: Estimation of recharge to the Rustler aquifers. Technical completion report. New Mexico Watermanagement Education and Research Consortium (WERC).

En perfiles profundos en zonas áridas, los cambios en el clima, vegetación y condiciones de recarga combinados con las bajas tasas de recarga resultan en perfiles que no están en equilibrio. En estos casos la distribución del cloruro en la zona profunda no saturada no puede ser utilizada directamente para estimar la recarga en tiempo presente.

Bajo estas condiciones puede presentarse un perfil como el mostrado en la figura 2(c), en el cual en la zona radicular las concentraciones de cloruro son bajas reflejando el flujo repetido por la lluvia, bajo la zona radicular se alcanza un máximo reflejando la aridez presente, seguido de un decrecimiento que puede ser producido por variaciones climáticas importantes donde el clima pudo haber sido mas fresco y húmedo. En el caso del perfil de cloruro en estado no estable la aplicación del balance de masa no es aplicable.

La acumulación del cloruro a una determinada profundidad puede ser usado para la estimación del tiempo requerido para el desarrollo del perfil, si el cloruro esta actuando como un trazador ideal del agua, la edad del agua a cualquier profundidad puede estimarse como:

$$T = \frac{C_{\text{Total}} \cdot Z}{J_{\text{CL}}}$$

Donde, T es el tiempo necesario para acumular el cloruro a la profundidad Z y el cloruro total es calculado como la concentración en el suelo multiplicado por el contenido volumétrico del agua Y  $J_{\text{CL}}$  es el cloruro que entra por unidades de tiempo.

Esta técnica de acumulación de cloruro provee una medida integral de la recarga y el flujo a través de la zona no saturada. Es importante tener en cuenta las suposiciones que se tuvieron, para su aplicación; puesto que el cloruro debe

comportarse como un trazador ideal del agua y el flujo pistón es requerido en el suelo.

Así la técnica de los perfiles de solutos se puede emplear de forma única o junto con otros métodos para obtener información complementaria como: aspectos relacionados con el estudio de los procesos y mecanismos que afectan al flujo en la zona no saturada.

### **1.5 MEDIDA DEL ION CLORURO EN EL LABORATORIO**

El proceso de análisis de las muestras para estudios de la zona no saturada y en la zona saturada, son descritos generalmente en la mayoría de los estudios consultados, y aunque la metodología varía un poco, el procedimiento en todos los casos es similar. Básicamente para el análisis de perfiles en la zona no saturada, se toman las muestras de testigo y se almacenan herméticamente. En laboratorio se calcula el contenido gravimétrico de agua, posteriormente se añade agua destilada, se agita y se centrifuga para obtener el supernatant o sobrenadante. Esta fase líquida se analiza y se calcula la concentración de cloruro en el agua de los poros del suelo. Normalmente la densidad seca y el contenido gravimétrico de agua se determinan en todas las muestras previamente a la extracción del cloruro.

Las muestras llevadas al laboratorio para la determinación de la concentración del ión cloruro se realiza generalmente mediante espectrofotometría de absorción o cromatografía iónica. La concentración de cloruro en las muestras de agua de lluvia puede determinarse con mayor detalle mediante cromatografía HPLC (High Performance Liquid Chromatography), o por titulación por el método Argentométrico el cual consiste en la utilización de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ), como titulante y como indicador cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ).

## 1.6 TRAZADORES RADIACTIVOS

**1.6.1 Tritio** El tritio es conocido como  $^3\text{H}$  y es un isótopo radioactivo del hidrógeno y ha sido usado como trazador en el movimiento del agua subterránea desde principios de los años 60. El tritio natural ( $^3\text{H}$  o T) se produce en la atmósfera por el bombardeo de nitrógeno por el flujo de neutrones en la radiación cósmica (Clark y Fritz, 1997)<sup>9</sup> una vez se produce se oxida rápidamente produciendo agua tritiada (HTO). Las bases para su uso fueron las pruebas termonucleares de los años 50 y principios de los años 60 en donde se produjeron niveles relativos altos de tritio comparado con los niveles cosmogénicos naturales. Estas pruebas incorporaron el tritio a las moléculas de agua y lo introdujeron a la atmósfera como HTO y entra a formar parte del ciclo del agua obteniendo así lo que se ha convertido en un efectivo trazador radiactivo global. Sin embargo desde aproximadamente 1963 donde se encontraron las máximas concentraciones de tritio en precipitación continental excediendo 1000 UT (Fritz y Fontes, 1980)<sup>10</sup>, los niveles de tritio han ido decreciendo regularmente estando ahora mas cerca de los niveles cosmogénicos naturales, actualmente la precipitación contiene de 5 a 15 UT. Las concentraciones de tritio esta a menudo dadas en termino de unidades de tritio UT, donde  $1\text{UT} = \text{H}^3/\text{H} \times 10\text{E}^{-18} = 3.2 \text{ pCi/ Kg de Agua}$ .

El tritio es una herramienta muy común y disponible para identificar la presencia de recarga de precipitaciones posteriores al año 1953.

Su distribución en la precipitación esta condicionada por la latitud, proximidad al mar, condiciones climáticas y distancia a fuentes artificiales o zonas de ensayos termonucleares. Estos factores, junto a su desintegración radioactiva, permiten

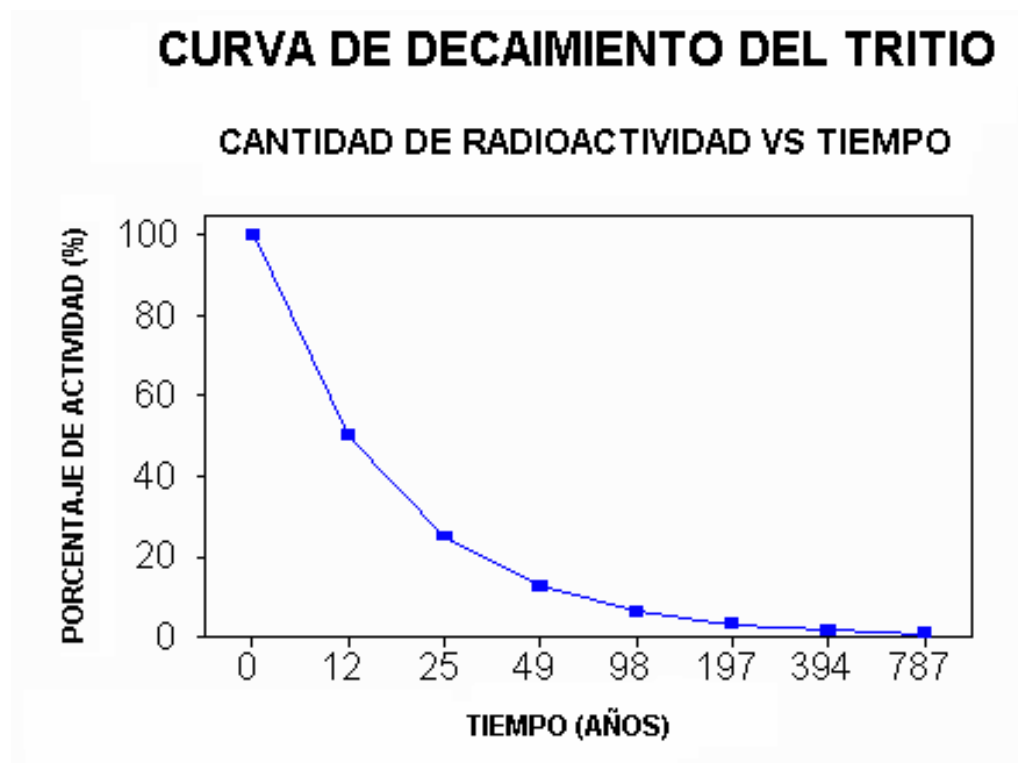
---

<sup>9</sup> Clark, I., Fritz, P., 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology: New York, Lewis Publishers.

<sup>10</sup> Fritz, P., and Fontes, J.Ch., 1980 Handbook of environmental isotope chemistry: Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 545 p.

utilizar los contenidos de tritio como indicadores de la presencia de aguas recientes en los acuíferos y determinar, bajo ciertas condiciones, zonas de recarga preferente. Su periodo de semi-desintegración es de 12.26 años, después de una vida media las concentraciones de tritio en el agua será la mitad de su valor original, al pasar dos vidas medias será un cuarto de su valor original y así sucesivamente.

Figura 3. Curva de decaimiento radioactivo del tritio.



Modificada de <http://wwwchem.csustan.edu/chem3070/images/tritium.gif>

La curva de decaimiento de tritio se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$C = C_0 \times e^{-\left[\frac{0.639}{t} \times (T - T_0)\right]}$$

Donde C es la concentración residual en el año T expresada en UT,  $C_0$  es la concentración en el año de infiltración expresada también en UT y  $T_0$  es el periodo de semidesintegración del tritio (12,32 años).

**1.6.1.1 El tritio en la zona no saturada** El uso de tritio en la zona no saturada, tiene sus limitaciones en la caracterización del movimiento del agua en el suelo, sin embargo la distribución del tritio en la zona no saturada puede ser utilizada para información sobre el movimiento del agua. En general el tritio puede estar distribuido de acuerdo a tres patrones. Bajo condiciones de flujo tipo pistón se esperaría encontrar un pico en la concentración de tritio ligeramente desplazado de las moléculas de agua líquida correspondiente infiltrada al mismo tiempo. Si el pico de tritio se encuentra en la zona radicular o justo debajo de esta se puede decir que la cantidad de agua que percola es baja. Sin embargo cuantificar que tan baja, requiere el uso de otros trazadores y métodos. Si el pico de tritio se encuentra bajo la zona radicular una simple estimación de la velocidad de flujo del agua podría obtenerse, tomando la distancia que hay del pico a la superficie y dividiéndola en el número de años que han pasado desde el pico en la concentración de tritio en la precipitación. Un tercer tipo de distribución se dió en estudios de la percolación en Australia donde Allison y Hughes (1983)<sup>11</sup> midieron concentraciones de tritio a profundidades mayores de 10mts. Atribuyendo la aparición de tritio en estas profundidades a alguna forma de flujo preferencial en

---

<sup>11</sup> Allison, G.B., and M.W. Hughes, 1983. The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region, *Journal of Hydrology* 602, pp. 157-173.

los canales dejados por las raíces. Un fenómeno similar fue reportado por la roca fracturada en las montañas de Yucca en Nevada (USA) (Fabryka-Martin, 1993)<sup>12</sup> estos perfiles generalmente no muestran un pico muy definido y a menudo presentan una distribución muy errática donde se encuentran profundidades que tienen concentraciones de tritio muy bajas (no medibles) seguidas de niveles muy altos en la zona inmediatamente inferior. Estas distribuciones indican que aguas en zonas discretas han tenido poco tiempo de ser diluidas por el agua de suelo que la rodea.

**1.6.1.2 Limitaciones del tritio como trazador** La recolección de agua para análisis de tritio en suelos áridos y semiáridos puede ser muy difícil, los análisis de tritio pueden ser hechos en muestras desde 4 ml hasta 300 ml de agua, dependiendo de la precisión y la tecnología usada así como los límites de detección ofrecidos por el laboratorio, en algunos casos esta cantidad de agua puede ser difícil de coleccionar en suelos secos donde los flujos de agua son muy bajos, mucha del agua que contiene tritio reciente puede encontrarse en la zona radicular donde las velocidades pueden ser mucho mas altas que en los sedimentos fundamentales, como resultado la velocidad del agua calculada puede dar un limite superior para la velocidad del agua del suelo profunda. Si el tritio producido por pruebas termonucleares esta contenido solamente en la zona radicular es una fuerte indicación de que la precolación es mínima. Bajo condiciones de flujo tipo no-pistón el tritio de infiltración reciente puede dispersarse verticalmente por toda la zona no saturada sin picos identificables.

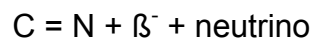
---

<sup>12</sup> Fabryka-Martin, J., M. Caffee, G. Nimz, J. Southon, S. Wightman, W. Murphy, M. Wickman, and P. Sharma. 1993. Distribution of chlorine-36 in the unsaturated zone at Yucca Mountain: an indicator of fast transport paths. Focus '93 Conference. Site Characterization and Model Validation. American Nuclear Society. Las Vegas. pp. 56-68.

Es importante anotar que una complicación adicional es que el tritio se mueve como líquido o como gas. Así incluso si el movimiento líquido en la zona no saturada es despreciable, el transporte de la fase gaseosa puede resultar en movimiento descendente de vapor de agua tritiado. Como el tritio se difunde hacia abajo en su fase vapor, algunas moléculas de agua tritiada se intercambian con moléculas de agua en el líquido hasta que alcanzan el equilibrio. Debido a la gran diferencia en las densidades del vapor de agua y el agua líquida, la mayoría del tritio en fase gaseosa es tomado por el líquido a través del intercambio difuso; como resultado el movimiento descendente del tritio por difusión en la fase gaseosa será mayor en la zona no saturada.

**1.6.2 Carbono 14** En la naturaleza existen tres isótopos del carbono: el  $^{12}\text{C}$ , el  $^{13}\text{C}$  y el  $^{14}\text{C}$  cuyos núcleos contienen los mismos seis protones, pero diferente número de neutrones (seis, siete y ocho respectivamente). Aproximadamente el 99 % del  $\text{CO}_2$  atmosférico es del tipo que contiene el carbono ligero  $^{12}\text{C}$ . Una pequeña parte, el 1,1 % del  $\text{CO}_2$ , es algo más pesado, ya que contiene  $^{13}\text{C}$ . Finalmente existe también en la atmósfera, en muy pequeña proporción, un tipo de  $\text{CO}_2$  que contiene  $^{14}\text{C}$ , que es radiactivo e inestable, y cuyas aplicaciones han sido muy importantes en diferentes campos de la ciencia.

El  $^{14}\text{C}$  (que posee 6 protones y 8 neutrones), tiene la particularidad de que es un isótopo inestable, que poco a poco va decayendo en nitrógeno,  $^{14}\text{N}$  (que posee 7 protones y 7 neutrones), y desaparece según la reacción:

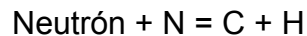


Este decaimiento es de tipo negatrón, el cual resulta del exceso de neutrones y en donde  $\beta^-$  es la partícula beta; además tiene una energía máxima de 0.158 MeV.

---

<sup>13</sup>  $\text{C}^{12}$ ,  $\text{C}^{13}$ ,  $\text{C}^{14}$ , hace referencia a carbono 12, carbono 13 y carbono 14, respectivamente.

En compensación de esta pérdida, nuevos átomos de  $^{14}\text{C}$  se forman continuamente en la atmósfera como producto del choque de neutrones cósmicos sobre otros átomos atmosféricos de nitrógeno:

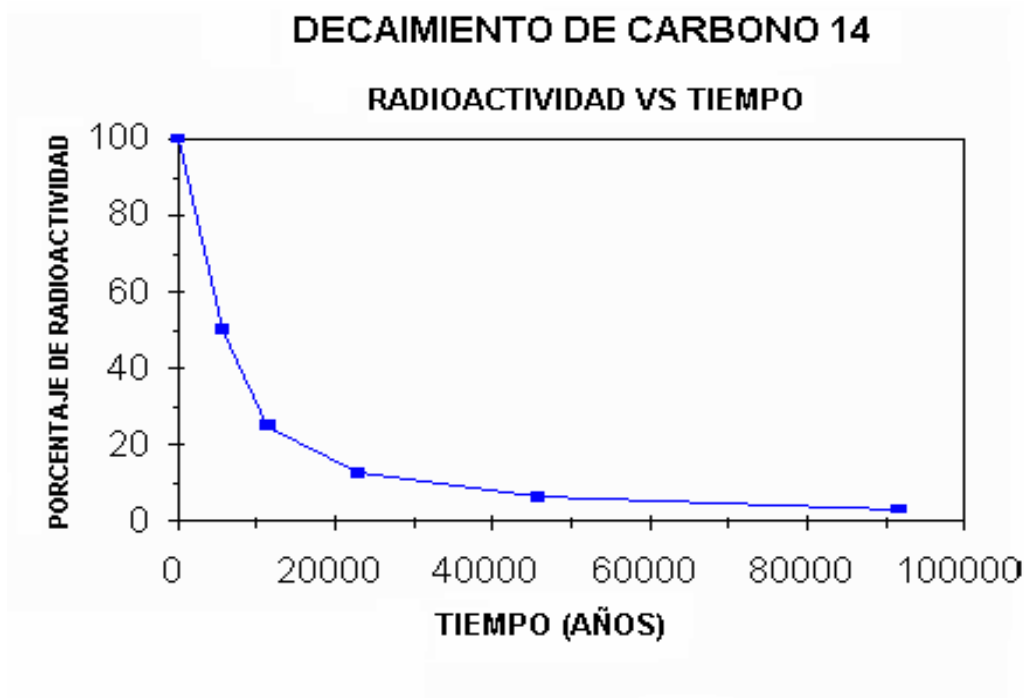


Estos neutrones son parte de la radiación cósmica galáctica que tras atravesar el sistema solar llega a la atmósfera terrestre. Los choques de los rayos cósmicos con los átomos de  $^{14}\text{N}$  y, por lo tanto, la producción de  $^{14}\text{C}$ , es máxima a unos 15 Km. de altura. Rápidamente los átomos de  $^{14}\text{C}$  así formados se oxidan a  $\text{CO}_2$  y se difunden y se mezclan por toda la atmósfera con el resto del  $\text{CO}_2$ .

Los procesos de desintegración y de formación de  $^{14}\text{C}$  se compensan de tal forma que la concentración de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera es (más o menos) constante.

El carbono 14 fue descubierto en 1934 por Grosse como una actividad desconocida en la endialita. En el mismo año Kurie, en la universidad de Yale, expuso el nitrógeno a neutrones a alta velocidad produciendo  $^{14}\text{C}$ ; en 1946 Libby lo identificó en el  $\text{CO}_2$  atmosférico y determinó su vida media en 5.568 años, la cual fue determinada después por Godwin con un nuevo valor de 5.730 años. Libby reconoció que debido a su presencia en materiales naturales, el  $^{14}\text{C}$  puede ser utilizado como herramienta para la datación de materiales que contienen compuestos de carbono derivados del  $\text{CO}_2$  atmosférico. Su tiempo de vida media de aproximadamente 8.000 años es ideal para datar depósitos que tengan una edad entre unas pocas décadas a unos pocos cientos de miles de años. Para el agua subterránea esto significa que puede ser aplicada a acuíferos que pueden contener agua formada en periodos que pueden estar comprendidos en la pasada era glacial. El  $^{14}\text{C}$  es una herramienta ampliamente utilizada para establecer la cronología de los sistemas de flujo de agua subterránea. Así el  $^{14}\text{C}$  es considerado la herramienta más importante para datar agua subterránea “vieja”.

Figura 4. Decaimiento radioactivo de Carbono 14.



Modificada de <http://wwwchem.csustan.edu/chem3070/images/c14decay.gif>

Una de los problemas para datar el agua subterránea con  $^{14}\text{C}$  es la determinación del contenido inicial de  $^{14}\text{C}$  en el tiempo de la recarga, en el momento cuando el agua se aísla del intercambio con el aire del suelo y se aleja del nivel freático.

El inventario global de  $^{14}\text{C}$  es de cerca de 75 toneladas. Su actividad específica es de  $13.56 \text{ dpm (gC)}^{-1}$ , donde dpm es el decaimiento por minuto.

El  $^{14}\text{C}$  puede ser producido antropogénicamente, la mayoría debido a las pruebas nucleares. En 1963 cuando se produjo el mayor número de pruebas de dispositivos nucleares, la actividad del  $^{14}\text{C}$  atmosférico alcanzó casi el doble del  $^{14}\text{C}$  natural. Este  $^{14}\text{C}$  es producido por la interacción del nitrógeno atmosférico con el alto flujo de neutrones producidos por la explosión de dispositivos nucleares

(principalmente termonucleares). Incrementos locales en el  $^{14}\text{C}$  atmosférico se han observado en las cercanías de plantas nucleares.

**1.6.2.1. Datación a partir de Carbono 14** En la atmósfera el  $^{14}\text{C}$  es incorporado en el  $\text{CO}_2$  y toma parte en el ciclo global del carbono. Es asimilado por las plantas. Excepto por el fraccionamiento isotópico, el  $^{14}\text{C}$  en la materia orgánica viva es el mismo que en el  $\text{CO}_2$  atmosférico. Luego que la materia orgánica muere las concentraciones de  $^{14}\text{C}$  decrecen de acuerdo al decaimiento radioactivo. Si no se presenta intercambio isotópico, el decaimiento radioactivo es el único factor para el decrecimiento del  $^{14}\text{C}$ , y si la actividad inicial es conocida, puede calcularse la edad a partir de la actividad de  $^{14}\text{C}$  medida en una muestra.

En aplicaciones de aguas subterráneas generalmente el carbono inorgánico disuelto ( $\text{CID} = \text{CO}_{2(\text{acuoso})} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) se extrae del agua y su valor de actividad es medida y comparada con la actividad inicial de  $^{14}\text{C}$ . La determinación de la actividad inicial no es sencilla y generalmente requiere de correcciones que tienen en cuenta la química del carbono en la zona saturada y no saturada. Así:

$$^{14}\text{C}(t) = ^{14}\text{C}(t_0) e^{-\lambda(t-t_0)}$$

$$\ln ^{14}\text{C}(t) = \ln ^{14}\text{C}(t_0) (-\lambda (t-t_0))$$

$$\ln [^{14}\text{C}(t)/^{14}\text{C}(t_0)] = -\lambda (t-t_0)$$

$$\Delta t = (t - t_0) = -\lambda^{-1} \ln [^{14}\text{C}(t)/^{14}\text{C}(t_0)] = T_{1/2} / \ln 2 \{ \ln [^{14}\text{C}(t_0)/^{14}\text{C}(t)] \}$$

$\lambda$ : constante de decaimiento radioactivo del  $^{14}\text{C}$ :  $\lambda = t^{-1}$ ;  $t$ : tiempo de vida media:  $t = T_{1/2} / \ln 2$ .

La ecuación anterior asume como conocida la actividad inicial de  $^{14}\text{C}$  de la muestra. Para  $^{14}\text{C}$  atmosférico la variabilidad en la producción de  $^{14}\text{C}$  pueden ser reconstruidas a partir de árboles cronológicos calibrados.

Para determinar la actividad inicial en el agua subterránea del carbono 14 puede estar determinada por los siguientes factores:

- Actividad en el suelo de  $\text{CO}_2$  (aire del suelo, respiración de las raíces); actividad=100pmc ; donde pmc es porcentaje moderno de carbono.
- Disolución de carbonatos (rocas limosas); actividad=0pmc
- Disolución de carbonatos que puede ser en la ZNS (sistema abierto) o en la ZS (sistema cerrado).
- El Intercambio isotópico puede producir un decrecimiento en la actividad de  $^{14}\text{C}$  adicional al decaimiento radioactivo.
- Una gran variedad de modelos pueden ser utilizados para estimar la actividad inicial de  $^{14}\text{C}$  en el agua subterránea. en los que se incluye el modelo "Vogel", otros modelos que corrigen la química del carbono usando balances de  $^{13}\text{C}$ , y el modelo NETPATH (Plummer).

La evolución química del agua subterránea a través de las vías de flujo, puede mostrarse de esta forma:



- Sistema completamente abierto: actividad= 100pmc
- Sistema completamente cerrado: actividad=50pmc

**1.6.3 Cloro 36** El cloro 36 es un isótopo natural del cloro que tiene 17 protones y 19 neutrones en su núcleo. Tiene una vida media de 310.000 años lo cual hace que sea un trazador ambiental ideal a largo plazo. Se produce naturalmente en la

parte superior de la atmósfera en pequeñas pero medibles cantidades cuando los rayos cósmicos chocan con los átomos de Argón 40 [(la reacción más importante por la cual el cloro se activa de  $^{35}\text{Cl}$  (a,b) a  $^{36}\text{Cl}$  donde a representa la partícula entrante (un neutrón, en este caso) y b la partícula saliente (un rayo gamma)], esta producción natural de  $^{36}\text{Cl}$  resulta en una pequeña cantidad del  $^{36}\text{Cl}$  depositado alrededor del globo terráqueo, con las mayores cantidades depositadas entre los 30 y 60 grados de latitud geomagnética.

El cloro 36 es relativamente inerte en ambientes subsuperficiales y se comporta conservativamente.

En los años 50 y 60 una gran cantidad de pruebas de armas nucleares se iniciaron alrededor del mundo. La detonación de dispositivos nucleares dió como resultado grandes cantidades de neutrones que activaron grandes cantidades de  $^{35}\text{Cl}$  presente en el agua oceánica. El  $^{36}\text{Cl}$  fue entonces transportado a la atmósfera donde se esparció alrededor del mundo.

El  $^{36}\text{Cl}$  que es producido en la atmósfera o transportado a esta es denominado "cosmogénico" y es esparcido por procesos atmosféricos. Después del tiempo de residencia en la estratosfera de aproximadamente 2 años, el  $^{36}\text{Cl}$  es transportado a la troposfera, donde se adhiere a las partículas de aerosol y cae en la precipitación con las mayores cantidades depositándose en las regiones de latitud media.

Así el  $^{36}\text{Cl}$  provee marcadores temporales para un gran número de estudios de los procesos recientes de recarga y movimientos de la sal. Dos principios son usados: la profundidad a la cual el pico de concentración se ha movido en el perfil de suelo da una estimación de las tasas de recarga en un sitio determinado, provee un entendimiento básico de los procesos de recarga como se conocen. En pozos que no contienen un pulso de Cl-36 se puede sugerir que se presentan tasas de recarga muy bajas, cercanas a cero o demasiado altas y que el agua que contenía

Cloro 36 ya salió del sistema. Además, en sistemas no confinados donde la recarga vertical predomina las concentraciones de Cloro 36 deben decrecer a medida que se aumenta la profundidad mientras que las concentraciones de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) permanece constante. De esta forma se puede combinar estudios de los procesos de recarga utilizando métodos diferentes como el balance de masa de cloruros junto con las consideraciones de decaimiento del Cloro 36 y así obtener resultados mucho mas acertados a partir de comparaciones hechas de los resultados obtenidos individualmente. Si se estudia la relación entre  $\text{Cl}_{36}/\text{Cl}^-$  en la precipitación en una región determinada se puede obtener información acerca de la dinámica de los procesos de recarga y la mezcla de sales previa a la infiltración de el agua superficial a los sistemas de agua subterránea. Se puede encontrar que la mezcla superficial de sales y la evapotranspiración modifican fuertemente las concentraciones iniciales en la precipitación, afectando los valores de entrada al sistema en determinado lugar de estudio.

## **2. PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRA PARA ANALISIS DE CLORUROS**

Definir un protocolo de muestreo que tenga en cuenta las condiciones presentes en el área de estudio es muy importante, ya que de esta forma se puede asegurar la continuidad en cualquier tipo de plan de monitoreo y caracterización del agua. Con el fin de implementar el método de balance de masa de cloruros en la Cuenca Superior del Río Lebrija es necesario realizar un plan de muestreo tanto de agua lluvia como de aguas subterráneas durante un periodo de tiempo prolongado con el fin de determinar las concentraciones presentes del ión cloruro, en nuestro caso será de 6 meses que sin embargo deberán ser complementados para completar el tiempo correspondiente a un ciclo hidrológico, la selección de los puntos de muestreo se realiza teniendo en cuenta el propósito del estudio así como las condiciones de representatividad, accesibilidad y seguridad, las cuales se definirán mas adelante.

### **2.1 NÚMERO Y FRECUENCIA DE LAS MUESTRAS**

La frecuencia y el número de muestras necesarias dependen del tipo de punto a muestrear y del propósito del estudio a realizar. Otro factor importante en la determinación de estos factores en nuestro estudio es el factor económico ya que la viabilidad económica de cualquier estudio o investigación es un factor determinante en la realización del mismo; para el propósito de este estudio la variable mas complicada de determinar es el aporte total (húmedo y seco) de cloruro al sistema hidrológico, además es necesario conocer las concentraciones presentes en el agua de recarga por lo cual es necesario realizar campañas de

muestreo para agua lluvia y agua subterránea independientes con procedimientos de muestreo diferentes.

Ya que el componente mas complicado de determinar es el flujo entrante de cloruro al sistema hidrológico y debido a la ubicación de las estaciones de muestreo para agua lluvia utilizadas se realizarán campañas de muestreo compuesto mensuales durante los primeros días de cada mes con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), por un periodo de 6 meses.

Por otra parte para el muestreo del agua de recarga se realizarán 2 campañas de muestreo puntuales en piezómetros y drenes escogidos previamente, esto debido a que el agua subterránea tiende a mantener sus propiedades y composición química.

## **2.2 METODOLOGIA DE MUESTREO.**

**2.2.1 Consideraciones generales** A continuación se presentan requerimientos necesarios en el proceso de muestreo, los cuales son definidos previamente.

### **Obtención de Envases**

Generalmente los envases de muestreo, hieleras y preservadores si llega a ser necesarios son indicados por el laboratorio. Por tanto se recomienda ponerse en contacto con el laboratorio antes de la fecha del muestreo para programar los análisis y embarques de los envases.

Se utilizaron botellas para muestras de polietileno ya que este material es inerte químicamente lo cual evita una alteración de la muestra, con una capacidad de 500 ml para asegurar una buena cantidad de muestra para el análisis.

Las hieleras usadas para el transporte de las muestras tienen que ser suficientemente grandes para almacenar envases y hielo, con una capacidad aproximada de 3 galones.

### **Colección y Revisión del Equipo de Muestreo de Campo**

La obtención de muestras representativas de agua lluvia comúnmente requiere muchas provisiones y equipo. Por tanto, se recomienda recoger y revisar el equipo dentro de las 24 horas anteriores al muestreo. Para este caso se utiliza equipos electrónicos y se debe revisar que operen apropiadamente.

Lista de provisiones para muestreo:

- + Autorización (carta, etc.).
- + Libreta de campo.
- + Plumas, marcadores con tinta indeleble y lápices.
- + Cinta de enmascarar.
- + Guantes de cuero, botas de goma y/o botas altas, impermeables para lluvia o sombrilla.
- + Teléfono celular, Radio AM/FM para el tiempo.
- + Baterías AA de repuesto.
  - + Hieleras selladas y envases de muestreo.
- + Bolsas de hielo.
- +Cinta de teflón.
- + Botellas de polietileno con tapa de rosca y tapón de seguridad.
- + Pintura reflectiva SP100.
- + Silicona.
- +Aceite mineral.

+ Muestreador de repuesto, cada vez que sea posible en caso de que haya algún problema en alguna estación, especialmente en la zona montañosa donde el acceso para el reemplazo de un muestreador es mas complicado.

Además se requiere realizar una medición de parámetros de campo, esto se realiza con la sonda multiparámetro, en nuestro caso se utiliza una sonda EIJKELKAMP de propiedad del Grupo de Predicción y Modelación Hidroclimatico GPH, por lo tanto la sonda debe revisarse previamente y cuidadosamente para asegurar su correcto funcionamiento y así evitar posibles problemas en el campo, la calibración de la sonda debe realizarse antes de realizar cualquier medición y se debe contar con datos (Temperatura ambiente) y sustancias de calibración (Ph4, Ph7 y solución KCL de 0.01 Molar), esto con el fin de llevar a cabo una calibración confiable para que los datos obtenidos lo sean también.

Todos los equipos que tienen contacto con una muestra de agua, deben ser limpiados cuidadosamente antes de rehusarlos.

La metodología de muestreo depende del tipo de punto que se vaya a muestrear, así:

**2.2.2 Metodología de muestreo para agua lluvia** Para el muestreo de aguas lluvias se seleccionaron diferentes puntos, partiendo de una red de muestreadores desarrollado por Guzmán y Camacho (2005)<sup>25</sup>,

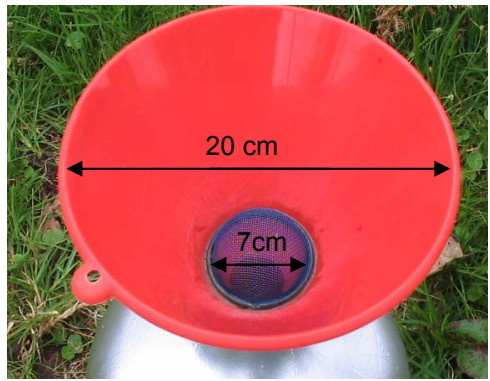
---

<sup>25</sup> Diego Guzmán y Hernán Camacho. Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables para obtener la recta meteórica local. Bucaramanga, 2005. Tesis de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

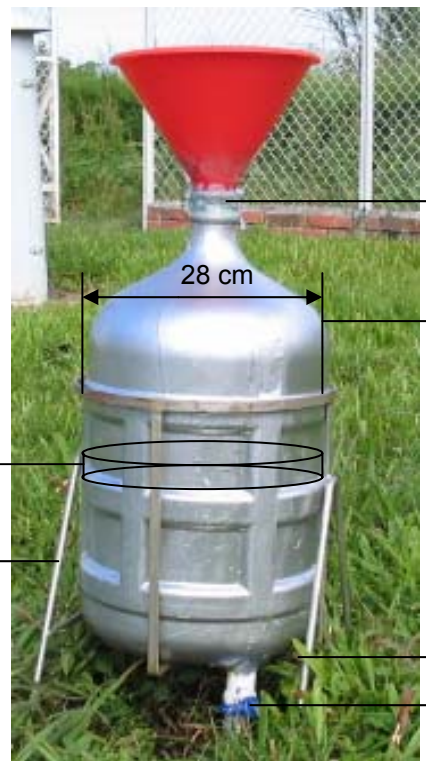
y utilizado para la toma de muestras para análisis de isótopos estables en la precipitación. Este muestreador consta de un recipiente plástico aforado cada litro, recubierto con pintura de aluminio plateada, se encuentra sobre una base metálica, posee además un embudo en su parte superior y un grifo en la parte inferior para la extracción del agua, para evitar posible contaminación de tipo externo tiene un filtro plástico en la boca del embudo. Las dimensiones y especificaciones de este muestreador se muestran a continuación.

Foto 1. Características del muestreador utilizado capacidad máxima 20 Litros.

Embudo y Filtro de Plástico



Capa de Aceite de 5 cm  
Base Metálica

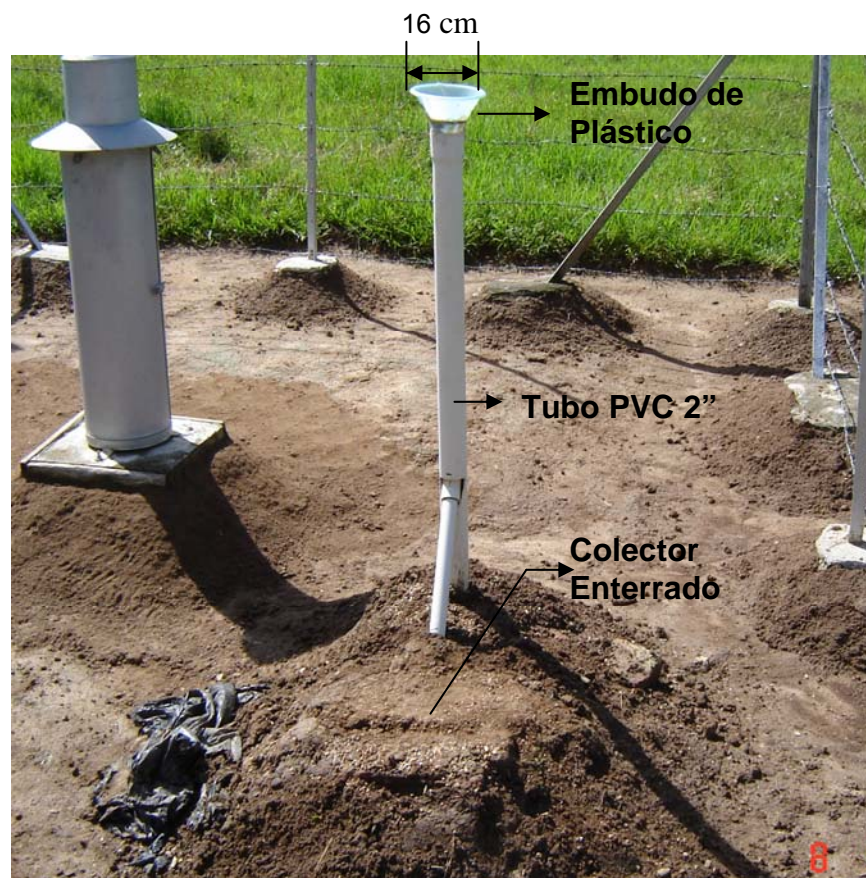


Se protege con nylon y silicona

Grifo

La estación la Granja Piedecuesta (Ver tabla 3), contaba con un muestreador diferente diseñado para las condiciones climáticas y de nivel freático alto presentes en esta área, donde los procesos de evaporación de la muestra se veían favorecidos. Este muestreador consta de una caja en concreto enterrada que protege un envase colector de plástico el cual está unido al colector de lluvia por medio de una manguera de conducción de 3/8" protegida con tubo de PVC de 1/2" y 2". El colector es un embudo de plástico protegido con un filtro para evitar la entrada de material no deseado.

Foto 2. Características del muestreador utilizado en la estación de Piedecuesta.



Para el muestreo de agua lluvia en la zona montañosa de la cuenca se contó con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga, realizando campañas de muestreo mensuales en la primera semana de cada mes con el recorrido Bucaramanga-Berlín, Berlín-Tona-Bucaramanga y luego las estaciones localizadas en Piedecuesta y Aeropuerto Palonegro. En cada estación debe realizarse como primer paso la revisión del estado del muestreador, la base o el embudo, para verificar que no haya sido dañado o que presente algún problema, si es así se deben tomar las medidas necesarias para su arreglo en el sitio o reemplazo inmediato. Es importante realizar cualquier anotación en la libreta de campo cuando se presente algún problema en cualquier estación; luego se procede a tomar la lectura del volumen de agua almacenado en el recolector para posteriormente compararlo con los datos obtenidos de los pluviómetros en las estaciones que cuentan con estos instrumentos, esto permite observar si hay cambios significativos en la cantidad de agua presente en el muestreador, donde este fenómeno puede ser producido por evaporación de la muestra o fugas en el muestreador; luego para la recolección de muestras para análisis del ión cloruro es necesario tener envases limpios y secos, estos además se deben purgar o impregnar con el agua a almacenar. El número de purgas es de 3 a 4 veces si es posible, el envase se debe marcar con tinta impermeable para su posterior identificación en el laboratorio y hacer un registro de cada muestra recolectada, además se debe sellar con cinta teflón para evitar el escape del agua. Las muestras se refrigeran a una temperatura aproximada de 4°C. para asegurar la preservación de las muestras antes de que lleguen al laboratorio.

El instrumento que sirve como recolector de aguas lluvias posee una capa de aceite mineral para evitar la evaporación, este aceite se debe evitar en la muestra, por esto el proceso de envasar la muestra, requiere sumo cuidado, Guzmán y Camacho (2005) recomiendan un espesor de aceite mineral de 2 cm en los muestreadores para mitigar el efecto mencionado.

Finalmente debe desocuparse el muestreador, dejando solo la capa de aceite inicial, además debe protegerse nuevamente la zona de lectura con cinta de enmascarar y pintura reflectiva. Debe tenerse en cuenta que en cada muestreo puede perderse alguna cantidad de aceite mineral, se recomienda observar y registrar el nivel de aceite cuando el muestreador se ha desocupado, de manera que si el nivel observado es muy bajo se complete el nivel aconsejado.

Paralelamente debe tomarse un volumen de la muestra de aproximadamente 50 ml, para realizar las pruebas de campo (temperatura, Ph, Potencial redox, Salinidad y conductividad) para registrarlos en la libreta de campo; la sonda utilizada debe calibrarse en el primer punto de muestreo del recorrido, donde se disponga de datos de temperatura confiables para su calibración, sin embargo debe revisarse su correcto funcionamiento en cada estación, así como el estado de los electrodos y las conexiones; la realización de los análisis de campo debe realizarse preferiblemente a la sombra y protegida de la lluvia (llegado el caso), para evitar que la temperatura este variando constantemente durante el tiempo de estabilización de los datos.

En el caso de la estación Granja Piedecuesta donde se cuenta con un muestreador enterrado, luego de hacer la revisión de la estación, debe procederse a la extracción del recipiente de almacenamiento, para la obtención de las muestras necesarias y del volumen para los análisis de campo y luego reemplazarlo por uno nuevo donde se almacene el agua del siguiente periodo.

**2.2.3 Metodología para muestreo de agua subterránea** El muestreo de piezómetros se realizó con un muestreador de PVC de 1 pulgada de diámetro este consta de tres secciones unidas por medio de accesorios del mismo material; la primera sección de longitud 80 cm. actúa como lastre y contiene arena y plomo con material aislante en la parte superior, la segunda sección de almacenamiento con una longitud de 120 cm. en donde se recolecta la muestra y que va unida a la

tercera sección la cual tiene una válvula para regular la entrada de agua y se encuentra sujeta por una guaya metálica, esta guaya sirve de extracción de la muestra.

Foto 3. Muestreador de agua subterránea (Piezómetros)

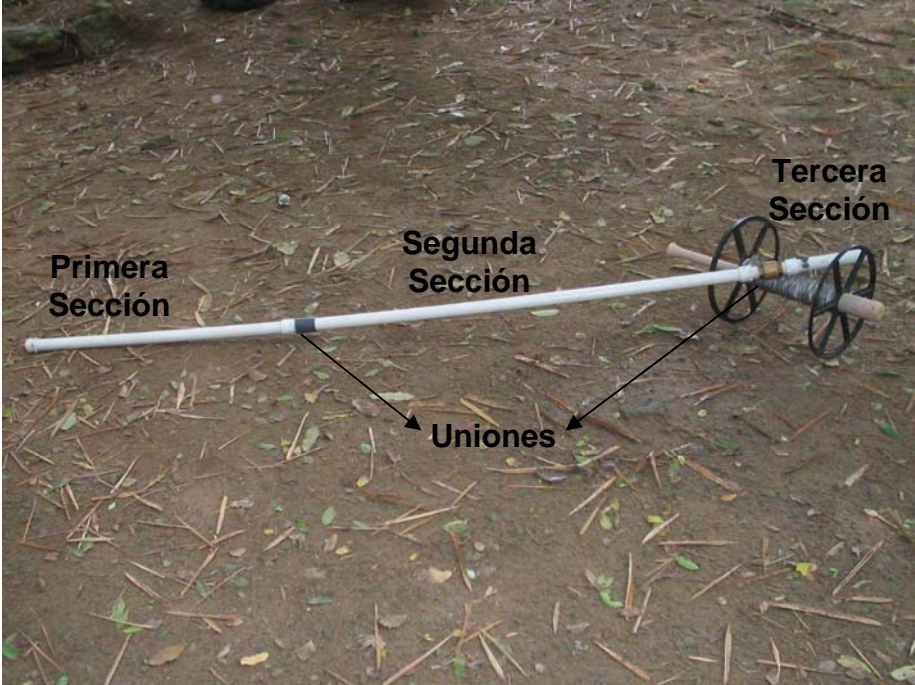
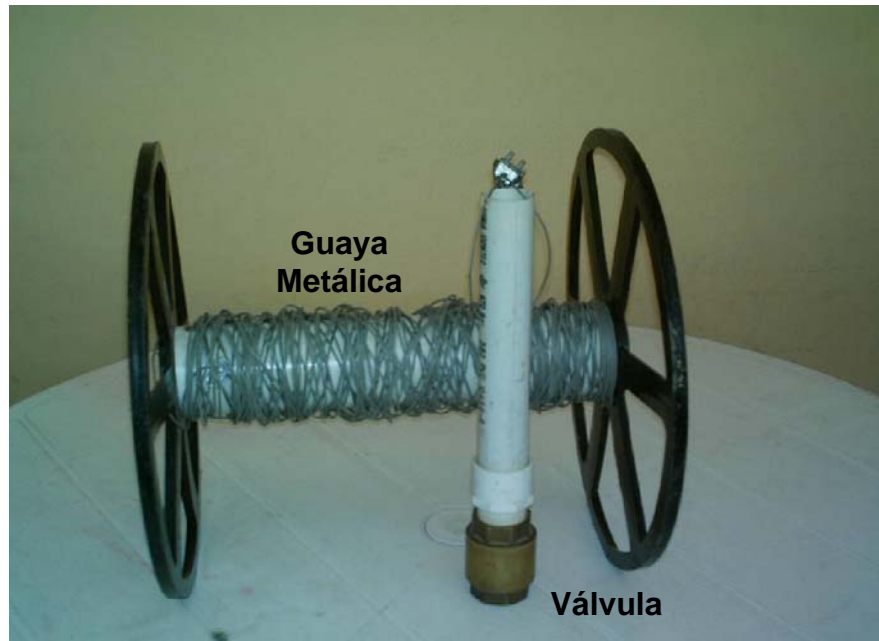


Foto 4. Detalle de muestreador de agua subterránea.



Además se cuenta con un medidor de niveles, es importante registrar el nivel del pozo antes y después de abatir el nivel del piezómetro.

Foto 5. Medidor de niveles.



Inicialmente debe revisarse el muestreador para verificar que las uniones estén trabajando correctamente y no se presenten fisuras o daños en el material que puedan llevar a problemas durante el proceso de muestreo. Luego debe armarse el muestreador teniendo especial cuidado de que las secciones estén muy bien unidas. Posteriormente se procede a abatir el nivel del pozo por lo menos 4 veces para tratar de que la muestra sea lo mas representativa de las aguas originadas a las profundidades correspondientes; luego debe disponerse a la recolección de la muestra en las botellas, estas se deben purgar previamente con el agua a almacenar; estas muestras deben tomarse lo mas cerca de las rejillas filtrantes ya que allí se presenta una recirculación del agua del acuífero. Es igualmente necesario tomar los parámetros de campo con la sonda múltiparametros.

Si se cuenta con una bomba se debe dejar bombear por unos 5 minutos antes de tomar la muestra, generalmente la utilización de bombas permite obtener una mejor calidad de la muestra aunque su utilización depende de factores económicos. Estas bombas pueden trabajar por mecanismos de impulsión por succión, impulsión por gas o por desplazamiento positivo sumergible cada una de las cuales tiene sus ventajas y desventajas.

Para obtener muestras en drenes es necesario verificar la limpieza del envase, su purga, así como realizar las pruebas de campo, adicionalmente es importante registrar el caudal de salida que se presenta.

**2.2.4. Determinación de las pruebas de campo** Para determinar los parámetros de campo se utilizó la sonda ya mencionada EIJKELKAMP de propiedad del GPH, ésta debe ser calibrada previamente antes de cualquier medida de parámetros; su adecuada utilización, calibración y cuidado se encuentran en el manual del usuario desarrollado por el GPH.

Foto 6. Sonda EIJKELKAMP.



Los parámetros de campo tenidos en cuenta fueron:

### ↪ **Temperatura**

La temperatura es una variable física que influye notablemente en la calidad de un agua. Afecta parámetros o características tales como la solubilidad de gases y sales, la cinética de las reacciones químicas y bioquímicas, desplazamientos de los equilibrios químicos, tensión superficial, desarrollo de organismos presentes en el agua; las descargas de agua a altas temperaturas pueden causar daños a la flora y fauna de las aguas receptoras al interferir con la reproducción de las especies, incrementar el crecimiento de bacterias y otros organismos.

La influencia más interesante va a ser la disminución de la solubilidad del oxígeno al aumentar la temperatura y la aceleración de los procesos de putrefacción.

La temperatura juega un papel importante en la distribución, periodicidad y reproducción de los organismos. La temperatura óptima del agua para beber está entre 10 y 14°C.

## ↩ PH

El PH de un agua, que indica la reacción ácida y básica de la misma es una propiedad de carácter químico de vital importancia para el desarrollo de la vida acuática, la naturaleza de las especies iónicas que se encuentran en su seno, el potencial redox del agua, el poder desinfectante del cloro, etc.

Por lo general las aguas naturales tienen un cierto carácter básico, unos valores de PH comprendidos entre 6,5-8,5, los océanos tienen un valor medio de 8.

La lluvia normal es ligeramente ácida porque el dióxido de carbono se disuelve en ella, por lo tanto tiene un PH de aproximadamente 5.5

Generalmente un PH muy ácido o muy alcalino está relacionado con la presencia de desechos industriales.

Las aguas residuales de la industria petrolera, particularmente aquéllas de las operaciones de refinación, pueden ser muy ácidas o alcalinas debido al uso de productos químicos en los procesos de refinación.

Tabla 1. Clasificación del agua según el PH.

ACIDEZ / BASICIDAD	PH
ACIDEZ FUERTE	< 5
ACIDEZ MEDIA	5 – 6
ACIDEZ DÉBIL	6 – 7
NEUTRA	7 – 7,5
BASICIDAD DÉBIL	7,5 – 8
BASICIDAD MEDIA	8 – 9
BASICIDAD FUERTE	> 9



### **Conductividad**

La conductividad eléctrica es la capacidad que el agua tiene de conducir la corriente eléctrica. El agua pura tiene una conductividad eléctrica muy baja. El agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos. El parámetro de conductividad eléctrica no nos indica, específicamente, cuales son los iones presentes en una determinada muestra de agua, pero puede ayudar a detectar posibles impactos ambientales que ocurran en la cuenca de desagüe debido a la descarga de desperdicios industriales, minería, aguas fecales, etc.

- indica el grado de acidez
- varía con la temperatura.
- a 25°C (la determinación)
- indicador de la salinidad del agua.

## ↪ **Potencial Redox**

La medida del potencial redox en medios naturales demuestra la capacidad de óxido-reducción del sistema, causada directamente por las condiciones químicas de éste, que muy a menudo son inducidas por actividades microbiológicas (por ejemplo, bacterias sulfato-reductoras y ferro bacterias). El Potencial Redox es pues un indicador del grado de contaminación de gérmenes en el agua.

Ahora bien, la medida de este parámetro no es fácil y su dificultad aumenta en los sistemas naturales, fundamentalmente aguas (superficiales y sobre todo subterráneas). Esta dificultad se debe a diferentes causas, algunas de las cuales son: la presencia de pares redox a bajas concentraciones; su electro actividad en relación con el electrodo de medida (Pt, Au, grafito); la existencia de equilibrios como el sistema  $H_2O/O_2$ , de difícil medida, etc. Otro aspecto que debe tomarse en cuenta es la influencia en la calidad de la medida de los electrodos, tanto el de referencia como el indicador.

## ↪ **Salinidad**

La salinidad es alta en latitudes medias, en donde la evaporación es alta y las precipitaciones bajas. La salinidad es baja cerca del ecuador, debido a que hay gran cantidad de precipitaciones

Cuando el agua fresca, agua subterránea y suelos, son alterados a causa de la intervención del hombre, y la salinidad aumenta, podría haber un efecto deprimente en la vida que allí habita. Los cambios en la salinidad, a causa de residencias de personas o actividades comerciales o industriales, pueden acabar con la vida vegetal, acuática y animal de un área determinada. Una manera de medir la cantidad de sal disuelta en el agua, es mediante el análisis de la concentración de sal en ella. He aquí los diferentes tipos de agua:

UNIDADES - vienen recogidas en partes por millón (p.p.m.) pero las unidades reales en las que se cogen son el mg/l., también está la medida en °H franceses (grados hidrométricos), que equivale a 10 mg/l.

- AGUAS MUY BLANDAS -> cuando la concentración de sales es igual a  $\leq 10$  °H franceses.

- AGUAS BLANDAS -> entre 10 - 15 °H franceses.

- AGUAS DURAS -> concentración entre 30 - 50 °H franceses.

- AGUAS MUY DURAS ->  $> 50$  °H franceses.

Tabla 2. Clasificación del agua según la salinidad.

<b>SALINIDAD</b>	<b>(g/L)</b>
AGUAS DE SALINIDAD DÉBIL	< 0,2
AGUAS DE SALINIDAD MEDIANA	0,2 – 1,0
AGUAS DE SALINIDAD FUERTE	> 1,0

Para garantizar la calidad de los resultados de las mediciones in situ, se recomienda efectuar varias mediciones sucesivas y evaluar las diferencias. Si los valores encontrados difieren significativamente, será preciso repetir la medición siguiendo estrictamente las instrucciones establecidas en el protocolo.

Las siguientes son las diferencias aceptables entre valores medidos:

- Temperatura del Agua 0,5 °C
- Oxígeno Disuelto 0,4 mg/l
- pH 0,2 pH unidad

- Conductividad 2% de la escala completa (40 S/cm)
- Salinidad 0,4 partes por mil.

### 2.3 ANALISIS DE LAS MUESTRA EN EL LABORATORIO.

Las muestras para análisis de cloruros son analizadas en el laboratorio del Centro de Estudio e Investigaciones Ambientales CEIAM ubicado en la sede de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander UIS.

Foto 7. Laboratorio CEIAM.



Las muestras se refrigeraron a una temperatura aproximada de 4°C desde su recolección hasta la entrega al laboratorio puesto que es esencial asegurar la integridad de la muestra. Es por tal motivo que debe envolverse y empacar las

muestras con seguridad (cinta teflón). Además se identificaron con los siguientes datos:

- ↵ Identificación del punto.
- ↵ Nombre
- ↵ Fecha y hora del muestreo
- ↵ Temperatura
- ↵ Parámetros de campo
- ↵ Parámetro a analizar

Existen diferentes métodos para hallar la concentración del ión cloruro en el agua dentro de las cuales se encuentran el método de nitrato de mercurio, la cromatografía líquida, es el método más recomendado, pero el más costoso; también el método argentométrico, este se basa en la titulación con nitrato de plata, brindando buenos resultados, su inconveniente es que requiere un volumen de la muestra bastante grande y su límite de detección no es muy aceptable en este tipo de muestras, este método es recomendable para agua con concentraciones entre 1,5 y 100 mg/l de cloruros. El método utilizado por el laboratorio (CEIAM) es el potenciométrico. Este método es apropiado para la determinación de cloruros en el agua por valoración con nitrato de plata con un electrodo de vidrio y plata-cloruro de plata. El punto final de la valoración es aquella lectura del instrumento en la que se aprecia un cambio mayor en el voltaje con un incremento pequeño y constante del nitrato de plata añadido. El límite de detección obtenido para las muestras enviadas es de 0.02 mg/l de cloruros.

Para la validación de los datos suministrados por el laboratorio es recomendable realizar un balance iónico de una cantidad apreciable de las muestras recolectadas.

Foto 8. Potenciómetro.



Foto 9. Almacenamiento de Muestras.



### **3. LOCALIZACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO**

En el presente capítulo se presentarán la información necesaria de los diferentes puntos de muestreo, además de las características más importantes de la zona de estudio, como lo son: su variabilidad climática, topografía y geología. Esta red de muestreo está distribuida a lo largo de la cuenca superior del río Lebrija (Zona de estudio), y cuenta con la seguridad necesaria que estos muestreos exigen.

#### **3.1 GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO**

En la zona de estudios se han venido desarrollando diferentes estudios, estos han suministrado datos importantes que reafirman que esta área se debe preservar y profundizar en diferentes aspectos.

La cuenca superior del río Lebrija se encuentra ubicada geográficamente en la parte nororiental del departamento de Santander, (Colombia) (Ver figura 5), y está entre las coordenadas 1°10'50"00" y 1°12'30"00" de latitud norte, y las coordenadas 75°27'60"00" y 75°28'20"00" de longitud oeste. Según el IGAC la zona de estudio se encuentra en las planchas escala 1: 25000, 120-II-B, 121-I-A y 119-IV-B.

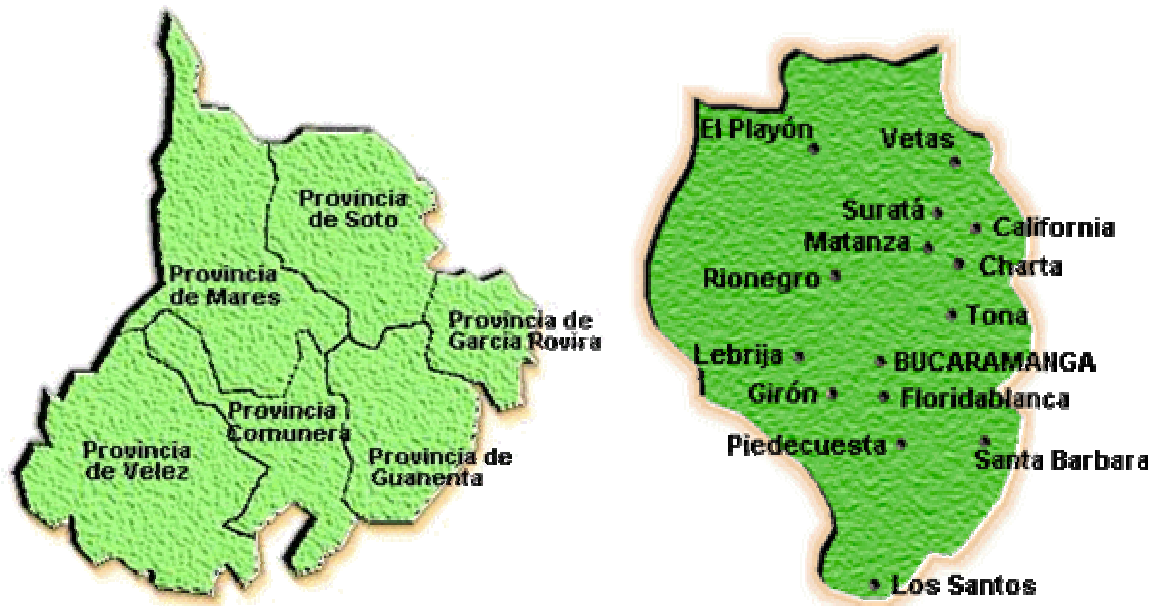
Figura 5. Mapa de Santander y ubicación de la zona de estudio.



Modificada de Guzmán y Camacho, 2005.

**3.1.1 Cuenca Superior del Río Lebrija.** La cuenca Superior del Río Lebrija se encuentra localizada en la Provincia de Soto (Departamento de Santander); el área de estudio es aproximadamente 1280 km<sup>2</sup> y comprende los municipios de: Piedecuesta, Floridablanca, Girón, Lebrija, Tona, Los Santos, Vetas, Surata, El Playón, Charta, Matanza, Santa Bárbara, Bucaramanga y su área Metropolitana. Además la cuenca del río Lebrija contiene las subcuencas del Río Surata, Tona, Río Frío y Río de Oro.

Figura 6. Mapa de la Provincia de Soto



<http://espanol.geocities.com/sanjuangiron/textos/provincias.htm>

**3.1.2 Descripción Climática.** A lo largo de la zona se presenta gran variabilidad climática, influenciada por la orografía y los vientos alisios. Los vientos alisios penetran el territorio por el valle del Magdalena; en parte se desvían y descargan su humedad en las partes altas del cañón del Lebrija y en la parte occidental de la cuenca; luego los vientos toman dirección nor-noroeste y descargan su humedad en las partes altas de la cordillera oriental creando un gran centro de humedad en las partes altas de esta cordillera en los alrededores de la Corcova y la Mariana, sitios donde nacen los ríos Frío, del Hato, de Oro y parte del Tona. Estos vientos a su vez generan un área muy seca en los alrededores de Girón. Otro componente de estos vientos recorre el cañón del Río Suratá y descargan su humedad en las partes altas de la cordillera, en la zona donde nacen los principales ríos, tales como el Tona, Charta, Vetas y Suratá.

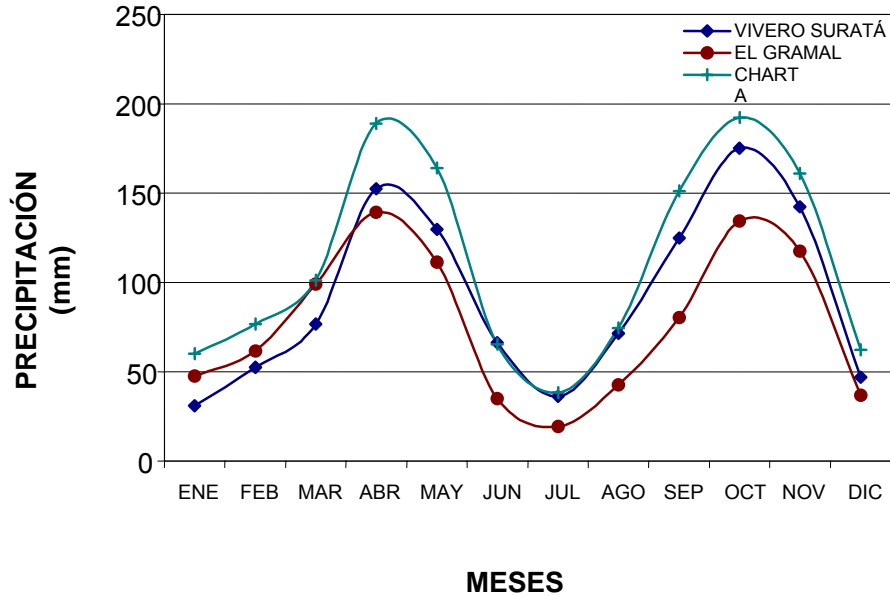
La variabilidad climática presente en la zona de estudio varía desde climas calidos-tropicales a climas fríos con presencia de páramos. Las temperaturas

varían según la altitud entre los 5°C (Alturas mayores a los 3800 m.s.n.m) y 20°C (Alturas por debajo de los 1800 m.s.n.m). La temperatura media varía aproximadamente en forma lineal con respecto a la altitud, un grado Celsius cada 170 m.s.n.m; además existen variaciones en los factores climatológicos como la precipitación, brillo solar, humedad relativa, evaporación y evapotranspiración.

El régimen de precipitación presente en la zona es bimodal, (Ver figura 7), el cual es determinado por los movimientos de la zona de confluencia intertropical que hacen que para un mismo año, se presenten dos periodos de invierno (meses más lluviosos marzo-mayo y septiembre-noviembre) intercalados con dos periodos de verano. La pluviometría se encuentra entre los 700 y los 2200 mm anuales, siendo la precipitación media de la cuenca de 1206.63 mm/año y su evapotranspiración promedio (Mendoza y Sandoval, 2002) de la cuenca alrededor de los 658 mm/año.

Dentro de la Cuenca, se presenta un relieve abrupto y montañoso y la pendiente es un factor importante a considerar, teniendo en cuenta que esta varía entre plana y escarpada.

Figura 7. Comportamiento Bimodal de la precipitación en la C.S.R.L.



Modificado de Mendoza, C., y Sandoval, R. 2002

### 3.1.3 Descripción Geológica.

En la C.S.R.L se definen cuatro zonas que corresponden a formaciones geológicas diferentes:

- La Zona Montañosa está formada por rocas ígneas-metamórficas, las cuales conforman suelos que van desde arenosas-franco hasta arcillosas, con pendientes entre 25° y 40° conformando el 78% del área total de la cuenca, además posee un drenaje dendrítico con erosión que va desde leve a excesiva. Principalmente esta conformada por rocas tipo granito localizado en la zona de Berlín; además tipo micacitas, neis cuarzofeldespático que aflora hacia Pan de Azúcar y el neis Anfibólico de espesor variable; este se puede apreciar altamente meteorizado en la vía Bucaramanga-Pamplona.

- La Zona Occidental, conformada por suelos de textura arenosa. Este sector se localiza al occidente de la falla de Bucaramanga hasta el límite de la C.S.R.L. Dentro del sector se encuentra la falla denominada de Girón o Suárez - Río de Oro, esta falla se extiende desde el sur, pasa cerca de Chocóa y continúa hacia el norte paralelo al Río de Oro por su margen izquierda hasta que se intercepta con la falla de Bucaramanga en el punto medio de la distancia Rionegro–Bucaramanga. Esta falla produce a su vez, una subdivisión en el sector en dos subsectores: La Mesa de Lebrija al occidente y la Terraza de Bucaramanga al oriente. Esta última incluye a su vez la Mesa de Ruitoque y el valle del Río de Oro. Esta zona comprende el 10% del área de la cuenca.

- La Formación Bucaramanga, Se trata de un importante depósito sedimentario de edad Cuaternaria que morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga; esta zona comprende el 7% del área total de la cuenca. Se divide en 5 miembros: Calcáreo, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos.

- La Falla Bucaramanga-Santamarta, se encuentra en la meseta de Bucaramanga, con una formación geológica tipo aluvial conformada por gran variabilidad litológica proveniente de las quebradas que nacen en el macizo de Santander. Esta zona comprende alrededor del 5% del área total.

### **3.2 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO**

Con el fin de llevar a cabo este estudio, fue necesario determinar los puntos a muestrear tanto de agua lluvia, como de aguas subterráneas, para esto se disponía de una red de muestreadores que han sido utilizados por el GPH en estudios anteriores (Isótopos Estables), además dicha red está a cargo de diferentes instituciones como la CDMB y el Acueducto Metropolitano de

Bucaramanga (AMB). Esto es muy importante debido a que los muestreadores pueden ser dañados o las muestras alteradas en lugares donde no se cuenta con alguna medida de seguridad. De esta forma, se tuvieron en cuenta varios aspectos para seleccionar un punto de muestreo:

- 1 *Accesibilidad a los puntos.* Es importante que los puntos seleccionados no sean de difícil acceso, ya que es necesario trasladar el equipo necesario, descrito anteriormente hasta el muestreador; además en caso de reposición o arreglo de algún muestreador, se pueda realizar de la manera mas rápida y eficaz, durante el transcurso del proyecto se contó con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la cual facilitó el transporte en las campañas de muestreo realizadas.
- 2 *Distribución espacial uniforme.* Los puntos seleccionados deben estar a lo largo de la región de estudio, de igual manera es importante contar con muestreadores en las fronteras de la zona.
- 3 *Conocimiento de características hidrológicas de la región.* El conocimiento de la precipitación en la estación, juega un papel importante, puesto que es un parámetro de comparación (Entre el agua del pluviómetro y el muestreador), e indica además si se presenta evaporación importante en el muestreador.
- 4 *Representatividad.* La representatividad de los datos esta asociada a la vez con la distribución espacial de las estaciones, si los puntos de muestreo son representativos de las condiciones hidrológicas presentes en una zona se logra abarcar toda el área de estudio de manera eficiente.

*Protección del área.* La protección es muy importante por que brindan seguridad ante la muestra y brinda confianza en cuanto a la conservación del muestreador; pues algún daño requiere un repuesto casi de forma inmediata y se debe evitar a toda costa que la muestra se vea afectada de alguna forma.

6 *Consideraciones económicas.* La economía es un factor importante en un estudio hidrológico y debe ser considerada para el planeamiento del mismo. Así, tanto el número de muestreos como el número de puntos debe ser acorde al capital disponible.

Debido a que se realizaron muestreos tanto en agua lluvia como en aguas subterráneas (pozos y drenes), se presentan primero las ubicaciones de los muestreadores seleccionados para la precipitación y luego los piezómetros y drenes utilizados.

### **3.3 ESTACIONES SELECCIONADAS PARA ANALISIS DEL ION CLORURO**

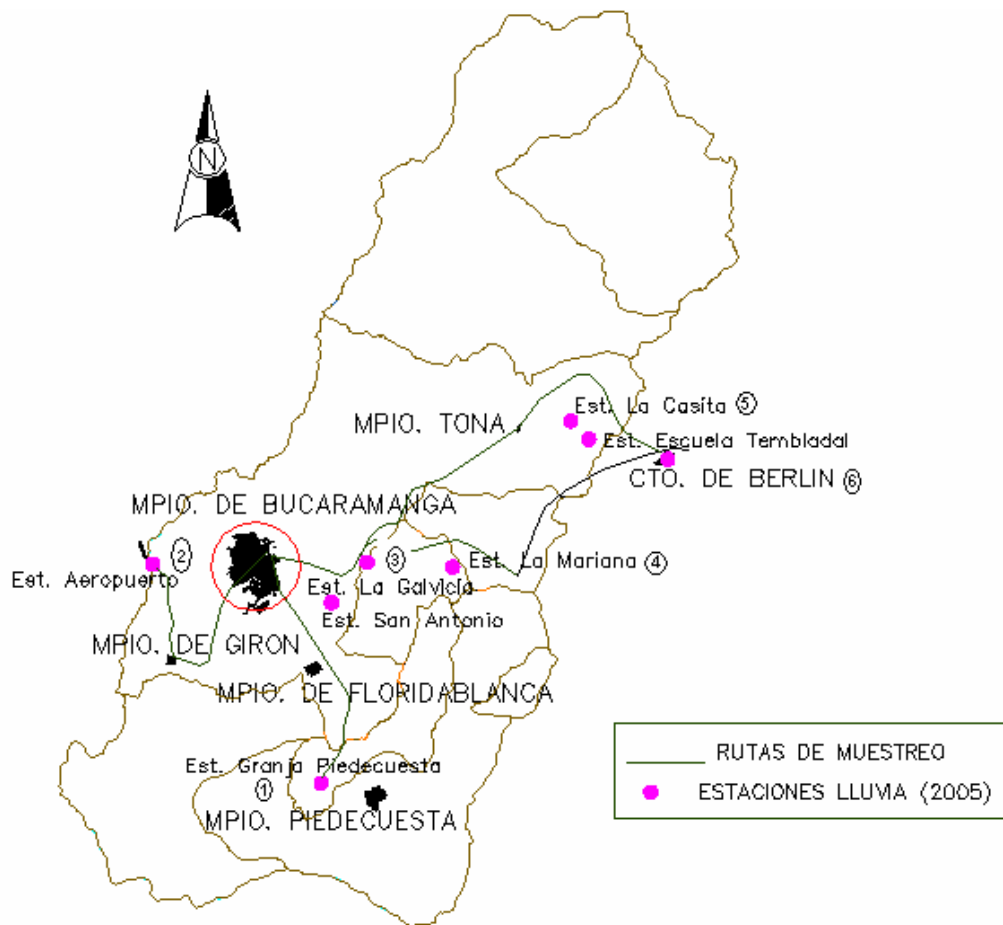
Fueron seleccionadas 6 estaciones para la recolección de agua lluvia y 5 puntos para la recolección de agua subterránea. Todas las estaciones de agua lluvia, exceptuando la C.EXP. UIS Casa, cuentan con información pluviométrica del sitio.

**3.3.1 Estaciones de agua lluvia** Estas estaciones se encuentran distribuidas a lo largo de la zona de estudio, sus características y la información necesaria para cada una de las diferentes estaciones seleccionas se encuentran a continuación:

Tabla 3. Estaciones de precipitación

MUESTREADOR #	CODIGO IDEAM	TIPO	NOMBRE	SUB-CUENCA	DPTO	MUNICIPIO	COORD. GPS	ELEV.GPS	INST
1	2319070	PG	PIEDRECUESTA GJA	LATO	SANT	PIEDRECUESTA	0700N-7305W	1000	IDEAM
2	2319513	SP	AEROPUERTO PALONEGRO	DE ORO	SANT	LEBRIJA	0708N-7311W	1189	IDEAM
3	2319040	PM	LA GALVICIA	TONA	SANT	FLORIDABLANCA	070732N-730336W	1848	IDEAM
4	Est.AMB	PM	LA MARIANA	FRIO	SANT	FLORIDABLANCA	070732N-730037W	2481,2	AMB
5	NO EST.		C.EXP.UIS CASA	TONA	SANT	TONA	071230N-725617W	2659,7	UIS
6	3701502	CO	BERLIN	JORDAN	SANT	TONA	071122N-725218W	3306,7	IDEAM

Figura 8. Distribución espacial de las estaciones seleccionadas para agua lluvia.



Referenciados por los Ingenieros Ángel Anaya y Eduard Niño.

El tipo de muestreador utilizado para la recolección de agua lluvia y su posterior análisis del ión cloruro en el laboratorio, fue utilizado a su vez para la recolección de las muestras de isótopos estables ( $O^{18}$  y D), puesto que no se encuentra problema alguno y la cantidad de agua es suficiente para cumplir con la demanda solicitado por los laboratorios.

A continuación se ilustrara las diferentes estaciones seleccionadas para la recolección de agua lluvia y su estado actual.

Foto 10. Estación No1 Granja Piedecuesta (1000 msnm). IDEAM.



Foto 11. Estación No 2 Aeropuerto Palonegro (1189 msnm). IDEAM



Foto 12. Estación No 3 La Galvicia (1848 msnm). IDEAM



Foto 13. Estación No 4 La Mariana (2481 msnm). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga



Foto 14. Estación No 5 La Casita (2660 msnm). Cuenca Experimental Río Sucio



Foto 15. Estación No 6 Berlín (3306.7 msnm). IDEAM



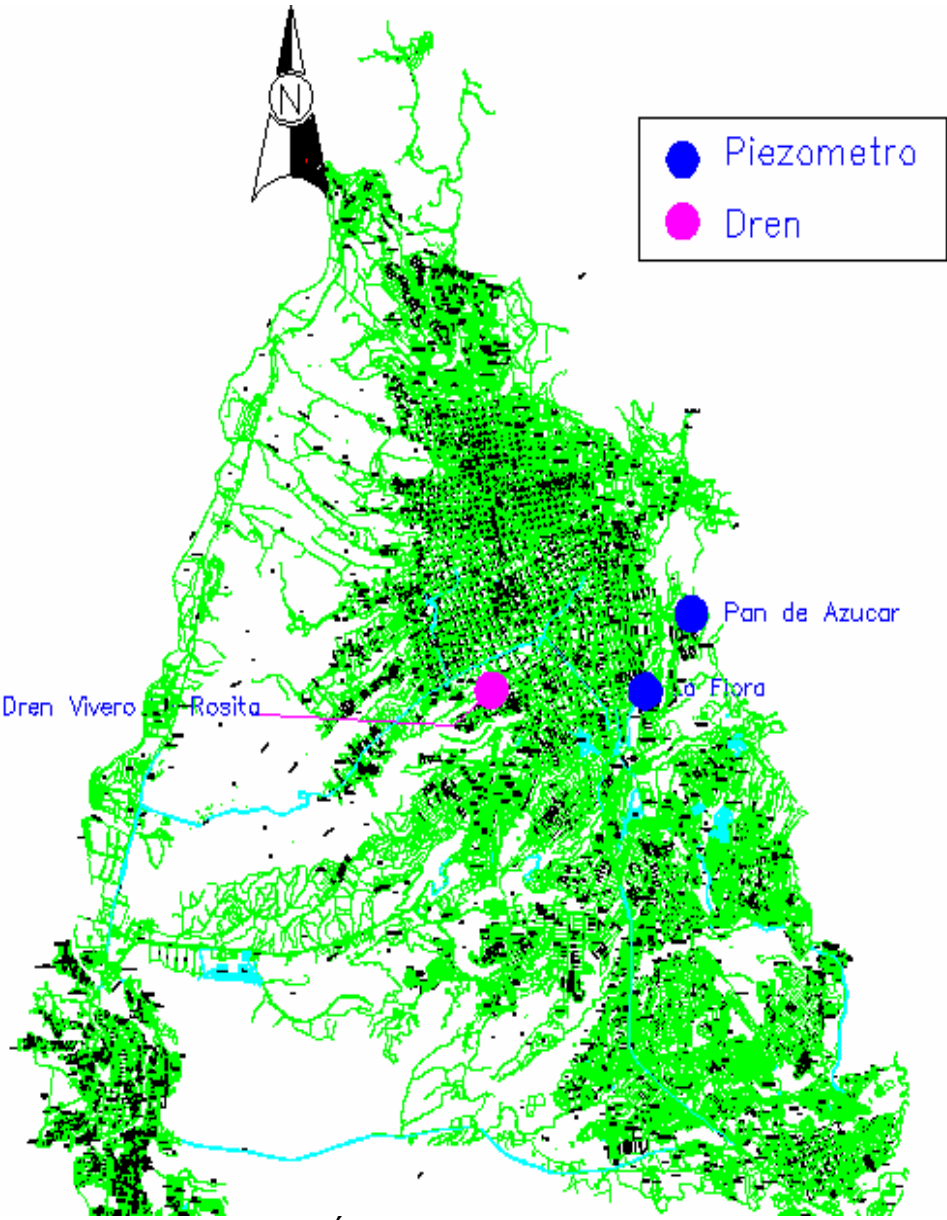
**3.3.2 Estaciones para muestreo de agua Subterránea** Estas estaciones se encuentran en su mayoría ubicadas en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga, las características y la información requerida para cada una de las diferentes estaciones seleccionadas se encuentran a continuación:

Tabla 4. Estaciones de aguas subterráneas.

MUESTREA DOR #	CODIGO LOCAL	TIPO	UBICACIÓN	DPTO	MUNICIPIO	COORDENADAS		ELEV msnm	INST	TIPO DE ACUIFERO
						NORTE	ESTE			
1	D. Rosita # 23	Drén	Vivero La Rosita	SANT	B/MANGA	1278261	1105251	893.9	CDMB	S
2	Piezómetro Pan de Azúcar S	Piezómetro	Barrio Bajos de Pan de Azúcar	SANT	B/MANGA	1279071	1107875	1042	CDMB	S
3	Piezómetro Pan de Azúcar I	Piezómetro	Barrio Bajos de Pan de Azúcar	SANT	B/MANGA	1279071	1107875	1042	CDMB	I
4	Piezómetro la Flora S	Piezómetro	Parque La Flora	SANT	B/MANGA	1278242	1107270	957,9	CDMB	S
5	Piezómetro La Flora I	Piezómetro	Parque La Flora	SANT	B/MANGA	1278178	1107270	957,9	CDMB	I

Donde I, indica el acuífero inferior y S, el acuífero superior.

Figura 9. Distribución espacial de las estaciones seleccionadas para agua subterránea.



Referenciados por los Ingenieros Ángel Anaya y Eduard Niño.

Foto 16. Estación No 3 Piezómetro Pan de Azúcar Inferior.



Foto 17. Estación No 5 Piezómetros La Flora Inferior.



Foto 18. Estación No 1 Dren La Rosita



### **3.4 MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA.**

Paralelamente a las campañas realizadas para la recolección de muestras para análisis del ión cloruro se realizó la segunda fase (6 meses), del muestreo de isótopos estables (Oxígeno 18 y Deuterio) en la precipitación en la Cuenca Superior del Río Lebrija, con el fin de completar el tiempo de muestreo correspondiente a un ciclo hidrológico (1 año), cuya primera fase fue realizada por Guzmán y Camacho (Octubre 2004-Marzo 2005).

El periodo de muestreo de esta segunda fase consta de 6 campañas de muestreo compuesto mensual a lo largo de la Cuenca Superior del Río Lebrija en las estaciones determinadas en la primera fase y abarca los meses de Abril a Septiembre.

El proceso de recolección de las muestras para análisis de isótopos estables se realizó de acuerdo al protocolo de muestreo establecido por Guzmán y

Camacho<sup>30</sup>, con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDBM).

Tabla 5. Estaciones de isótopos estables.

ESTACION	CODIGO IDEAM	TIPO	NOMBRE	SUB-CUENCA	DPTO	MUNICIPIO	COORD. GPS	ELEV.G PS	ELEV.m.s. n.m	INST
1	2319070	PG	PIEDRECUESTA GJA	LATO	SANT	PIEDRECUESTA			1000	IDEAM
2	2319083	PG	IDEAM	SURATA	SANT	B/MANGA			1025	IDEAM
3	2319513	SP	AEROPUERTO PALONEGRO	DE ORO	SANT	LEBRIJA			1189	IDEAM
4	CENICAFE	CP	SAN ANTONIO	FRIO	SANT	F/DABLANCA	070608N-730410W	1531,58	1480	CENICAFE
5	2319013	PM	TONA	TONA	SANT	TONA	071155N-725826W	1795,92	1910	IDEAM
6	2319040	PM	LA GALVICIA	TONA	SANT	F/DABLANCA	070732N-730336W	1847,98	1779	IDEAM
7	Est.AMB	PM	LA MARIANA	FRIO	SANT	F/DABLANCA	070732N-730037W	2481,18	2390	AMB
8	NO EST.		C.EXP.UIS CASA	TONA	SANT	TONA	071230N-725617W	2659,72	2640	UIS
9	NO EST.		C. EXP.UIS ESCUELA TEMBLADAL	TONA	SANT	TONA	071215N-725553W	2869,27	2800	UIS
10	3701502	CO	BERLIN	JORDAN	SANT	TONA	071122N-725218W	3306,66	3214	IDEAM
11	2319030	PM	PICACHO EL	TONA	SANT	TONA	070646N-725811W	3435,35	3310	IDEAM

Modificada de Guzmán y Camacho (2005).

<sup>30</sup> Guzmán, Diego y Camacho, Hernán, Op. cit., p.26.

## 4. DATOS OBTENIDOS Y RECOPIRADOS

En el siguiente capítulo se presentarán los datos obtenidos durante el periodo de muestreo (abril de 2005 a septiembre de 2005), para análisis del ión cloruro y parámetros fisicoquímicos del agua lluvia, así como los datos de tritio recopilados, existentes en el área de estudio; a partir de los cuales se estudiará el proceso de recarga, el tiempo de residencia y edad del agua.

### 4.1 CLORUROS

Para estimar la tasa de recarga en la C.S.R.L se requiere de los datos de concentración del ión cloruro, tanto en agua lluvia, como en agua subterránea, los cuales fueron obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto en diferentes campañas de muestreo, de acuerdo al protocolo establecido y en las estaciones mencionadas en el numeral 3.3.

Tabla 6. Fechas Muestreos Estaciones de agua lluvia en el año 2005.

<b>Mes</b> <b>Estación</b>	<b>ABRIL</b>	<b>MAYO</b>	<b>JUNIO</b>	<b>JULIO</b>	<b>AGOSTO</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>
La Granja Piedecuesta	04-May-05	09-Jun-05	11-Jul-05	07-Ago-05	08-Sep-05	01-Oct-05
Est. Aeropuerto P.	05-May-05	07-Jun-05	06-Jul-05	06-Ago-05	07-Sep-05	02-Oct-05
La Galvicia	03-May-05	08-Jun-05	08-Jul-05	08-Ago-05	06-Sep-05	04-Oct-05
La Mariana	03-May-05	08-Jun-05	08-Jul-05	08-Ago-05	06-Sep-05	04-Oct-05
C.EXP. UIS Casa	03-May-05	08-Jun-05	08-Jul-05	08-Ago-05	06-Sep-05	04-Oct-05
Berlín	03-May-05	08-Jun-05	08-Jul-05	08-Ago-05	06-Sep-05	04-Oct-05

Tabla 7. Fechas de Muestreos de Agua Subterránea en el año 2005.

ESTACION	TIPO	PRIMERO	SEGUNDO
P.Azúcar.Inf.	Piezómetro	27-Jun-05	15-Ago-05
P.Azúcar.Sup.	Piezómetro	27-Jun-05	
La Flora. Inf.	Piezómetro	27-Jun-05	15-Ago-05
La Flora. Sup.	Piezómetro	27-Jun-05	
Dren La Rosita	Dren	27-Jun-05	

**4.1.1 Datos obtenidos** Los datos que se muestran a continuación, fueron obtenidos a lo largo de este proyecto, las diferentes muestras obtenidas fueron analizadas por el laboratorio CEIAM (Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales), el análisis de las muestras se realizó por el método Potenciometrico con un límite de detección de 0.02 mg/lt. de cloruros.

Tabla 8. Resultados del mes de Abril.

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>La Galvicia</i>	Cloruros	mg/L	<0,02	1
<i>La Mariana</i>	Cloruros	mg/L	<0,02	2
<i>Granja Piedecuesta</i>	Cloruros	mg/L	0,72	3
<i>Berlin</i>	Cloruros	mg/L	0,23	4
<i>La Casita</i>	Cloruros	mg/L	0,38	5
<i>Aeropuerto</i>	Cloruros	mg/L	1,16	6

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

Tabla 9. Resultados del mes de Mayo.

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>La Galvicia</i>	Cloruros	mg/L	<0,02	1
<i>Berlin</i>	Cloruros	mg/L	0,26	2
<i>La Casita</i>	Cloruros	mg/L	<0,02	3
<i>Aeropuerto</i>	Cloruros	mg/L	<0,02	4
<i>La Mariana</i>	Cloruros	mg/L	0,97	5
<i>Granja Piedecuesta</i>	Cloruros	mg/L	1,23	6

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

Tabla 10. Resultados del mes de Junio.

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>La Galvicia</i>	Cloruros	mg/L	1,75	1
<i>La Mariana</i>	Cloruros	mg/L	0,28	2
<i>Granja Piedecuesta</i>	Cloruros	mg/L	0,31	3
<i>Berlin</i>	Cloruros	mg/L	8,82	4
<i>La Casita</i>	Cloruros	mg/L	5,03	5
<i>Aeropuerto</i>	Cloruros	mg/L	2,95	6

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

Tabla 11. Resultados del mes de Julio.

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>La Galvicia</i>	Cloruros	mg/L	0,52	1
<i>La Mariana</i>	Cloruros	mg/L	0,25	2
<i>Granja Piedecuesta</i>	Cloruros	mg/L	6,12	3
<i>Berlin</i>	Cloruros	mg/L	0,57	4
<i>La Casita</i>	Cloruros	mg/L	9,93	5
<i>Aeropuerto</i>	Cloruros	mg/L	0,02	6

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

Tabla 12. Resultados del mes de Agosto.

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>La Galvicia</i>	Cloruros	mg/L	1,13	1
<i>La Mariana</i>	Cloruros	mg/L	0,05	2
<i>Granja Piedecuesta</i>	Cloruros	mg/L	0,02	3
<i>Berlin</i>	Cloruros	mg/L	1,06	4
<i>La Casita</i>	Cloruros	mg/L	5,25	5
<i>Aeropuerto</i>	Cloruros	mg/L	0,02	6
<i>San Antonio</i>	Cloruros	mg/L	0,02	7

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

La ultima muestra correspondiente a la estación de San Antonio (Ver Figura 8 y tabla 5) es una muestra representativa de escorrentía superficial recolectada durante un evento de puntual de precipitación ocurrido el 06 de septiembre de 2005, con el fin de incluir dentro del balance de masa de cloruros el lavado de cloruros que puede producirse anterior a la infiltración.

Tabla 13. Resultados del mes de Septiembre.

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>La Galvicia</i>	Cloruros	mg/L	0,02	1
<i>La Mariana</i>	Cloruros	mg/L	0,02	2
<i>Granja Piedecuesta</i>	Cloruros	mg/L	0,02	3
<i>Berlin</i>	Cloruros	mg/L	0,02	4
<i>La Casita</i>	Cloruros	mg/L	2,91	5
<i>Aeropuerto</i>	Cloruros	mg/L	0,02	6

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

Tabla 14. Resultados del primer muestreo de agua subterránea (Junio 2005)

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>Pan de Azúcar Inferior</i>	Cloruros	mg/L	1,36	1
<i>Pan de Azúcar Superior</i>	Cloruros	mg/L	10,72	2
<i>La Flora Superior</i>	Cloruros	mg/L	23,75	3
<i>La Flora Inferior</i>	Cloruros	mg/L	20,47	4
<i>Dren La Rosita</i>	Cloruros	mg/L	23,89	5

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

Tabla 15. Resultados del segundo muestreo de agua subterránea (Agosto 2005).

ESTACION	PARAMETRO	UNIDADES	CONCENTRACION	# IDENTIFICACION
<i>Pan de Azúcar Inferior</i>	Cloruros	mg/L	5,75	1
<i>La Flora Inferior</i>	Cloruros	mg/L	25,46	2

*Limite de deteccion* 0,02 mg/l  
**Metodo Potenciometrico**

## 4.2 TRITIO

Para el estudio del tiempo de residencia y edad del agua en la Cuenca Superior del Río Lebrija, se utilizaron datos de concentración de tritio en aguas de lluvia y subterráneas, las cuales fueron recolectadas con anterioridad por el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático, GPH, en dos campañas; la primera campaña realizada en 2003, cuyos datos se encuentran recopilados en el estudio realizado por Gómez y Anaya<sup>31</sup>, y la segunda realizada en el mes de junio del 2004, en diferentes puntos ubicados en la parte baja de la C.S.R.L. En el primer estudio, se encuentran 11 datos obtenidos de pozos, un piezómetro, y datos representativos de agua de precipitación, (ver tabla 16), mientras que en la campaña realizada en 2004 se encuentran 6 datos obtenidos de 11 puntos, (ver tabla 17). Se revisaron, además, los datos para la región, disponibles en la base de datos de hidrológica isotópica de la IAEA (Internacional Atomic Energy Agency).

**4.2.1 Datos recopilados** Los datos que se muestran a continuación fueron recopilados de estudios anteriores, realizados por el grupo de investigación GPH, los cuales se realizaron en dos campañas, en los años 2003 y 2004, respectivamente.

---

<sup>31</sup> Gómez, Sully y Anaya, Ángel. Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. Revista Avances en Recursos Hídricos. Numero 11 (Septiembre, 2004); p. 37-50. ISSN 0121-5701.

Tabla 16. Puntos de Muestreo de Tritio (2003)

CÓDIGO LOCAL	LOCALIZACIÓN	ALTURA	COORDENADAS		ANALISIS		
			ESTE	NORTE	H3	Error de Laboratorio	CLASE
4. Aljibe la Cumbre	Lavadero La Cumbre	1000	1109558	1274832	2,7	0,6	Cisterna
5. Piezómetro La Flora Inferior	Parque La Flora	957,9	1107270	1278178	1,9	0,5	Piezómetro
7. Quebrada El Carmen	Transversal Oriental	930	1106934	1277488	2,1	0,5	Quebrada
8. Formación Diamante	Barrio La Esmeralda	974	1109279	1275887	0,3	0,5	Calizas Devoniano
9. Estación Oriental T	Estación Oriental T	898	1109328	1275468	0,1	0,5	Pozo de Bombeo
10. Jardín Las Colinas	Cementerio La Colina	1030	1108271	1278069	0	0,5	Pozo de Bombeo
11. Lavadero San Francisco	Bulevar Bolívar Cra 21 Esq.	961	1105190	1281450	2,4	0,5	Pozo de Bombeo
12. Terpel Chimita	Terpel Chimita	675	1100750	1277520	0,4	0,5	Pozo Artesiano
13. Ciudad Norte	Ciudad Norte	830	1105350	1282260	0,1	0,5	Pozo de Bombeo
14. La Cumbre	Estación la Cumbre	1008	1109324	1274653	2	0,5	Precipitación
15. Macizo de Santander	Km. 33 Vía Cúcuta	2520	1118493	1279608	3	0,6	Precipitación

EL laboratorio designado para el análisis de estas muestras fue el laboratorio del US Geological Survey (Estados Unidos).

Tabla 17. Puntos de Muestreo de Tritio (Junio de 2004)

CÓDIGO LOCAL	LOCALIZACIÓN	ALTURA	COORDENADAS		ANALISIS		
			ESTE	NORTE	H3	Error de Laboratorio	CLASE
1. Nacimiento (fisura) Qda la Malaña	Vereda La Malaña	1100	1109566	1279477	0,35	0,2	Manantial
2. Pozo Pretecor	Vía Piedecuesta Km10	1000	1100963	1269826	0,95	0,22	Pozo
3. Piezómetro Pan de Azúcar Inferior	Barrio Bajos de Pan de Azúcar	1042	1107875	1279071	1,4	0,19	Piezómetro
4. Aljibe la Cumbre	Lavadero La Cumbre	1000	1109558	1274832	1,54	0,21	Cisterna
5. Piezómetro La Flora Inferior	Parque La Flora	957,9	1107270	1278178	1,33	0,22	Piezómetro
6. Cascada Zapamanga	Km. 11+100	1580	1110284	1278577	2,21	0,24	Manantial

EL laboratorio designado para el análisis de estas muestras fue el laboratorio de CDTN-Belo Horizonte (Brasil).

La zona de estudio no cuenta con una serie de datos de tritio en agua lluvia, pero Colombia cuenta con datos de tritio en la precipitación para las ciudades de Bogota para los años comprendidos entre 1971 al 2002 y Barranquilla para los años de 1971 a 1989, estos datos se encuentran documentados por la IAEA (Internacional Atomic Energy Agency).

#### 4.3 PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE AGUA LLUVIA

**4.3.1 Datos recopilados** Los datos que se muestran a continuación, fueron datos recopilados de el proyecto realizado por Guzmán y Camacho, (2005)<sup>32</sup>.

Tabla 18. Parámetros físico-químicos mes de Octubre de 2004.

ESTACIÓN	ELEVA msnm	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E. CONDUC	Vol.L	Fecha Muestreo	Colector mm	Pluviome tro mm	% Error	Dias **	Fecha Instalacio
UIS Hidraulica	993	18,7	6,14	40	9,6	18,1	4,8	10-Nov-04	132,2	115	-14,97	28	14-Oct-04
La Granja Piedecuesta	1000	13,8	5,88	56	7,4	13,8	10,1	10-Nov-04	278,2	297	6,33	30	12-Oct-04
San Antonio	1531,53	14,1	5,7	61	8,1	15,2	9,5	09-Nov-04	261,7	261	-0,26	36	05-Oct-04
Tona*	1795,92	6,2	5,9	60	5,2	9,8	9,5	12-Nov-04	261,7	280	6,55	32	12-Oct-04
La Galvicia*	1847,98	18,8	6,14	41	8	15,1	8,5	09-Nov-04	234,1	243	3,65	29	13-Oct-04
La Mariana	2481,18	7,7	6,2	37	13,5	25,5	5,7	09-Nov-04	157,0	150,5	-4,32	20	21-Oct-04
La Casita	2659,72	5,1	6,18	41	13,2	24,8	12	11-Nov-04	330,5	No hay		55	18-Sep-04
Escuela Tembladal	2869,27	3,4	6,45	25	17,7	33,3	9	11-Nov-04	247,9	No hay		27	16-Oct-04
Berlin	3306,66	3,8	6,3	29	22	41	3,5	09-Nov-04	96,4	99,8	3,40	29	13-Oct-04
El Picacho*	3435,35	3,8	5,49	75	185	348	5,5	09-Nov-04	151,5	160	5,32	29	13-Oct-04

\* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

\*\* Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Valores Elevados

<sup>32</sup> Guzmán, Diego y Camacho, Hernán. Op cit., 63-65.

Tabla 19. Parámetros físico-químicos mes de Noviembre de 2004.

ESTACIÓN	ELEVA msnm	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E. CONDUC	Vol.L	Fecha Muestreo	Colector mm	Pluviome tro mm	% Error	Dias **	Muestreo Anterior
UIS Hidraulica	993	18,3	6,25	35	10,1	19	3	09-Dic-04	82,6	80,3	-2,91	30	10-Nov-04
La Granja Piedecuesta	1000	16,7	6,43	24	7,3	13,6	4,5	09-Dic-04	123,9	122,4	-1,27	30	10-Nov-04
San Antonio	1531,53	15,6	5,88	56	4,4	8,2	5,2	07-Dic-04	143,2	145	1,22	29	09-Nov-04
Tona*	1795,92	13,2	6,45	21	5,6	10,6	5	07-Dic-04	137,7	144	4,36	26	12-Nov-04
La Galvicia*	1847,98	17,6	5,49	80	7,1	13,4	6	07-Dic-04	165,3	177	6,63	29	09-Nov-04
La Mariana	2481,18	16,7	5,92	53	6	11,2	4,5	07-Dic-04	123,9	108,5	-14,24	29	09-Nov-04
La Casita	2659,72	9,2	5,9	52	6,2	11,5	3	07-Dic-04	82,6	No hay		27	11-Nov-04
Escuela Tembladal	2869,27	11,1	6,49	20,1	10,8	21,1	4	07-Dic-04	110,2	No hay		27	11-Nov-04
Berlin	3306,66	7,1	6,36	25	4,9	9,1	1,1	07-Dic-04	30,3	30,1	-0,66	29	09-Nov-04
El Picacho*	3435,35	15,5	5,95	48	9,4	17,7	4,3	07-Dic-04	118,4	114	-3,90	29	09-Nov-04

\* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

\*\* Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Tabla 20. Parámetros físico-químicos mes de Diciembre de 2004

ESTACION	ELEVA msnm	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E. CONDUC	Vol.L	Fecha Muestreo	Colector mm	Pluviom etro mm	% Error	Dias **	Muestreo Anterior
UIS Hidraulica	993	21,6	6,09	42	5	9,4	5,6	07-Ene-05	154,2	142,2	-8,47	30	09-Dic-04
La Granja Piedecuesta	1000	30,6	6,49	22	5,3	9,9	2,5	06-Ene-05	68,9	76,1	9,51	29	09-Dic-04
Est. Aeropuerto P.	1189	20	6,06	48	4,1	7,7	3,2	06-Ene-05	88,1	95,2	7,41	37	01-Dic-04
San Antonio	1531,53	17,4	5,37	91	4,7	8,9	2,1	05-Ene-05	57,8	56,5	-2,38	30	07-Dic-04
Tona*	1795,92	13,6	5,96	56	59	112	6,8	05-Ene-05	187,3	208	9,95	30	07-Dic-04
La Galvicia*	1847,98	12,9	6,05	49	7,8	14,6	3,2	05-Ene-05	88,1	97	9,13	30	07-Dic-04
La Mariana	2481,18	10,2	6,11	37	6,4	11,9	2,3	05-Ene-05	63,4	62,3	-1,69	30	07-Dic-04
La Casita	2659,72	19,7	6,23	40	3,7	6,9	2,5	05-Ene-05	68,9	No hay		30	07-Dic-04
Escuela Tembladal	2869,27	13,7	6,66	14	5,2	9,7	2,4	05-Ene-05	66,1	No hay		30	07-Dic-04
Berlin	3306,66	8,9	6,52	22	13,6	25,6	0,4	05-Ene-05	11,0	11,9	7,41	30	07-Dic-04
El Picacho*	3435,35	5,4	6,6	16	36	67,7	0,9	05-Ene-05	24,8	24	-3,29	30	07-Dic-04

\* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

\*\* Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Tabla 21. Parámetros físico-químicos mes de Enero de 2005.

ESTACION	ELEVA msnm	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E. CONDUC	Vol.L	Fecha Muestreo	Colector mm	Pluviómetro mm	% Error	Días **	Muestreo Anterior
UIS Hidraulica	993,4	18,8	5,9	52	6,4	12	6,8	10-Feb-05	187,3	182,6	-2,57	35	07-Ene-05
La Granja Piedecuesta	1000	21,6	5,97	62	10,1	19,1	5,7	08-Feb-05	157,0	153,3	-2,42	34	06-Ene-05
IDEAM	1025	20,8	5,45	80	12,1	22,9		01-Feb-05		68,7		32	01-Ene-05
Est. Aeropuerto P.	1189	17,2	5,76	73	7	12,8	4,6	08-Feb-05	126,7	128,8	1,63	34	06-Ene-05
San Antonio	1531,53	17,3	5,5	76	4,7	8,9	4	11-Feb-05	110,2	112,5	2,06	38	05-Ene-05
Tona*	1795,92	15,1	5,26	97	5,8	11	5,1	09-Feb-05	140,5	145	3,12	36	05-Ene-05
La Galvicia*	1847,98	15,7	5,19	93	6,4	12	6,4	11-Feb-05	176,3	176	-0,16	38	05-Ene-05
La Mariana	2481,18	13,4	5,69	65	7,8	14,5	4,3	11-Feb-05	118,4	93,1	-27,22	38	05-Ene-05
La Casita	2659,72	10,3	5,83	62	3,6	6,8	4,1	09-Feb-05	112,9	No hay		36	05-Ene-05
Escuela Tembladal	2869,27	9,7	5,69	71	4	7,6	4,4	09-Feb-05	121,2	No hay		36	05-Ene-05
Berlin	3306,66	12,3	5,21	91	7,7	14,5	1,1	11-Feb-05	30,3	29,9	-1,33	38	05-Ene-05
El Picacho*	3435,35	7,5	5,41	80	6,8	12,8	3,8	11-Feb-05	104,7	104	-0,64	38	05-Ene-05

\* Estaciones en donde la lectura del pluviómetro se hace con reglilla.

\*\* Numero de días de recolección de agua lluvia.

Tabla 22. Parámetros físico-químicos mes de Febrero de 2005.

ESTACION	ELEVA msnm	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E. CONDUC	Vol.L	Fecha Muestreo	Colector mm	Pluviómetro mm	% Error	Días **	Muestreo Anterior
UIS Hidraulica	993,4	24,2	5,18	108	6,5	12,2	7,8	09-Mar-05	214,8	No Hay Datos		28	10-Feb-05
La Granja Piedecuesta	1000	22,9	5,17	109	6,4	12,1	11,9	09-Mar-05	327,8	325,6	-0,67	30	08-Feb-05
IDEAM	1025	13,6	5,11	112	17,2	9,3		28-Feb-05		312,6		28	01-Feb-05
Est. Aeropuerto P.	1189	15	5,29	101	4,3	8,1	10,4	09-Mar-05	286,5	280,6	-2,09	30	08-Feb-05
San Antonio	1531,53	15,4	6,93	6	540	287	6,6	08-Mar-05	181,8	195,5	7,01	26	11-Feb-05
Tona*	1795,92	18	5,28	103	10,9	5,8	2	08-Mar-05	55,1	51	-8,02	28	09-Feb-05
La Galvicia*	1847,98	16,6	5,05	116	13	6,9	5,9	08-Mar-05	162,5	163	0,30	26	11-Feb-05
La Mariana	2481,18	13,3	5,21	105	11,3	6	3	08-Mar-05	82,6	70	-18,05	26	11-Feb-05
La Casita	2659,72	17,3	5,26	105	6,8	3,6	2,9	08-Mar-05	79,9	No Hay		28	09-Feb-05
Escuela Tembladal	2869,27	en el colector						10-Mar-05	NO HAY MUESTRA ESTE MES				08-Mar-05
Berlin	3306,66	16	5,45	92	15,4	8,1	0,7	08-Mar-05	19,3	20,3	5,02	26	11-Feb-05
El Picacho*	3435,35	9	5,66	78	13,6	7,3	1	08-Mar-05	27,5	24	-14,77	26	11-Feb-05

\* Estaciones en donde la lectura del pluviómetro se hace con reglilla.

\*\* Numero de días de recolección de agua lluvia.

Valores Elevados

Tabla 23. Parámetros físico-químicos mes de Marzo de 2005.

ESTACION	ELEVA msnm	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E. CONDUC	Vol.L	Fecha Muestreo	Colector mm	Pluio metro mm	% Error	Dias **	Muestreo Anterior
UIS Hidraulica	993	22,8	6,33	36	9,7	18,2	0,7	06-Abr-05	19,3	No hay Datos		29	09-Mar-05
La Granja Piedecuesta	1000	22,9	5,85	64	13,6	25,5	0,8	06-Abr-05	22,0	17,7	-24,49	29	09-Mar-05
IDEAM	1025	20,5	5,41	96	7,2	13,6		01-Abr-05		24		31	01-Mar-05
Est. Aeropuerto P.	1189	20,1	4,83	127	7,4	13,8	2,3	07-Abr-05	63,4	67,6	6,28	30	09-Mar-05
San Antonio	1531,53	18,6	5,05	109	19,1	35,9	1,1	08.Abr-05	30,3	30	-1,00	32	08-Mar-05
Tona*	1795,92	14,5	5,46	84	13	24,3	0,7	08.Abr-05	19,3	18	-7,12	32	08-Mar-05
La Galvicia*	1847,98	18,3	5,59	78	16,6	31,1	0,8	08.Abr-05	22,0	22	-0,16	32	08-Mar-05
La Mariana	2481,18	15,6	5,7	71	15	27,8	0,4	08.Abr-05	11,0	6,9	-59,68	32	08-Mar-05
La Casita	2659,72	No se recolecto agua						08.Abr-05		No hay		32	08-Mar-05
Escuela Tembladal	2869,27	15,4	6,55	21	23,2	43,6	0,4	08.Abr-05	11,0	No hay		30	10-Mar-05
Berlin	3306,66	12,5	5,3	93	42,5	80	1,4	08.Abr-05	38,6	39	1,12	32	08-Mar-05
El Picacho*	3435,35	11,6	5,97	53	56	106	0,1	08.Abr-05	2,8	2	-37,72	32	08-Mar-05

\* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

\*\* Numero de dias de recolección de agua lluvia.

#### 4.3.2 Datos obtenidos

Durante las campañas de muestreo realizadas dentro del marco de este estudio durante el periodo de Abril-Septiembre de 2005 se realizó un seguimiento de los parámetros de campo en cada una de las estaciones establecidas previamente, así junto con los datos recopilados se obtiene el conjunto de datos correspondientes a un año (octubre 2004-septiembre 2005), y de esta forma poder observar el comportamiento del agua lluvia en el tiempo correspondiente a un ciclo hidrológico.

Tabla 24. Parámetros físico-químicos mes de Abril de 2005.

ESTACION	ELEVA	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Fecha	mm	Pmm	%Error	Dias	M.ANTE
La Granja Piedecuesta	1000	21,2	5,67	82	6,5	12,2	4	04-May-05	110,18	110,30	0,11	28	06-Abr-05
					0,0%								
IDEAM	1025	21,2	5,95	67	9	17		02-May-05	0,00	67,40	No Tiene Valor	31	01-Abr-05
					0,0%								
Estación Aeropuerto P.	1189	13,6	5,28	107	3	5,6	5	05-May-05	137,72	152,90	9,93	27	07-Abr-05
					0,0%								
San Antonio	1480	14	5,06	118	4,5	8,5	5,8	03-May-05	159,76	162,00	1,38	25	08-Abr-05
					0,0%								
La Galvicia	1779	12,8	5,59	87	3,1	5,8	6,5	03-May-05	179,04	207,00	13,51	25	08-Abr-05
					0,0%								
Tona	1910	14,6	5,32	103	2,4	4,6	5,5	03-May-05	151,49	157,00	3,51	25	08-Abr-05
					0,0%								
La Mariana	2390	11,5	5,68	81	2,2	4,2	3,8	03-May-05	104,67	105,60	0,88	25	08-Abr-05
					0,0%								
C.EXP. UIS Casa	2640	22	5,77	76	5,9	11,1	3,4	03-May-05	93,65	No Tiene Valor		25	08-Abr-05
					0,0%								
C.Exp.UIS Tembladal	2800	21,9	5,57	88	7	13,2	4	03-May-05	110,18	No Tiene Valor		25	08-Abr-05
					0%								
Berlín	3214	11,6	5,14	114	3,6	6,6	2,6	03-May-05	71,62	79,30	9,69	25	08-Abr-05
					0,0%								
El Picacho	3310	7,7	5,55	91	3,1	5,8	6	03-May-05	165,27	161,30	-2,46	25	08-Abr-05
					0,0%								

Tabla 25. Parámetros físico-químicos mes de Mayo de 2005.

ESTACION	ELEVA	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Fecha	mm	Pmm	%Error	Dias	M.ANTE
La Granja Piedecuesta	1000	19,7	5,81	62	8,7	16,4	8,9	09-Jun-05	245,15	261,30	6,18	36	04-May-05
					0,0%								
IDEAM	1025	22,3	6,04	61	16,1	30,3		09-Jun-05	0,00	131,30	No Tiene Valor	38	02-May-05
					0,0%								
Estación. Aeropuerto P.	1189	20,1	5,56	81	5,00	9,3	4,4	07-Jun-05	121,20	108,00	-12,22	33	05-May-05
					0,0%								
San Antonio	1480	16,7	4,96	106	8,3	15	5,6	08-Jun-05	154,25	143,00	-7,87	36	03-May-05
					0,0%								
La Galvicia	1779	17,8	5,39	81	4	7,5	8,4	08-Jun-05	231,37	241,00	3,99	36	03-May-05
					0,0%								
Tona	1910	16,4	5,28	86	3,2	6,1	10,8	08-Jun-05	297,48	315,00	5,56	36	03-May-05
					0,0%								
La Mariana	2390	11,7	5,45	75	3,5	6,4	9,1	08-Jun-05	250,65	No Tiene Valor		36	03-May-05
					0,0%								
C.EXP. UIS Casa	2640	17,1	5,28	87	2,9	5,5	6,2	08-Jun-05	170,78	No Tiene Valor		36	03-May-05
					0,0%								
C.Exp.UIS Tembladal	2800	12,7	5,21	91	2,9	5,4	6,4	08-Jun-05	170,78	No Tiene Valor		36	03-May-05
					0,0%								
Berlín	3214	12	5,29	84	3,1	5,8	5,7	08-Jun-05	157,00	139,70	-12,39	36	03-May-05
					0,0%								
El Picacho	3310	8	5,61	65	17,5	32,8	8,5	08-Jun-05	234,13	279,00	16,08	36	03-May-05
					0,0%								

Tabla 26. Parámetros físico-químicos mes de Junio de 2005.

ESTACION	ELEVA	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Fecha	mm	Pmm	%Error	Dias	MANTE
La Granja Piedecuesta	1000	26,1	5,78	87	6,8 0,0%	12,9	4,9	11-Jul-05	134,97	138,90	2,83	32	09-Jun-05
IDEAM	1025	21,4	5,9	81	24,9 0,0%	47		07-Jul-05		24,40	No Tiene Valor	28	09-Jun-05
Est. Aeropuerto P.	1189	22	5,55	84	8 0,0%	15,2	1,3	06-Jul-05	35,81	35,40	-1,15	29	07-Jun-05
San Antonio	1480	16,2	5,66	74	5,9 0,0%	11,1	3,4	08-Jul-05	93,65	91,00	-2,91	30	08-Jun-05
La Galvicia	1779	21,1	5,86	64	11,2 0,0%	21	3,7	08-Jul-05	101,91	106,00	3,85	30	08-Jun-05
Tona	1910	20,8	5,44	88	4,7 0,0%	8,8	3,4	08-Jul-05	93,65	85,00	-10,18	30	08-Jun-05
La Mariana	2390	12,3	5,38	88	5,4 0,0%	10	6,5	08-Jul-05	179,04	191,40	6,46	30	08-Jun-05
C.EXP. UIS Casa	2640	20,4	6,47	29	16,6 0,0%	31,1	1	08-Jul-05	27,54	No Tiene Valor		30	08-Jun-05
C.Exp.UIS Tembladal	2800	18,8	5,82	66	6 0%	11,2	1,1	08-Jul-05	30,30	No Tiene Valor		30	08-Jun-05
Berlin	3214	13,5	5,46	86	9,1 0,0%	17	2	08-Jul-05	55,09	54,80	-0,53	30	08-Jun-05
El Picacho	3310	10,5	5,89	60	25,1 0,0%	47,2	5,5	08-Jul-05	151,49	135,00	-12,22	30	08-Jun-05

Tabla 27. Parámetros físico-químicos mes de Julio de 2005.

ESTACION	ELEVA	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Fecha	mm	Pmm	%Error	Dias	MANTE
La Granja Piedecuesta	1000	23,4	5,83	70	26,5 0,0%	50,3	1,7	07-Ago-05	46,83	48,20	2,85	26	11-Jul-05
IDEAM	1025	21,3	6,11	46	37,1 0,0%	19,6		08-Ago-05		67,00	No Tiene Valor	29	07-Jul-05
Estación Aeropuerto P.	1189	23,3	5,78	73	29,7 0,0%	56,1	3,5	06-Ago-05	96,41	107,20	10,07	30	06-Jul-05
San Antonio	1480	25,2	5,38	98	7,5 0,0%	14,2	4,2	08-Ago-05	115,69	102,00	-13,42	30	08-Jul-05
La Galvicia	1779	21,1	5,86	81	9,8 0,0%	18,4	6,5	08-Ago-05	179,04	195,00	8,19	30	08-Jul-05
Tona	1910	25,8	5,4	96	21,3 0,0%	40,1	1,5	08-Ago-05	41,32	38,80	-6,49	30	08-Jul-05
La Mariana	2390	13,8	5,42	92	6,5 0,0%	12,1	4,3	08-Ago-05	118,44	124,20	4,64	30	08-Jul-05
C.EXP. UIS Casa	2640	25	4,69	140	40,3 0,0%	75,9	0,5	08-Ago-05	13,77	No Tiene Valor		30	08-Jul-05
C.Exp.UIS Tembladal	2800	23,4	5,93	65	12,2 0%	22,9	1	08-Ago-05	27,54	No Tiene Valor		30	08-Jul-05
Berlin	3214	14,9	5,25	102	6,6 0,0%	12,5	1,3	08-Ago-05	35,81	31,60	-13,32	30	08-Jul-05
El Picacho	3310	10,6	5,91	62	14,8 0,0%	27,9	3,3	08-Ago-05	90,90	94,00	3,30	30	08-Jul-05

Tabla 28. Parámetros físico-químicos mes de Agosto de 2005.

ESTACION	ELEVA	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Fecha	mm	Pmm	%Error	Días	M.ANTE
La Granja Piedecuesta	1000	19,2	5,64	83	8,1 0,0%	15,1	4,5	08-Sep-05	123,95	124,10	0,12	31	07-Ago-05
IDEAM	1025	21,3	5,95	72	26,2 0,0%	49,3		07-Sep-05	0,00	42,10	No Tiene	31	08-Ago-05
Est. Aeropuerto P.	1189	22,4	5,03	111	13,6 0	7,6	1,1	07-Sep-05	30,30	30,90	1,95	31	06-Ago-05
San Antonio	1480	22,4	5,39	89	4,1 0,0%	7,7	4,3	06-Sep-05	118,44	109,30	-8,36	29	08-Ago-05
La Galvicia	1779	15,4	5,03	108	6,1 0,0%	11,4	6	06-Sep-05	165,27	180,00	8,19	29	08-Jul-05
Tona	1910	21,6	5,55	80	8 0,0%	15	1,9	06-Sep-05	52,33	54,00	3,08	29	08-Ago-05
La Mariana	2390	11	5,35	89	16,1 0,0%	30,3	4,5	06-Sep-05	123,95	123,70	-0,20	29	08-Ago-05
C.EXP. UIS Casa	2640	23,3	5,22	99	21,5 0,0%	40,5	2	06-Sep-05	55,09	No Tiene Valor		29	08-Ago-05
C.Exp.UIS Tembladal	2800	22,4	5,45	86	7,7 0%	14,5	2,5	06-Sep-05	68,86	No Tiene Valor		29	08-Ago-05
Berlin	3214	10,7	5,1	102	4,9 0,0%	9,2	1,4	06-Sep-05	38,56	34,50	-11,77	29	08-Ago-05
El Picacho	3310	5	5,51	78	16,7 0,0%	31,3	4	06-Sep-05	110,18	116,00	5,02	29	08-Ago-05

Tabla 29. Parámetros físico-químicos mes de Septiembre de 2005.

ESTACION	ELEVA	TEMP °C	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Fecha	mm	Pmm	%Error	Días	M.ANTE
La Granja Piedecuesta	1000	20,1	5,08	88	7 0,0%	13,2	2,9	01-Oct-05	79,88	76,90	-3,87	23	08-Sep-05
IDEAM	1025	19,6	5,57	65	21,3 0,0%	40,2		03-Oct-05	0,00	225,30	No Tiene	26	07-Sep-05
Est. Aeropuerto P.	1189	20,9	5,6	62	7,7 0%	14,4	5,4	02-Oct-05	148,74	154,90	3,98	25	07-Sep-05
San Antonio	1480	17,9	5,05	91	3,1 0,0%	5,8	6	04-Oct-05	165,27	154,50	-6,97	28	06-Sep-05
La Galvicia	1779	19,2	4,77	104	5,7 0,0%	10,8	8	04-Oct-05	220,36	230,00	4,19	28	06-Sep-05
Tona	1910	19,5	4,85	101	6,3 0,0%	11,9	4	04-Oct-05	110,18	105,00	-4,93	28	06-Sep-05
La Mariana	2390	19,4	4,9	101	6,3 0,0%	11,9	4,8	04-Oct-05	132,21	111,20	-18,90	28	06-Sep-05
C.EXP. UIS Casa	2640	16,3	4,58	113	11,7 0,0%	21,9	4	04-Oct-05	110,18	No Tiene Valor		28	06-Sep-05
C.Exp.UIS Tembladal	2800	19,5	4,97	94	5,4 0%	10,2	3,5	04-Oct-05	96,41	No Tiene Valor		28	06-Sep-05
Berlin	3214	18,6	5	92	5,3 0,0%	13,2	3,3	04-Oct-05	90,90	84,90	-7,06	28	06-Sep-05
El Picacho	3310	No Tiene Valor						04-Oct-05	No Tiene Valor			28	06-Sep-05

## **5. ANALISIS DE RESULTADOS**

A continuación se presentará el análisis realizado a los diferentes datos recopilados y obtenidos en el capítulo anterior, buscando de esta manera valores estimativos de la recarga, estudiar el comportamiento físico-químico de las aguas lluvias, así como la edad del agua y el tiempo de residencia del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca Superior del Río Lebrija.

### **5.1 CLORUROS**

Durante el desarrollo de este proyecto se realizó el muestreo para caracterizar el ión cloruro en agua lluvia y agua subterránea durante una primera etapa que consta de seis meses (Abril 2005-Sep.2005); a partir de los resultados obtenidos en el laboratorio del CEIAM (Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales), los cuales se pueden observar en el capítulo 4 del presente estudio, se realizarán las primeras observaciones e hipótesis del comportamiento del ión en Cuenca Superior del río Lebrija y la aplicación del balance de masa de cloruros con el fin de estimar las tasas de recarga en la zona.

Es importante tener en cuenta que una aproximación más precisa de las tasas de recarga obtenidas al implementar este método, podrá obtenerse al culminar una segunda etapa de muestreo, la cual complementará la información obtenida en este estudio.

Para realizar una primera estimación de la recarga en la C.S.R.L por medio del balance de masa de cloruros en la zona saturada es necesario definir

ciertos parámetros iniciales y característicos de la cuenca; de esta forma se cuenta con el valor de la precipitación promedio multianual (P) definida por Arenas y Ruiz (2005)<sup>36</sup>, con un valor de 1206.63 mm/año; así mismo el valor de escorrentía superficial (Es) ha sido estudiado en la zona por diferentes métodos recopilados en Rueda y Sarmiento (2003)<sup>37</sup>.

Tabla 30. Escorrentía Superficial en la C.S.R.L.

BALANCE A LARGO PLAZO	CAUDAL Q (mm/año)	CAUDAL BASE Qw (mm/año)	ESCORRENTIA SUPERFICIAL Qe (mm/año)
Método Manual	391	266	125
Intervalo Fijo		305	86
Desplazamiento de intervalo		325	66
Mínimos Locales		301	90

Para definir la concentración promedio de cloruros en la precipitación (C<sub>P</sub>), en la C.S.R.L se tienen los valores promedio para las seis estaciones de precipitación muestreadas en esta etapa.

Tabla 31. Concentración de cloruros en agua lluvia en la C.S.R.L.

Mes	Estación					
	La Mariana	La Galvicia	Berlín	C. Exp. Casa	Granja Piedecuesta	Aeropuerto
Abril	0,02	0,02	0,23	0,38	0,72	1,16
Mayo	0,97	0,02	0,26	0,02	1,23	0,02
Junio	0,28	<b>1,75</b>	<b>8,82</b>	5,03	0,31	<b>2,95</b>
Julio	0,25	0,52	0,57	<b>9,93</b>	<b>6,12</b>	0,02
Agosto	1,13	0,05	1,06	5,25	0,02	0,02
Septiembre	0,02	0,02	0,02	2,91	0,02	0,02

Los valores en Rojo, son los datos considerados anormalmente altos.

<sup>36</sup> Arenas, Juan P. y Ruiz, Juan S. En tesis de grado: Estudio de la variación del régimen de lluvias en la Cuenca Superior del río Lebrija (C.S.R.L).Bucaramanga, 2005. p 95.

<sup>37</sup> Rueda Sánchez, Irene y Sarmiento A, Mauricio. En tesis de grado: Revisión de métodos para la estimación de la recarga en acuíferos mediante balances de agua. Bucaramanga, 2003. p 94-136.

Se puede observar que se encuentran valores anormalmente altos de concentración de cloruros en las estaciones muestreadas, en especial durante los meses de Junio y Julio; si se descarta la posibilidad de que estos valores se hayan presentado por posibles errores en el laboratorio o en el procedimiento de muestreo, este fenómeno puede ser atribuido a diferentes factores; en primer lugar debe considerarse una posible contaminación local del agua en estos puntos, causada por agentes externos como fertilizantes e insecticidas transportados por el viento y posiblemente utilizados en actividades agrícolas en las zonas cercanas a los muestreadotes, en este caso estos valores no serían representativos del comportamiento normal del ión en el agua lluvia y por lo tanto no deberían tenerse en cuenta en los cálculos; sin embargo, en diferentes estudios donde se ha observado el comportamiento del ión en la precipitación se ha encontrado que en épocas secas, donde los eventos de precipitación están más distanciados en el tiempo, puede producirse una sobrecarga del ión en el agua lluvia debido a una posible acumulación del ión en la atmósfera antes de precipitarse a la superficie. Para confirmar esta hipótesis es necesario observar el comportamiento del ión en la lluvia durante la siguiente etapa de muestreo, durante la cual se espera otra época seca al final del año. Por esta razón se considerarán esta dos hipótesis en los cálculos; para la primera se tomarán todos los valores obtenidos en las diferentes campañas de muestreo, mientras que para los cálculos realizados a partir de la segunda hipótesis no se tendrán en cuenta los valores señalados.

Para realizar el balance de masa de cloruros en la C.S.R.L es necesario definir la concentración presente en el agua de recarga ( $C_R$ ); para este propósito se realizaron dos campañas de muestreo, de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 4.

En la primera campaña, se tomaron cinco puntos correspondientes a las estaciones No1 (Dren la Rosita) ubicado en la escarpa occidental de la meseta de Bucaramanga, No2 (Piezómetro de Pan de Azúcar Superior) No3 (Piezómetro de

Pan de Azúcar Inferior), No 4 (La Flora Superior) y No5 (La Flora Inferior), se pudo observar el comportamiento del ión en el agua subterránea en la parte baja de la C.S.R.L.

Tabla 32. Concentración de cloruros en aguas subterráneas (Junio 2005).

ESTACION	CLRUROS(mg/l)
<b>1. Dren La Rosita</b>	23,89
<b>2. Pan de Azúcar Superior</b>	10,72
<b>3. Pan de Azúcar Inferior</b>	1,36
<b>4. La Flora Superior</b>	23,75
<b>5. La Flora Inferior</b>	20,47

Se puede observar que en los piezómetros del acuífero superior se presentan mayores concentraciones que en los del acuífero inferior, esto se produce debido a que el agua presente en el acuífero superior puede ser mas susceptible a la contaminación antrópica propia de la meseta, como: la presencia de aguas de tipo residual provenientes de pozos sépticos, fugas del alcantarillado, las cuales se caracterizan por su alto contenido de cloruros; esta observación se puede evidenciar al observar que estos valores se asemejan al valor correspondiente al dren vivero la Rosita, en donde se esperan valores altos pues allí el agua ya ha recorrido toda el área correspondiente a la meseta y se ha mezclado con aguas contaminadas; sin embargo el valor encontrado en el piezómetro correspondiente al acuífero inferior de la Flora presenta un contenido alto de cloruros, que se puede producir por una posible mezcla con aguas del acuífero superior, además, debe tenerse en cuenta que en la Flora no se encuentran bien diferenciados los acuíferos inferior y superior . Por otra parte el valor obtenido en el piezómetro inferior de Pan de Azúcar presenta un valor menor, correspondiente a un acuífero mas profundo con menor afectación de la contaminación local del área de la meseta y por lo tanto mas representativo de la concentración natural de cloruros

en el agua subterránea de la zona; por esta razón, se realizó una segunda campaña de muestreo, que incluía únicamente el punto correspondiente a los piezómetros del acuífero inferior de Pan de Azúcar y la Flora (Estaciones No 3 y 5, respectivamente).

Tabla 33. Concentración de cloruros en aguas subterráneas (Agosto 2005).

ESTACION	CLORUROS (mg/l)
<i>3. Pan de Azúcar Inferior</i>	5,75
<i>5. La Flora Inferior</i>	25,46

En este muestreo se mantiene la tendencia de los valores encontrados inicialmente, con un contenido alto de cloruros en la estación No 5 (Piezómetro la Flora Inferior), posiblemente contaminado y un valor mas bajo en la estación No3 (Piezómetro de Pan de Azúcar Inferior), donde los acuíferos se encuentran bien diferenciados

Para efectos de los cálculos, se define un valor inicial de concentración de cloruros en agua de recarga ( $C_R$ ) en la zona de estudio de 3.555 mg/l que corresponde al promedio de los valores encontrados en la estación No 3 Piezómetro de Pan de Azúcar correspondiente al acuífero inferior.

Adicionalmente se recolectó una muestra puntual representativa del contenido de cloruros en la escorrentía superficial ( $C_{ES}$ ), durante un evento de precipitación ocurrido en la estación San Antonio (Ver figura 8 y tabla 5), la cual se encuentra a una altura de 1531.58 m.s.n.m. el día 06 de septiembre de 2005, esto con el fin de introducir en los cálculos la hipótesis de un posible lavado de cloruros producido durante los eventos de precipitación antes que se produzca la infiltración del agua. El valor encontrado fue de 0.02 mg/l.

Foto 19. Estación San Antonio (1531.58 msnm). IDEAM.



Con estos valores definidos se pueden realizar las primeras hipótesis de las tasas de recarga presentes en la zona y obtenidas a partir del balance de masa de cloruros en la C.S.R.L.

## **5.2 ESTIMACION DE LA RECARGA MEDIANTE LA IMPLEMENTACION DEL BALANCE DE MASA DE CLORUROS EN LA C.S.R.L.**

Para realizar las primeras estimaciones de las tasas de recarga promedio anuales que se presentan en la zona de estudio se establecen dos hipótesis generales; la primera al considerar todos los valores de concentración de cloruros obtenidos para el agua lluvia y la segunda al descartar los valores anormales señalados anteriormente. Cada una de estas hipótesis se realizará en primer lugar sin incluir el factor correspondiente al flujo de cloruros en la escorrentía superficial ( $E_S \cdot C_{ES}$ ), para observar la variación que presentan los resultados debido a este parámetro.

**5.2.1 Primera hipótesis** Considerando todo los valores de concentración de cloruros obtenidos para el agua lluvia, se presenta a continuación los valores de recarga promedio anual obtenidos para la primera hipótesis, sin considerar los términos correspondientes a la escorrentía superficial y también considerando los diferentes valores de escorrentía superficial mencionados anteriormente.

Tabla 34. Estimación de la recarga promedio anual en la C.S.R.L (Hipótesis 1).

HIPOTESIS 1	SIN CONSIDERAR ESCORRENTIA	CONSIDERANDO ESCORENTIA			
		125	90	86	66
<b>C<sub>P</sub> (mg/l)</b>	1,448	1,448	1,448	1,448	1,448
<b>P (mm/año)</b>	1206,63	1206,63	1206,63	1206,63	1206,63
<b>C<sub>R</sub> (mg/l)</b>	3,555	3,555	3,555	3,555	3,555
<b>C<sub>ES</sub> (mg/l)</b>	-	0,02	0,02	0,02	0,02
<b>E<sub>S</sub> (mm/año)</b>	-	125	90	86	66
<b>Recarga (mm/año)</b>	<b>491,59</b>	<b>490,89</b>	<b>491,08</b>	<b>491,11</b>	<b>491,22</b>
<b>% de Precipitación</b>	<b>40,74</b>	<b>40,68</b>	<b>40,70</b>	<b>40,70</b>	<b>40,71</b>

Se observa que para esta hipótesis el valor de recarga en la C.S.R.L se encuentra en un rango de 490.89 mm/año a 491.59 mm/año, o de 40.68% a 40.74% de la precipitación promedio multianual de la cuenca.

**5.2.2 Segunda hipótesis** Descartando los valores anormales, se presenta a continuación los valores de recarga obtenidos para la segunda hipótesis, sin considerar los términos correspondientes a la escorrentía superficial y además, considerando la escorrentía superficial.

Tabla 35. Estimación de la recarga promedio anual en la C.S.R.L (Hipótesis 2).

HIPOTESIS 2	SIN CONSIDERAR ESCORRENTIA	CONSIDERANDO ESCORRENTIA			
		125	90	86	66
<b>C<sub>P</sub> (mg/l)</b>	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738
<b>P (mm/año)</b>	1206,63	1206,63	1206,63	1206,63	1206,63
<b>C<sub>R</sub> (mg/l)</b>	3,555	3,555	3,555	3,555	3,555
<b>C<sub>ES</sub> (mg/l)</b>	-	0,02	0,02	0,02	0,02
<b>E<sub>S</sub> (mm/año)</b>	-	125	90	86	66
<b>Recarga (mm/año)</b>	<b>250,32</b>	<b>249,62</b>	<b>249,81</b>	<b>249,84</b>	<b>249,95</b>
<b>% de Precipitación</b>	<b>20,75</b>	<b>20,69</b>	<b>20,70</b>	<b>20,71</b>	<b>20,71</b>

Los valores obtenidos para la recarga en esta hipótesis se encuentran en un rango de 250.32 mm/año a 249.95 mm/año, observándose una disminución casi en la mitad de los calculados obtenidos en la primera hipótesis, lo cual confirma que la variabilidad de los valores de concentración en el agua lluvia es el factor mas importante a determinar en la aplicación del balance de masa de cloruros, y por lo tanto requiere que se continúe con el proceso de durante otro periodo de tiempo, por lo menos igual al desarrollado en este proyecto. Las tasas de recarga en la C.S.R.L según esta hipótesis se encuentran en un rango de 249.62 mm/año a 250.32 mm/año, o de 20.69% a 20.75% de la precipitación promedio multianual de la cuenca.

Al unificar las dos hipótesis se puede definir un rango mas amplio para los valores de recarga en la zona de estudio que va de 250 mm/año a 492mm/año o de 20% a 41% de la precipitación promedio multianual en la C.S.R.L.

Los resultados mostrados indican que no existen variaciones importantes de la recarga considerando el parámetro de la escorrentía en el calculo respecto al calculo realizado sin considerar escorrentía.

En el estudio realizado por Rueda y Sarmiento (2003)<sup>38</sup> y en el estudio realizado por el GPH en el 2003 denominado “Interacción entre Sistemas Hidrogeológicos para el Estudio del Fenómeno de Recarga en el Macizo de Santander e Identificación de Acuíferos”, se proponen valores de recarga en la C.S.R.L, a partir de la información disponible para la zona, las diferentes estimaciones se presentan en la tabla 36.

Tabla 36. Cuadro comparativo entre los diferentes métodos evaluados para determinar la recarga sobre la C.S.R.L.

<b>METODO</b>	<b>RECARGA mm/año</b>
<b>1. BALANCE DE MASA DE CLORUROS</b>	<b>250-492</b>
2. BALANCE HÍDRICO DE LARGO PLAZO. CAUDAL BASE	266-325
3. CURVA DE AGOTAMIENTO	426,18
4. FLUCTUACIÓN DE NIVELES	218-436
5. BALANCE DE CORTO PLAZO	287
6. BALANCE HÍDRICO DE LARGO PLAZO. INFILTRACION	538-562

Al comparar estos valores con los obtenidos en los primeros acercamientos a valores de recarga en la C.S.R.L mediante la aplicación del balance de masa de cloruros, en el presente estudio se observa que el método está arrojando valores congruentes con los obtenidos a partir de otros métodos en la zona, que sin embargo, deben ser recalculados al completar un periodo mayor de muestreo, para obtener valores promedios mas confiables y representativos de la zona estudiada.

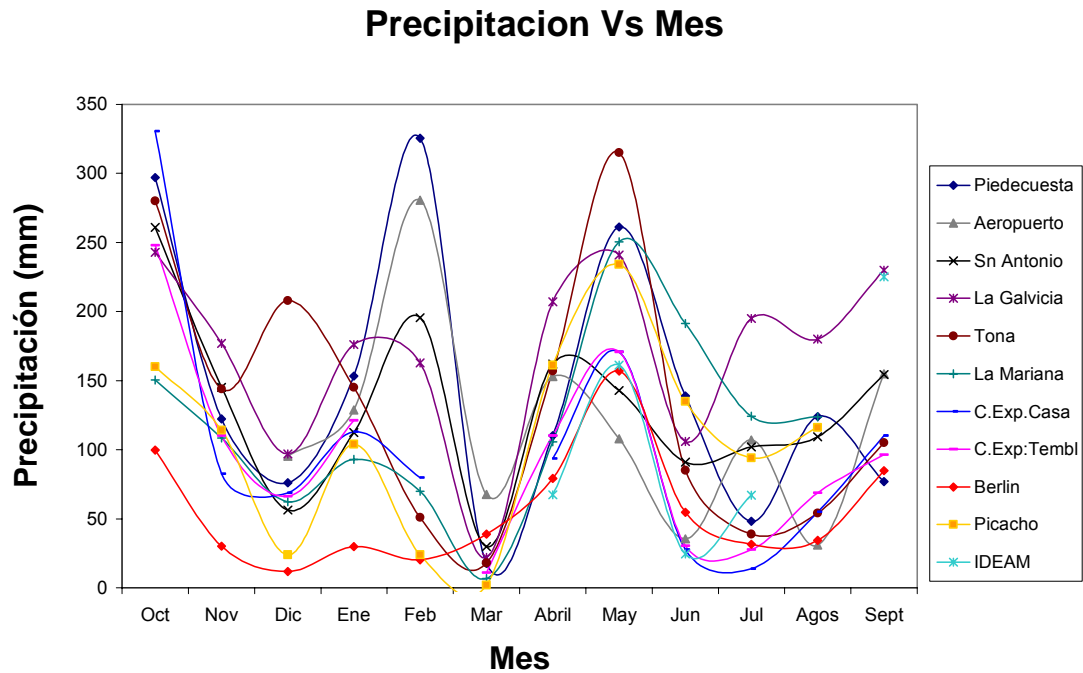
<sup>38</sup> Rueda Sánchez, Irene y Sarmiento A, Mauricio. Op. cit p 94-136.

### **5.3 PARAMETROS FISICO-QUIMICOS**

Durante el desarrollo del proyecto se recolectó la información de campo durante seis meses (abril-septiembre de 2005) correspondiente a 11 estaciones ubicadas en la zona montañosa de la C.S.R.L así como en la parte baja de la cuenca correspondiente a la zona de la meseta de Bucaramanga, dentro de esta información se encuentra el registro de la precipitación mensual en cada estación, así como los parámetros fisicoquímicos correspondientes (PH, Potencial Redox, salinidad y electroconductividad); sin embargo se cuenta con los datos correspondientes a un año (octubre 2004-septiembre 2005), gracias a la información obtenida por Guzmán y Camacho (2005); estos parámetros son importantes, debido a que permiten identificar posibles alteraciones de las muestras, producidas por factores externos, las cuales comprometen la calidad y representatividad de las muestras; por otra parte estos parámetros son exigidos por el laboratorio que posteriormente analizará las muestras para obtener los resultados de isótopos estables en la precipitación.

### 5.3.1 Precipitación

Figura10. Variación mensual de la precipitación durante el periodo de muestreo (Oct.2004-Sep.2005)



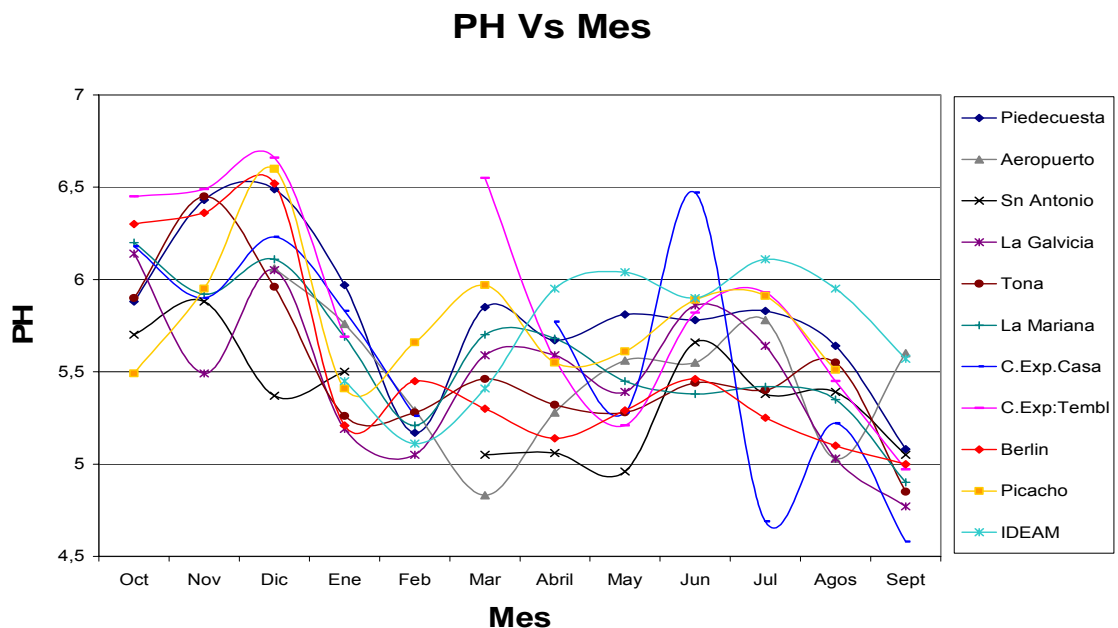
El comportamiento de la lluvia a lo largo del periodo muestreado presenta diferentes comportamientos, algunos anormales comparativamente con el ciclo bimodal característico de la zona. El mes de Diciembre, que es un mes normalmente seco presentó un valor considerable en la Estación de Tona (1910 m.s.n.m) a comparación con las demás estaciones en el mismo mes; luego los meses de Enero y Febrero presentaron eventos importantes de precipitación siendo también épocas generalmente secas; mientras, en el mes de marzo se presentó un periodo muy seco en todas las estaciones, cuando generalmente este mes se caracteriza por marcar el inicio de la temporada de lluvias; sin embargo en los meses de Mayo-Septiembre se presenta un comportamiento mas acorde con el que se presenta usualmente en la región, con un verano marcado en los meses

de Junio y Julio, aunque estuvo influenciado por algunas lluvias, lo que provocó que este fuera un periodo no muy seco, especialmente en las estaciones La Mariana (2481.2 m.s.n.m) y la Galvicia (1779 m.s.n.m).

A continuación se presentan los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el muestreo de Abril de 2005 a Septiembre de 2005, y los datos recopilados para los meses de Octubre de 2004 a Marzo de 2005. Estos últimos datos están depurados teniendo en cuenta que en algunas estaciones se presentaron alteraciones de las muestras, lo que produjo valores anormales de los diferentes parámetros de campo. La estación el Picacho no cuenta con datos para el mes de septiembre de 2005, debido a que el muestreador fue destruido durante el mes anterior y por lo tanto la muestra no pudo ser recolectada. Por esto fue necesario instalar un nuevo muestreador el 10 de octubre de 2005 y asegurar la continuidad del muestreo.

### 5.3.2 PH

Figura 11. Variación mensual del PH (Oct.2004-Sep.2005)



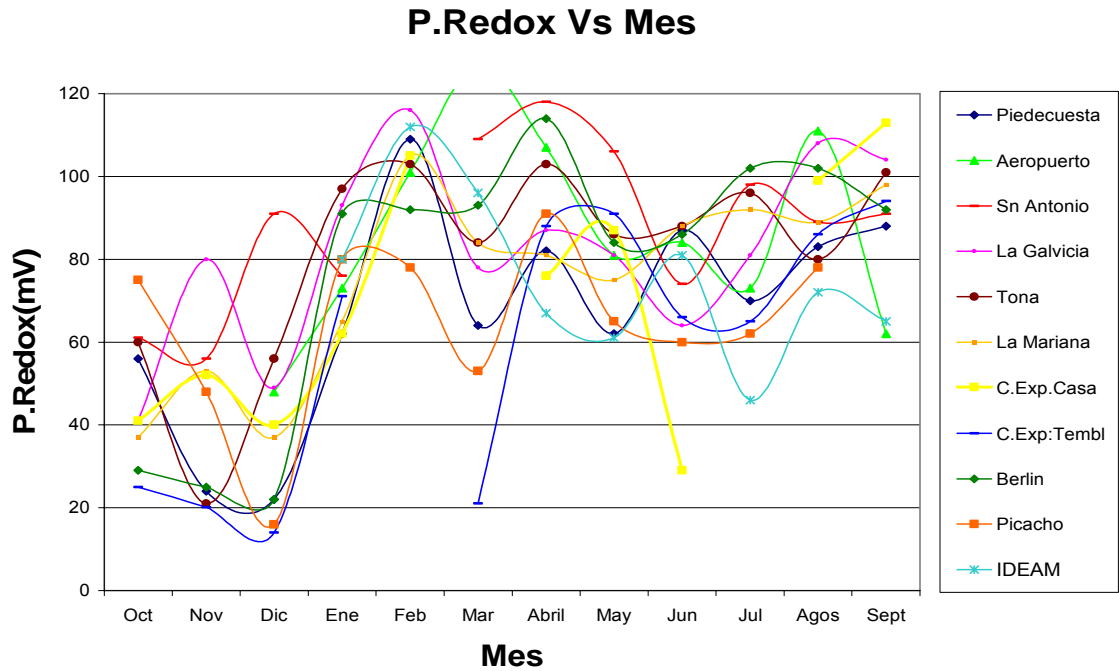
En el periodo analizado el PH se mantuvo en un rango de 6.6 a 4.58, indicando el comportamiento ácido del agua lluvia. Se puede observar que en el mes de Diciembre se presentaron los valores menos ácidos, y posteriormente estos valores disminuyen y en general se mantienen en un rango de 5 y 6 y luego se presenta una tendencia gradual de disminución en los meses de Julio a Septiembre, exceptuando la estación No 2 (Aeropuerto) en el mes de Septiembre y la estación No 5 (C.Exp. Casa), en Julio.

La lluvia normal tiene tendencia a la acides porque el dióxido de carbono se disuelve en ella, por lo tanto tiene un PH de aproximadamente 5.5, sin embargo valores menores como los presentados en algunas estaciones durante el periodo de muestreo indican un mayor grado de contaminación a lo largo de la cuenca, especialmente en la zona alta de la misma.

La mayor parte de las sustancias acidificantes vertidas al aire son el dióxido de azufre (SO<sub>x</sub>), producidos en las instalaciones industriales alimentadas por combustibles fósiles y los óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los cuales junto con los hidrocarburos (componentes de la gasolina) y fuentes de CFC's (productos fluorocarbonados), así como el smog fotoquímico producido por la interacción solar con los óxidos de nitrógeno; la consecuencia general es la formación de niebla con alto contenido de ácido sulfúrico; estas sustancias son transportadas por las masas de aire y sus efectos se pueden ver reflejados a grandes distancias de las fuentes contaminantes. De esta forma, debido a la naturaleza orográfica de la precipitación en la zona montañosa de la cuenca, los contaminantes producidos en el área de la meseta de Bucaramanga y su área metropolitana pueden ser los causantes de este fenómeno de contaminación en el agua lluvia en la parte alta de la cuenca.

### 5.3.3 Potencial Redox

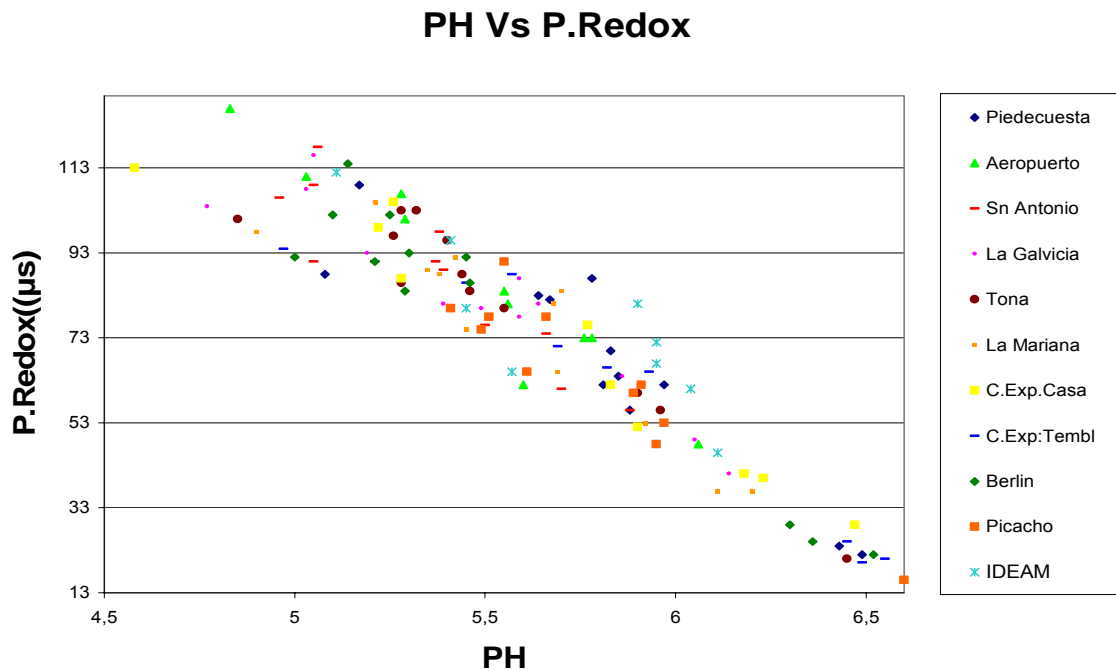
Figura 12. Variación mensual del Potencial Redox (Oct.2004-Sep.2005)



El potencial redox se mantuvo en un rango de 60 a 120 mV, sin embargo en el mes de Julio en la estación No 5 (C.Exp. Casa), se presentó un valor de 140 mV.

**5.3.4 PH Vs Potencial Redox** El potencial redox y el PH están relacionados inversamente y se puede apreciar en la figura 13.

Figura13. PH Vs. P. Redox (Oct.2004-Sep.2005)



El Potencial Redox esta relacionado con la facilidad de algunos compuestos transitorios del agua que oxidan o reducen a otros ya sea por actividad biológica o directamente por la presencia de materia orgánica soluble, micro contaminante (debido a que algunos productos químicos son compuestos orgánicos sintéticos), compuestos insolubles sólidos y organismos vivos. Así el P. Redox puede ser un indicativo de la calidad del agua, donde valores bajos indican altos contenidos de materia orgánica.

### 5.3.5 Salinidad y Electroconductividad

Figura 14. Variación mensual de la Salinidad (Oct.2004-Sep.2005)

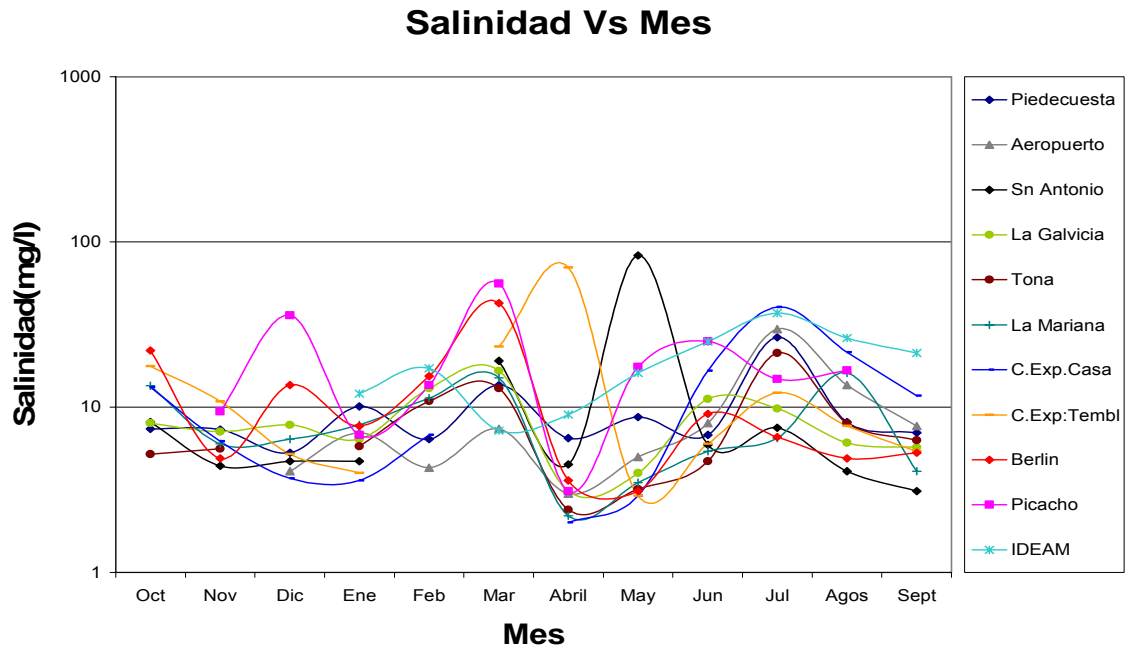
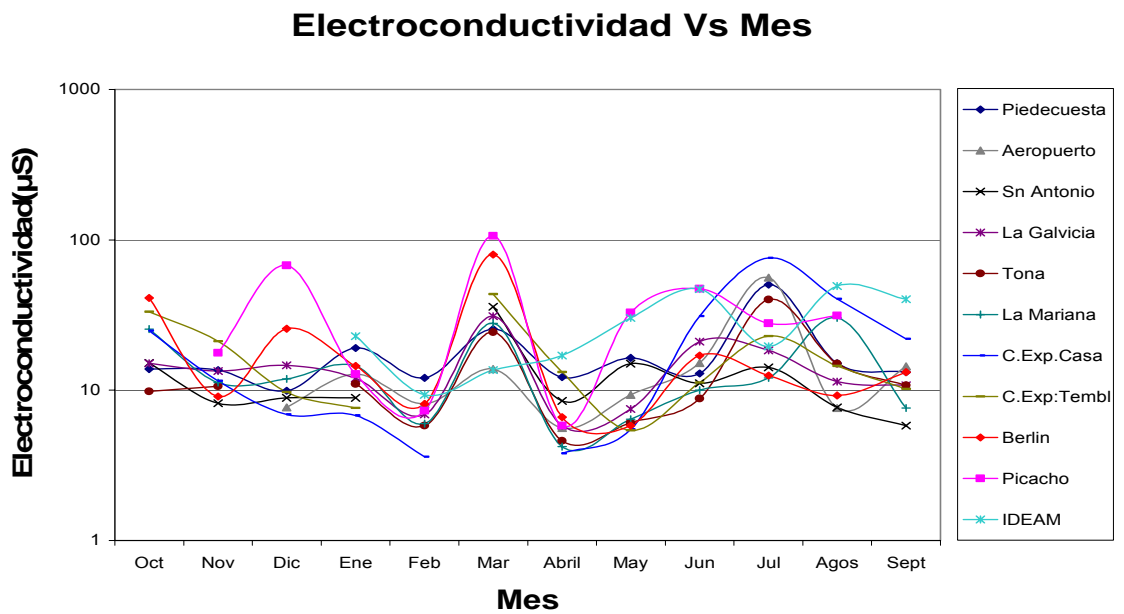


Figura 15. Variación mensual de la Electroconductividad (Oct.2004-Sep.2005)



La salinidad y la electroconductividad están relacionadas entre si debido a que la presencia de iones como el cloruro o sales disueltas en el agua condicionan los valores de electroconductividad en la misma, valores altos de salinidad y electroconductividad pueden ser indicativos de contaminación de las muestras por factores locales. El rango de valores de electroconductividad fue de 3.6 mV a 106 mV, mientras la salinidad estuvo entre 2 mg/l y 83 mg/l.

#### **5.4 EDAD DEL AGUA Y TIEMPO DE RESIDENCIA.**

Con el fin de iniciar el estudio de la edad del agua en la Cuenca Superior del Río Lebrija, se analizaron los diferentes datos existentes y mostrados en el capítulo anterior.

En la campaña realizada en el 2003, se obtuvieron valores de tritio para 11 puntos distribuidos en la parte baja de la cuenca, estos datos fueron analizados por Gómez y Anaya (2004)<sup>39</sup>.

---

<sup>39</sup> Gómez y Anaya, Op. cit.

Tabla 37. Cuadro comparativo de resultados de análisis de tritio en la C.S.R.L. para los años 2003 y 2004.

No	CÓDIGO LOCAL	LOCALIZACIÓN	ALTURA	COORDENADAS		ANÁLISIS					
				ESTE	NORTE	2004 H3	Error de Laboratorio	CLASE	2003 H3	Error de Laboratorio	CLASE
1	Nacimiento (fisura) Qda la Malaña	Vereda La Malaña	1100	1109566	1279477	0,35	0,2	Manantial			
2	Pozo Pretecor	Vía Piedecuesta Km10	1000	1100963	1269826	0,95	0,22	Pozo			
3	Piezómetro Pan de Azúcar Inferior	Barrio Bajos de Pan de Azúcar	1042	1107875	1279071	1,4	0,19	Piezómetro			
4	Ajibe la Cumbre	Lavadero La Cumbre	1000	1109558	1274832	1,54	0,21	Cisterna	2,7	0,6	Cisterna
5	Piezómetro La Flora Inferior	Parque La Flora	957,9	1107270	1278178	1,33	0,22	Piezómetro	1,9	0,5	Piezómetro
6	Cascada Zapamanga	Km. 11+100	1580	1110284	1278577	2,21	0,24	Manantial			
7	Quebrada El Carmen	Transversal Oriental	930	1106934	1277488				2,1	0,5	Quebrada
8	Formación Diamante	Barrio La Esmeralda	974	1109279	1275887				0,3	0,5	Calizas Devonico
9	Estación Oriental T	Estación Oriental T	898	1109328	1275468				0,1	0,5	Pozo de Bombeo
10	Jardín Las Colinas	Cementerio La Colina	1030	1108271	1278069				0	0,5	Pozo de Bombeo
11	Lavadero San Francisco	Bulevar Bolívar Cra 21 Esq.	961	1105190	1281450				2,4	0,5	Pozo de Bombeo
12	Terpel Chimita	Terpel Chimita	675	1100750	1277520				0,4	0,5	Pozo Artesiano
13	Ciudad Norte	Ciudad Norte	830	1105350	1282260				0,1	0,5	Pozo de Bombeo
14	La Cumbre	Estación la Cumbre	1008	1109324	1274653				2	0,5	Precipitación
15	Macizo de Santander	Km. 33 Vía Cúcuta	2520	1118493	1279608				3	0,6	Precipitación

En la jornada de muestreo del 2004 se obtuvieron resultados de tritio para seis puntos, distribuidos en la parte baja de la cuenca; el error en unidades de tritio (UT) manejado por el laboratorio encargado tiene un rango de 0.19 UT a 0.24 UT, valores menores a los obtenidos para los datos correspondientes a la campaña del 2003 donde los errores del laboratorio estuvieron dentro de un rango de 0.5 a 0.6 UT. Por lo tanto estos valores se pueden trabajar de manera relativamente confiable, esto es importante debido a que el error que proporciona el laboratorio en los análisis de tritio es una de las limitantes para su implementación como trazador ambiental debido a que se pueden obtener errores grandes y en ocasiones mayores que los mismos resultados suministrados por el laboratorio.

En primer lugar se tiene el punto No1 Nacimiento (fisura) en la quebrada La Malaña, ubicado en la vereda del mismo nombre; con un valor de 0.35 UT, con un error de 0.2 UT, este valor es indicativo de aguas antiguas, con gran tiempo de residencia en la cuenca, este valor, por ser tan bajo es característico de aguas que posiblemente provienen de años anteriores al pico de tritio en la precipitación ocurrido en los años 50 y 60, cuando los niveles de tritio en la lluvia estaban condicionados únicamente por procesos de producción natural y de carácter cosmogénico; esto indicaría zonas de recarga alejadas, con un mayor recorrido del agua.

El punto No4 (Aljibe la Cumbre), ubicado en el barrio la cumbre cuenta con datos de muestras tomadas en el 2003 y en el 2004; en la campaña de muestreo del 2003 se obtuvo un dato para este punto, de 2.7 UT que fue tomado en la cisterna, este valor es indicativo de aguas nuevas producida por una posible mezcla con agua lluvia; el resultado obtenido de una muestra de agua lluvia tomada en la cumbre en la misma campaña de muestreo que arrojó un valor de 2 UT puede reafirmar esta hipótesis por ser una valor cercano al obtenido en la cisterna; sin embargo estos resultados presentaron errores de laboratorio considerables de 0.5 UT y 0.6 UT respectivamente, esto afecta la veracidad de cualquier conclusión que se pueda dar; por otra parte el valor obtenido para el aljibe en la campaña de muestreo del 2004 arroja un valor de 1.54 UT, con un error mas bajo que los anteriores (0.21 UT), este valor indica que el agua corresponde a aguas de edad intermedia, mas recientes al tipo de agua encontrado en el punto No1 (La Malaña). De acuerdo a los datos isotópicos consultados para este punto, se puede decir que la altura de recarga se encuentra en un rango de 1700 a 1800 m.s.n.m

El punto No3 (Piezómetro Pan de Azúcar Inferior), ubicado en el barrio bajos de Pan de Azúcar presento un valor de 1.4 UT, con un error de laboratorio de 0.19 UT, correspondería también a aguas de edad intermedia, con tiempos de

residencia menores, de forma similar el punto No5 (Piezómetro La Flora Inferior), el cual presenta un valor de 1.33 UT, con un error de 0.22 UT, esto indica que corresponden a un mismo tipo de agua según su edad, esto indica también que las alturas de recarga de estos puntos pueden estar en el mismo rango; lo cual es apoyado por los estudios de zonas de recarga por medio de isótopos estables que se han realizado en la zona de estudio, los cuales muestran desviaciones isotópicas similares para estos puntos y proponen alturas de recarga entre 1500 a 1700 m.s.n.m. En la campaña de muestreo realizada en el 2003, este punto fue analizado y mostró un valor de 1.9 UT con un error de 0.5 UT; considerando el error en cada dato para este punto en las dos campañas se puede decir que los datos muestran correspondencia entre si.

El punto No2 (Pozo Pretecor), ubicado en la vía a Piedecuesta presenta un valor de 0.95 UT, el cual es un valor un poco mas bajo que indica un mayor tiempo de recorrido del agua encontrada desde su zona de recarga y por lo tanto indica la presencia de agua antigua; al tratarse de un pozo profundo podría esperarse un valor menor de tritio, sin embargo, es posible que en el pozo se produzca mezcla con aguas mas recientes y mas superficiales.

El punto No6 (Cascada Zapamanga), ubicado en el Km. 11+100, vía Cúcuta, presento un valor de 2.21 UT, con un error de 0.24 UT. Este valor indicativo de aguas nuevas; debido a la naturaleza del punto es lógico encontrar un valor alto de tritio, ya que puede tratarse de agua lluvia, que hace parte de la esorrentía directa del punto analizado.

De esta forma es posible identificar tres grupos de diferentes con diferentes tipos de agua según su edad y tiempo de residencia en la cuenca; el primero, conformado por los puntos, donde los valores que están en un rango de 0 UT a 1 UT (Pozo Pretecor y Nacimiento Qda. La Malaña); puntos representativos de

aguas antiguas, con grandes tiempos de residencia, en especial el punto correspondiente a La Malaña.

El segundo grupo, en donde los valores están entre 1 UT y 2 UT (Aljibe La Cumbre, Piezómetro Pan de Azúcar inferior y Piezómetro La Flora inferior) en los cuales se encuentran aguas de edades consideradas intermedias, con menores tiempos de residencia posiblemente por la ubicación de las zonas de recarga de estos puntos mas cercanas y con menor altitud.

El tercer grupo con valores mayores de 2 UT (Cascada Zapamanga), donde se encuentran aguas nuevas y similares a datos de agua lluvia datadas en la campaña del 2003 en La Cumbre (2 UT), y en el macizo de Santander (3UT); es importante tener en cuenta que el punto ubicado en la meseta (La Cumbre) se encuentra a 1008 m.s.n.m, mientras el punto en el macizo se encuentra a 2520 m.s.n.m, sobre el Km. 33 vía a Cúcuta.

En la tabla 38, se puede observar que dentro de los datos ubicados entre 0 UT y 1 UT, se pueden distinguir puntos correspondientes a zonas donde el agua es mas antigua con valores de 0 UT a 0.1 UT, mientras que se encuentran valores de 0.3 UT y 0.4 UT, para los puntos de la formación diamante y Terpel Chimita, valores que se asemejan al obtenido en La Malaña, así en estos puntos se encontraría agua de edad y tiempo de residencia similares; de acuerdo a Gómez (2003)<sup>40</sup>. Las alturas de recarga para estos dos puntos es de 1300 a 1500 m.s.n.m. y 1450 a 1850 m.s.n.m. respectivamente, los cuales son valores próximos a los indicados para la zona de recarga del punto La Malaña.

El punto No 7 (Quebrada el Carmen), (2.1 UT), correspondería también a aguas nuevas con posible influencia de la precipitación local.

---

<sup>40</sup> Gómez, Sully y Colegial, Juan Diego, Interacción entre sistemas hidrológicos para el estudio del fenómeno de la recarga en el macizo de Santander. Bucaramanga, 2003.

El dato obtenido en el punto No11 (Lavadero San Francisco), no se tomará en cuenta pues al igual que Gómez (2003)<sup>41</sup>, se concluye que es un dato incoherente debido a la naturaleza del punto muestreado.

Además, la base de datos del ISOHIS (Sistema de Información de Hidrológica Isotópica) cuenta con los resultados obtenidos de muestras de precipitación tomadas en el hemisferio sur como parte de diferentes estudios realizados anteriormente; en esta base de datos se pudo encontrar series históricas mensuales de tritio en la precipitación correspondientes a las ciudades de Bogota (1971-2002) y Barranquilla (1971-1989); de esta forma se puede realizar una grafica que nos brinde una idea del posible decaimiento que ha presentado el tritio en la precipitación en el país; sin embargo, no es posible realizar una aproximación mas exacta en cuanto a la edad del agua en la zona de nuestro interés, ya que sería necesario contar con un registro similar de estos valores en la misma.

En las figuras 16 y 17, se presentan los valores de tritio promedios anuales corregidos por decaimiento radioactivo al año 2004, (ya que este es el último año del que se tienen datos para la ciudad de Bucaramanga), para las ciudades de Bogotá y Barranquilla, con el intervalo que presenta cada valor al tener en cuenta el error en unidades de tritio para cada punto.

---

<sup>41</sup> Gómez, Sully y Colegial, Juan Diego, Ibit.,

Figura 16. Decaimiento de Tritio en la ciudad de Bogotá (1971-2002)

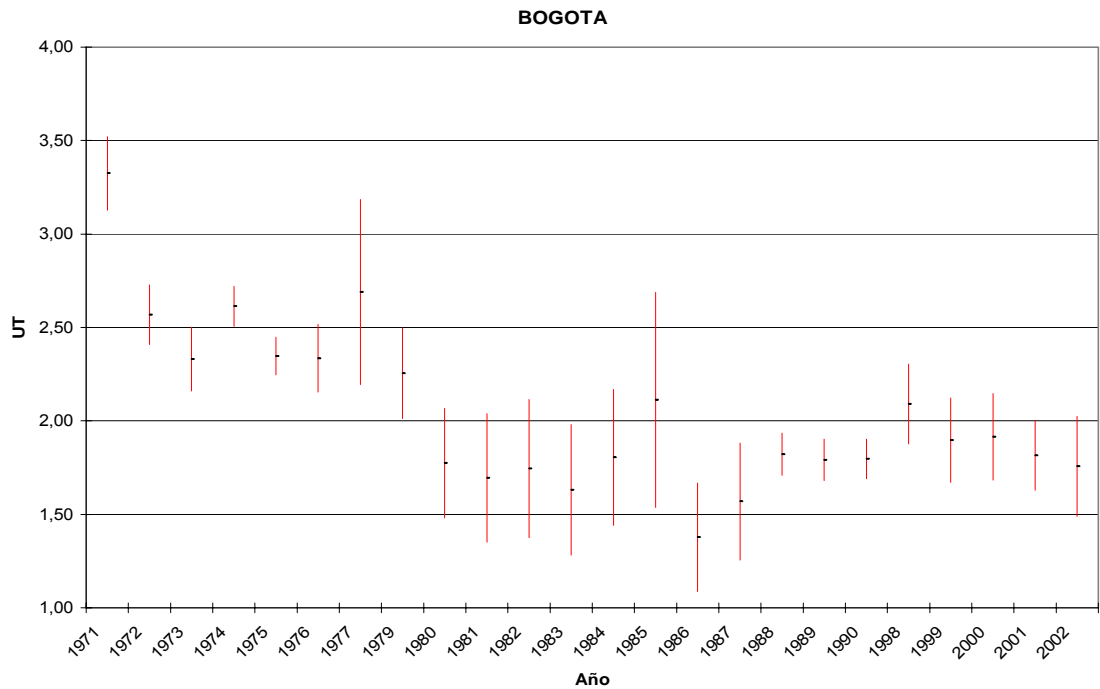
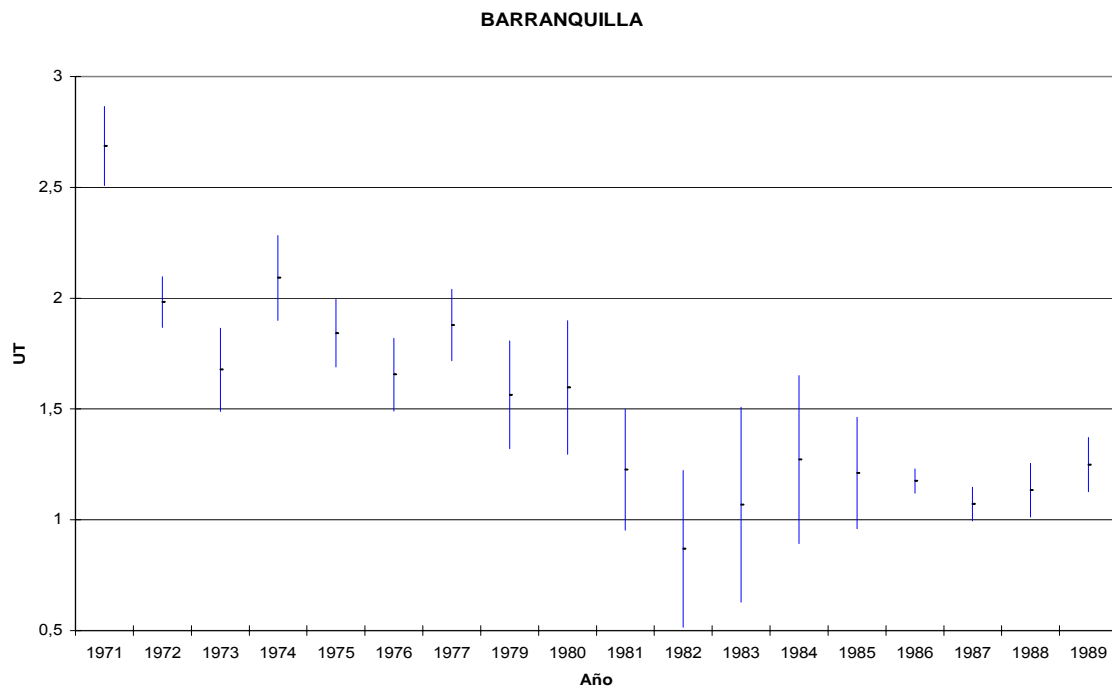


Figura 17. Decaimiento de Tritio en la ciudad de Barranquilla (1971-1989)



Se puede observar que los datos correspondientes a la ciudad de Barranquilla presentan valores menores de tritio, en comparación a los obtenidos en la ciudad de Bogota, mostrando una mayor correspondencia con los muestras de precipitación datadas para Bucaramanga; esto puede explicarse debido a que en las costas hay menor aporte natural de tritio, ya que el vapor de agua oceánico presenta bajas concentraciones de tritio, puesto que hay un intercambio con la superficie de agua del océano, que tiene bajas concentraciones de tritio y luego con el movimiento progresivo de las masa de aire hacia el continente aumenta la concentración por aportes de la estratosfera y los procesos de evapotranspiración.

El decaimiento de tritio para la ciudad de Bogota, para la serie graficada mediante un ajuste de tipo exponencial presenta un coeficiente de decaimiento exponencial de 0.012, mientras que para la ciudad de Barranquilla se obtiene un coeficiente de 0.0426; lo cual muestra que además de tener menores valores en la ciudad de Barranquilla el contenido de tritio en la precipitación a sufrido una mayor disminución gradual en los años anteriores.

Figura 18. Ajuste exponencial del decaimiento de tritio para la ciudad de Bogotá (1971-2002)

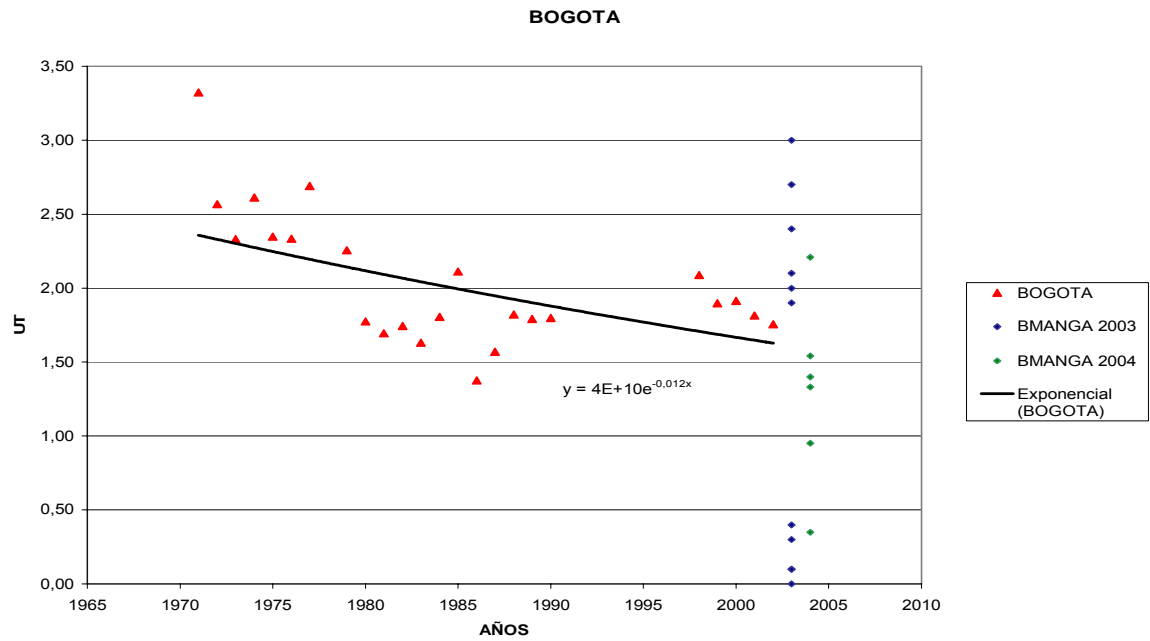
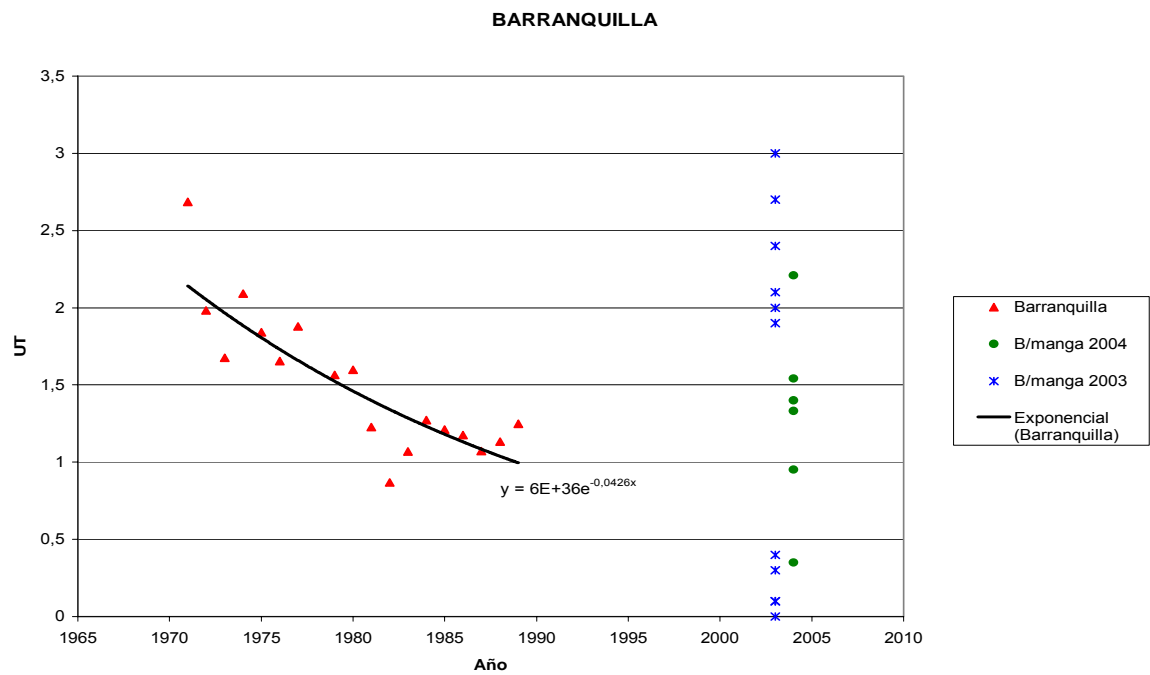


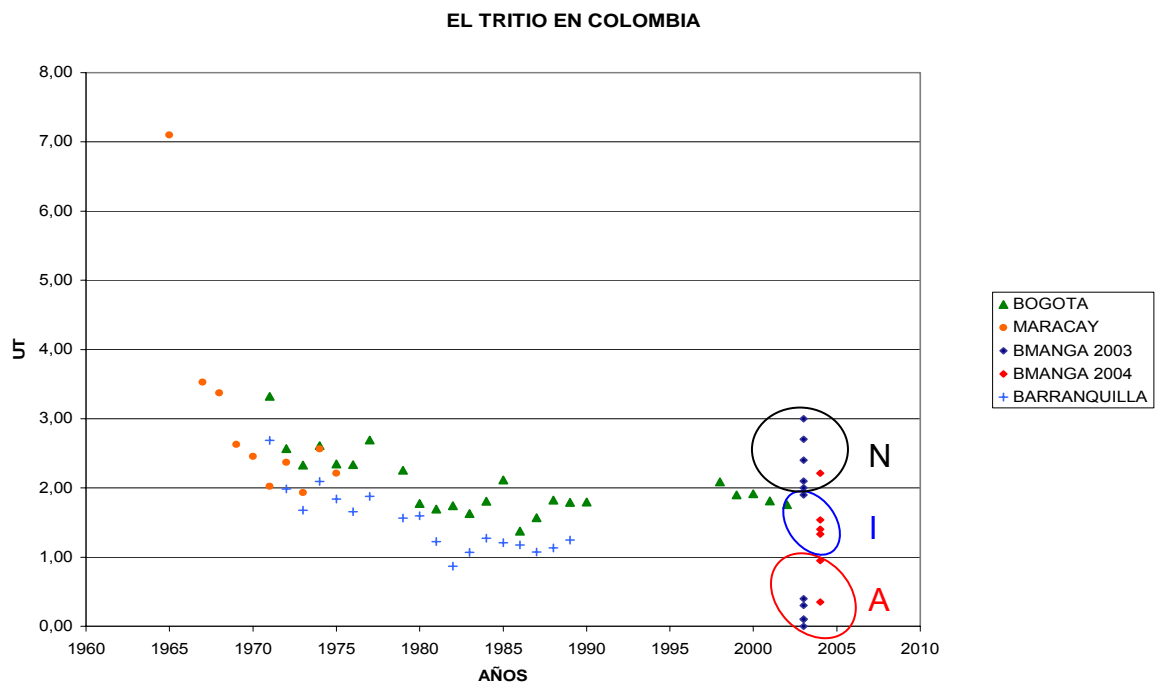
Figura 19. Ajuste exponencial del decaimiento de tritio para la ciudad de Barranquilla (1971-1989)



Además se cuenta con valores de tritio para la ciudad de Maracay en Venezuela (1965-1975), estos sirven para tener una idea del comportamiento del tritio en la precipitación en los años siguientes al pico de los años 60.

Al integrar todos los valores recopilados y obtenidos, tanto de las concentraciones de tritio en la precipitación, como los valores obtenidos en aguas subterráneas para la ciudad de Bucaramanga, se obtiene la gráfica que se presenta a continuación, donde se identifican además los tres grupos de agua según su edad (Nueva, Intermedia y Antigua) para la zona de estudio propuestos anteriormente.

Figura 20. Clasificación de las aguas en la C.S.R.L según su edad.



Se muestran los tres tipos de agua según la edad para la zona de estudio descritos anteriormente. Además, se incluye la serie de datos de tritio para la ciudad de Maracay (Venezuela), con el fin de observar el comportamiento del tritio en muestras anteriores a los años setenta donde la influencia del bombeo de tritio a la atmósfera por las pruebas nucleares de los años 50 y 60 es evidente.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 CONCLUSIONES**

Se estableció un protocolo de muestreo para la recolección y almacenamiento de agua lluvia y agua subterránea para llevar a cabo el análisis del ión cloruro. Se tomaron muestras compuestas mensuales de agua lluvia en seis estaciones distribuidas a lo largo de la C.S.R.L durante seis meses aprovechando la red de muestreadores existente implementados por el GPH; igualmente se tomaron muestras puntuales de aguas subterráneas en un dren y en los piezómetros de Pan de Azúcar y Parque la Flora utilizando un nuevo muestreador diseñado previamente por el GPH.

Las concentraciones de cloruro en la precipitación obtenidas en el periodo de muestreo (Abril – Septiembre de 2005), presentaron alta variabilidad con un rango de valores de 0.02mg/l a 9.93mg/l. Esta dispersión en los datos puede ser producto de contaminación puntual de la muestra debido a factores externos o a procesos de acumulación del ión en la atmósfera para los periodos más secos. Por esta razón se concluye que es necesario realizar un muestreo prolongado que permita obtener valores promedios confiables y representativos de la zona estudiada.

Los valores de cloruros en aguas subterráneas estuvieron en un rango de 1.36 mg/l a 25.46mg/l, donde los valores altos son indicativos de la contaminación del agua en el acuífero superior por procesos de origen antrópico, sobre la meseta de Bucaramanga.

El rango de la recarga para la C.S.R.L. según el Balance de Masa de Cloruros es de 250 mm/año a 492mm/año o de 20% a 41% de la precipitación promedio multianual de la zona, mientras que los resultados ya obtenidos para la cuenca se encuentran entre 218mm/año a 436mm/año dependiendo del método utilizado.

Los valores de PH ácidos entre 4.5 y 5.5 encontrados en el agua lluvia en los meses de Enero a Septiembre de 2005 en la totalidad de las estaciones muestreadas pueden ser indicativo de que la zona montañosa de la cuenca es afectada por los procesos de la contaminación ambiental que se produce en la parte baja de la cuenca y que son transportados gracias al efecto orográfico de la precipitación.

Los datos de tritio analizados para la cuenca se encuentran en tres grupos; de 0 UT a 1 UT característico de pozos profundos (aguas antiguas) que pueden provenir de años anteriores a los picos de tritio en la precipitación ocurrida durante los años 50 y 60, cuando los niveles de tritio en la lluvia estaban condicionados por procesos de producción natural y de carácter cosmogénico; de 1 UT A 2 UT encontradas en piezómetros, aljibes y cisternas (aguas intermedias) con tiempos de residencia en la cuenca menores y mayores de 2UT encontradas en puntos de escorrentía y muestras de agua lluvia (aguas nuevas).

## 6.2 RECOMENDACIONES

Es importante darle continuidad al seguimiento del ión cloruro en la precipitación y agua subterránea a lo largo de la zona de estudio, para tener mejor idea del comportamiento del ión en la cuenca y mejorar la calidad de los resultados obtenidos.

Es necesario estudiar la variabilidad espacial y temporal que poseen los datos de precipitación, además de analizar las posibles causas de valores anormales que se puedan llegar a presentar, descartando los posibles errores presentados ya sean por el laboratorio o errores humanos.

Se recomienda además la posibilidad de implementar el muestreo de cloruros en la zona no saturada con el fin de obtener datos de recarga puntuales en puntos específicos a lo largo de la cuenca a partir del método de perfiles de cloruro.

Es importante que las entidades ambientales de la región se percaten de los fenómenos de contaminación del agua subterránea, en especial del acuífero superior que se están presentando en la meseta de Bucaramanga así como la contaminación ambiental en la parte alta de la Cuenca Superior del río Lebrija.

## BIBLIOGRAFIA

Custodio, E y LLamas, R., 1975. Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, S.A. Pág. 182 – 246. Isotopos, Hidrogeoquímica.

Herrera Lameli, Christian. Caracterización Hidroquímica de Betancuria, Fuerteventura, Archipiélago de Canarias. Tesis de grado. Barcelona, España, 2001.

Qannam Ziad, Artículo “A hydrogeological, hydrochemical and environmental study in Wadi Al Arroub drainage basin, south west Bank, Palestine”. REALIZADOS EN EL MUNDO.

Allison et. 1994, Tracers for Recharge Estimation. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MUNDO.

Bridget R. Scalon, November 1990, Evaluation Of Moisture Flux From Chloride Data in Desert Soils. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MUNDO.

Cerón, José Carlos, Olías Álvarez, Manuel y Moreno López, Maria José, Master Universitario en Ingeniería Ambiental “Contaminación y Tratamiento de Aguas”. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL EXTERIOR.

Phillips Fred m., Hogan James, Mills Suzanne y Hendrickx Jan m.h. Artículo, “Environmental Tracers Applied to Quantifying Causes of Salinity in Arid-Region Rivers: Preliminary Results from the Rio Grande, Southwestern USA”. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL EXTERIOR.

Reedy Robert c, Scanlon r. Bridget y Dutton r. Alan. Artículo “Collection and Analysis of Environmental Tracers for Estimation of Recharge Rates in the Gam Model of the Central Carrizo-Wilcox Aquifer”.

Álvarez-Benedí y P. Marinero, 2003. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, En: Utilización del Balance de Cloruros en la Zona no Saturada en la Estimación de la Recarga Natural a un Acuífero Detrítico”.

Guzmán A. Diego y Camacho M. Hernán. Implementación de una red de muestreadores de isotopos estables para obtener la recta meteórica local. Bucaramanga, 2005. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.

Rueda, Sánchez Irene y Sarmiento, Mauricio. Revisión de Metodologías para la estimación de la recarga en acuíferos mediante balance de agua. Bucaramanga, 2003. Pág. 94-118. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.

Allison, G.B., Gee, G.W., Tyler, S.W. (1994) Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions. Soil Science Society of America Journal 58:6-14.

Custodio, Gimena E. Evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. 1 ed. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. 1997. P. 181-208.

Allison, G.B., Hughes, M.W. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. 1978. Aust. J. Soil Res. 16: 181-195

Eriksson, E., Khunakasem, V. Chloride concentrations in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain. 1969. Journal of Hydrology 7: 178-197.

Campbell, A., Phillips, F., Shurbaji, A. Stable isotope study of soil and groundwater WIPP Site, New Mexico: Estimation of recharge to the Rustler aquifers. Technical completion report. New Mexico Watermanagement Education and Research Consortium (WERC). 1993.

Clark, I., Fritz, P. Environmental Isotopes in Hydrogeology: New York, Lewis Publishers. 1997.

Fritz, P., and Fontes, J.Ch., Handbook of environmental isotope chemistry: Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1980. Pág 545.

Allison, G.B., and M.W. Hughes. The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region, Journal of Hydrology 602, 1983. Pág. 157-173.

Fabryka-Martin, J., M. Caffee, G. Nimz, J. Southon, S. Wightman, W. Murphy, M. Wickman, and P. Sharma. Distribution of chlorine-36 in the unsaturated zone at Yucca Mountain: an indicator of fast transport paths. Focus '93 Conference. Site Characterization and Model Validation. American Nuclear Society. 1993. Las Vegas. Pág. 56-68.

Gómez, Sully y Anaya, Ángel. Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. Revista Avances en Recursos Hídricos. Numero 11 (Septiembre, 2004); p. 37-50. ISSN 0121-5701

Arenas, Juan P. y Ruiz, Juan S.\_Estudio de la variación del régimen de lluvias en la Cuenca Superior del río Lebrija (C.S.R.L). Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005. p 95.

# **ANEXOS**

**A. BASE DE DATOS ISOHIS PARA BARRANQUILLA,  
COLOMBIA.**

FECHA	TIPO DE MUESTRA	H3 UT	ERROR UT
15/08/1971	Precipitación	19.0	1.3
15/09/1971	Precipitación	16.1	0.7
15/10/1971	Precipitación	14.4	0.8
15/11/1971	Precipitación	19.9	1.8
15/04/1972	Precipitación	12.7	1.2
15/05/1972	Precipitación	10.0	0.5
15/06/1972	Precipitación	12.1	0.6
15/08/1972	Precipitación	14.6	0.7
15/09/1972	Precipitación	11.1	0.5
15/04/1973	Precipitación	9.8	3.6
15/05/1973	Precipitación	9.8	0.7
15/07/1973	Precipitación	12.2	0.6
15/08/1973	Precipitación	9.4	0.6
15/09/1973	Precipitación	11.5	0.8
15/10/1973	Precipitación	7.6	0.7
15/11/1973	Precipitación	7.4	0.6
15/06/1974	Precipitación	13.9	0.5
15/07/1974	Precipitación	8.8	3.3
15/08/1974	Precipitación	15.5	0.6
15/10/1974	Precipitación	9.5	0.4
15/11/1974	Precipitación	9.3	0.4
15/05/1975	Precipitación	10.4	0.4
15/06/1975	Precipitación	14.4	2.9
15/08/1975	Precipitación	10.7	0.5
15/09/1975	Precipitación	9.1	0.4
15/10/1975	Precipitación	7.1	0.4
15/11/1975	Precipitación	7.0	0.5
15/12/1975	Precipitación	7.7	0.4
15/04/1976	Precipitación	9.7	1.2
15/05/1976	Precipitación	9.0	1.3
15/06/1976	Precipitación	9.0	1.1
15/08/1976	Precipitación	10.3	1.0
15/09/1976	Precipitación	7.5	0.3
15/10/1976	Precipitación	5.5	0.4
15/11/1976	Precipitación	5.4	0.3
15/05/1977	Precipitación	8.4	1.0
15/06/1977	Precipitación	9.0	1.0
15/07/1977	Precipitación	9.8	1.0

FECHA	TIPO DE MUESTRA	H3 UT	ERROR UT
15/08/1977	Precipitación	10.6	1.0
15/09/1977	Precipitación	7.4	0.3
15/10/1977	Precipitación	8.8	0.4
15/11/1977	Precipitación	6.5	0.5
15/08/1979	Precipitación	5.8	1.0
15/09/1979	Precipitación	6.2	1.0
15/10/1979	Precipitación	7.2	1.0
15/11/1979	Precipitación	6.5	1.0
15/05/1980	Precipitación	3.5	2.2
15/07/1980	Precipitación	7.7	1.0
15/08/1980	Precipitación	6.1	1.0
15/09/1980	Precipitación	8.2	1.0
15/10/1980	Precipitación	6.1	1.0
15/11/1980	Precipitación	4.6	1.0
15/04/1981	Precipitación	7.3	1.0
15/05/1981	Precipitación	5.4	1.0
15/06/1981	Precipitación	2.9	1.0
15/07/1981	Precipitación	6.5	1.0
15/08/1981	Precipitación	6.2	1.0
15/09/1981	Precipitación	6.8	1.0
15/10/1981	Precipitación	1.5	1.0
15/11/1981	Precipitación	3.1	1.0
15/12/1981	Precipitación	0.8	1.0
15/04/1982	Precipitación	3.2	1.0
15/05/1982	Precipitación	0.8	1.0
15/06/1982	Precipitación	0.6	1.0
15/09/1982	Precipitación	3.5	1.0
15/10/1982	Precipitación	4.5	1.0
15/11/1982	Precipitación	7.7	2.6
15/03/1983	Precipitación	3.6	2.6
15/05/1983	Precipitación	4.3	1.0
15/06/1983	Precipitación	5.0	1.0
15/07/1983	Precipitación	3.4	1.0
15/08/1983	Precipitación	2.9	2.5
15/10/1983	Precipitación	2.3	1.0
15/11/1983	Precipitación	3.0	1.0
15/04/1984	Precipitación	5.6	2.4
15/05/1984	Precipitación	2.7	1.0

FECHA	TIPO DE MUESTRA	H3 UT	ERROR UT
15/06/1984	Precipitación	2.8	1.0
15/07/1984	Precipitación	2.3	1.0
15/08/1984	Precipitación	4.1	1.0
15/09/1984	Precipitación	2.7	1.0
15/10/1984	Precipitación	7.0	1.0
15/11/1984	Precipitación	4.3	1.0
15/04/1985	Precipitación	4.0	1.0
15/05/1985	Precipitación	3.4	1.0
15/06/1985	Precipitación	3.7	1.0
15/07/1985	Precipitación	4.5	1.0
15/08/1985	Precipitación	2.7	1.0
15/09/1985	Precipitación	4.3	1.0
15/10/1985	Precipitación	3.3	0.2
15/11/1985	Precipitación	3.2	0.2
15/12/1985	Precipitación	2.8	0.2
15/06/1986	Precipitación	3.9	0.1
15/08/1986	Precipitación	3.2	0.2
15/09/1986	Precipitación	3.1	0.1
15/05/1987	Precipitación	2.3	0.2
15/06/1987	Precipitación	3.3	0.2
15/05/1988	Precipitación	3.7	0.3
15/06/1988	Precipitación	3.2	0.3
15/07/1988	Precipitación	2.6	0.3
15/08/1988	Precipitación	3.1	0.3
15/09/1988	Precipitación	1.2	0.1
15/10/1988	Precipitación	2.9	0.3
15/11/1988	Precipitación	2.9	0.5
15/05/1989	Precipitación	2.9	0.3
15/06/1989	Precipitación	3.0	0.2
15/07/1989	Precipitación	3.1	0.3
15/08/1989	Precipitación	2.9	0.2
15/09/1989	Precipitación	3.2	0.2
15/11/1989	Precipitación	3.0	0.4
15/12/1989	Precipitación	2.3	0.4

**B. BASE DE DATOS ISOHIS PARA BOGOTA,  
COLOMBIA**

FECHA	TIPO DE MUESTRA	H3 UT	ERROR UT
15/07/1971	Precipitación	24.0	1.5
15/08/1971	Precipitación	24.9	1.9
15/09/1971	Precipitación	22.8	0.9
15/10/1971	Precipitación	20.3	1.0
15/11/1971	Precipitación	18.0	0.9
15/12/1971	Precipitación	18.8	1.4
15/01/1972	Precipitación	18.4	1.3
15/02/1972	Precipitación	20.2	1.6
15/03/1972	Precipitación	18.3	1.7
15/04/1972	Precipitación	19.7	1.3
15/05/1972	Precipitación	11.4	0.7
15/06/1972	Precipitación	17.0	0.9
15/07/1972	Precipitación	14.9	0.7
15/08/1972	Precipitación	14.5	0.7
15/09/1972	Precipitación	14.8	0.8
15/10/1972	Precipitación	13.8	0.8
15/11/1972	Precipitación	13.3	0.6
15/12/1972	Precipitación	11.7	0.6
15/03/1973	Precipitación	14.4	0.8
15/04/1973	Precipitación	15.2	1.4
15/05/1973	Precipitación	13.7	1.2
15/06/1973	Precipitación	12.3	0.8
15/07/1973	Precipitación	13.5	0.9
15/08/1973	Precipitación	16.4	1.1
15/09/1973	Precipitación	13.7	1.0
15/10/1973	Precipitación	12.2	0.9
15/11/1973	Precipitación	9.6	0.8
15/02/1974	Precipitación	13.4	1.0
15/04/1974	Precipitación	14.4	0.5
15/05/1974	Precipitación	13.3	0.5
15/06/1974	Precipitación	17.0	0.6
15/10/1974	Precipitación	13.8	0.6
15/11/1974	Precipitación	15.1	0.4
15/12/1974	Precipitación	12.7	0.5
15/02/1975	Precipitación	11.8	0.6
15/03/1975	Precipitación	12.7	0.5
15/04/1975	Precipitación	12.1	0.4
15/05/1975	Precipitación	11.4	0.4
15/06/1975	Precipitación	14.1	0.4
15/07/1975	Precipitación	14.7	0.6
15/08/1975	Precipitación	15.0	0.7
15/09/1975	Precipitación	12.1	0.5
15/10/1975	Precipitación	8.8	0.5
15/11/1975	Precipitación	9.8	0.6

<b>FECHA</b>	<b>TIPO DE MUESTRA</b>	<b>H3 UT</b>	<b>ERROR UT</b>
15/12/1975	Precipitación	10.5	0.5
15/01/1976	Precipitación	11.6	0.5
15/02/1976	Precipitación	11.7	0.4
15/03/1976	Precipitación	13.3	0.5
15/04/1976	Precipitación	10.9	1.0
15/05/1976	Precipitación	6.8	1.2
15/06/1976	Precipitación	11.6	1.0
15/07/1976	Precipitación	12.7	1.0
15/08/1976	Precipitación	12.8	1.0
15/09/1976	Precipitación	12.3	1.0
15/10/1976	Precipitación	11.8	1.0
15/11/1976	Precipitación	10.9	1.0
15/12/1976	Precipitación	10.0	1.0
15/01/1977	Precipitación	9.4	5.4
15/02/1977	Precipitación	13.2	1.0
15/03/1977	Precipitación	11.6	1.0
15/04/1977	Precipitación	12.9	1.0
15/05/1977	Precipitación	11.0	0.5
15/06/1977	Precipitación	10.4	5.1
15/07/1977	Precipitación	17.4	1.0
15/08/1977	Precipitación	13.1	3.2
15/07/1979	Precipitación	8.5	1.0
15/08/1979	Precipitación	8.3	1.0
15/09/1979	Precipitación	14.5	1.0
15/10/1979	Precipitación	9.1	1.0
15/11/1979	Precipitación	6.8	1.0
15/12/1979	Precipitación	8.4	1.0
15/01/1980	Precipitación	9.1	1.0
15/02/1980	Precipitación	7.6	1.0
15/03/1980	Precipitación	4.7	2.5
15/04/1980	Precipitación	5.8	1.0
15/05/1980	Precipitación	6.1	1.0
15/06/1980	Precipitación	5.4	1.0
15/08/1980	Precipitación	6.6	1.0
15/09/1980	Precipitación	7.4	1.0
15/10/1980	Precipitación	7.7	1.0
15/11/1980	Precipitación	6.3	1.0
15/12/1980	Precipitación	9.1	1.0
15/02/1981	Precipitación	2.0	1.0
15/03/1981	Precipitación	6.3	2.4
15/04/1981	Precipitación	4.9	1.0
15/05/1981	Precipitación	6.1	1.0
15/06/1981	Precipitación	6.2	1.0
15/07/1981	Precipitación	9.0	2.2

<b>ECHA</b>	<b>TIPO DE MUESTRA</b>	<b>H3 UT</b>	<b>ERROR UT</b>
15/08/1981	Precipitación	8.1	1.0
15/09/1981	Precipitación	6.2	1.0
15/10/1981	Precipitación	9.1	1.0
15/11/1981	Precipitación	4.3	1.0
15/01/1982	Precipitación	3.2	1.0
15/02/1982	Precipitación	12.7	2.7
15/03/1982	Precipitación	5.1	1.0
15/04/1982	Precipitación	4.5	1.0
15/05/1982	Precipitación	1.0	1.0
15/06/1982	Precipitación	7.6	2.7
15/07/1982	Precipitación	6.3	1.0
15/08/1982	Precipitación	6.0	1.0
15/09/1982	Precipitación	7.0	1.0
15/10/1982	Precipitación	6.7	1.0
15/11/1982	Precipitación	6.4	1.0
15/12/1982	Precipitación	6.1	1.0
15/01/1983	Precipitación	9.1	2.6
15/02/1983	Precipitación	5.2	1.0
15/04/1983	Precipitación	4.6	1.0
15/05/1983	Precipitación	4.1	1.0
15/06/1983	Precipitación	4.3	1.0
15/07/1983	Precipitación	4.6	1.0
15/08/1983	Precipitación	3.1	1.0
15/09/1983	Precipitación	6.3	1.0
15/10/1983	Precipitación	5.8	1.0
15/11/1983	Precipitación	6.5	1.0
15/12/1983	Precipitación	5.2	1.0
15/01/1984	Precipitación	5.2	1.0
15/02/1984	Precipitación	7.1	1.0
15/03/1984	Precipitación	5.5	1.0
15/04/1984	Precipitación	5.0	1.0
15/05/1984	Precipitación	14.0	1.0
15/06/1984	Precipitación	3.1	1.0
15/07/1984	Precipitación	3.0	2.5
15/08/1984	Precipitación	4.5	1.0
15/09/1984	Precipitación	4.2	1.0
15/10/1984	Precipitación	5.0	1.0
15/11/1984	Precipitación	4.1	1.0
15/12/1984	Precipitación	6.4	1.0
15/01/1985	Precipitación	0.6	3.3
15/02/1985	Precipitación	16.6	3.4
15/03/1985	Precipitación	5.1	1.0
15/04/1985	Precipitación	4.7	1.0
15/05/1985	Precipitación	6.8	3.3

<b>FECHA</b>	<b>TIPO DE MUESTRA</b>	<b>H3 UT</b>	<b>ERROR UT</b>
15/06/1985	Precipitación	4.0	2.1
15/07/1985	Precipitación	6.5	1.0
15/08/1985	Precipitación	4.7	1.0
15/09/1985	Precipitación	5.5	1.0
15/10/1985	Precipitación	9.2	0.8
15/11/1985	Precipitación	4.4	0.8
15/12/1985	Precipitación	6.1	1.5
15/01/1986	Precipitación	4.2	0.8
15/02/1986	Precipitación	4.1	0.8
15/03/1986	Precipitación	4.0	0.8
15/04/1986	Precipitación	4.5	0.8
15/05/1986	Precipitación	3.7	0.8
15/06/1986	Precipitación	4.0	0.8
15/07/1986	Precipitación	3.8	0.8
15/08/1986	Precipitación	3.1	0.8
15/09/1986	Precipitación	3.7	0.8
15/10/1986	Precipitación	3.6	0.8
15/11/1986	Precipitación	3.2	0.8
15/01/1987	Precipitación	4.2	0.8
15/02/1987	Precipitación	4.1	0.8
15/03/1987	Precipitación	4.6	0.8
15/04/1987	Precipitación	4.0	0.8
15/05/1987	Precipitación	4.1	0.9
15/06/1987	Precipitación	3.6	0.8
15/03/1988	Precipitación	2.4	0.2
15/04/1988	Precipitación	4.3	0.3
15/05/1988	Precipitación	5.1	0.4
15/06/1988	Precipitación	4.3	0.2
15/07/1988	Precipitación	5.2	0.4
15/08/1988	Precipitación	4.6	0.2
15/09/1988	Precipitación	5.2	0.3
15/10/1988	Precipitación	4.9	0.3
15/11/1988	Precipitación	5.0	0.3
15/12/1988	Precipitación	4.0	0.2
15/01/1989	Precipitación	1.8	0.2
15/02/1989	Precipitación	4.1	0.3
15/03/1989	Precipitación	4.6	0.3
15/04/1989	Precipitación	5.2	0.4
15/05/1989	Precipitación	4.1	0.2
15/06/1989	Precipitación	4.2	0.2
15/07/1989	Precipitación	3.7	0.2
15/08/1989	Precipitación	4.4	0.2
15/09/1989	Precipitación	5.0	0.3
15/10/1989	Precipitación	4.6	0.2

<b>FECHA</b>	<b>TIPO DE MUESTRA</b>	<b>H3 UT</b>	<b>ERROR UT</b>
15/11/1989	Precipitación	4.5	0.4
15/12/1989	Precipitación	4.0	0.2
15/01/1990	Precipitación	4.1	0.2
15/02/1990	Precipitación	3.7	0.3
15/03/1990	Precipitación	4.1	0.2
15/07/1998	Precipitación	2.7	0.3
15/08/1998	Precipitación	3.3	0.3
15/09/1998	Precipitación	3.6	0.3
15/10/1998	Precipitación	2.4	0.3
15/11/1998	Precipitación	2.6	0.3
15/12/1998	Precipitación	3.0	0.3
15/01/1999	Precipitación	2.7	0.3
15/02/1999	Precipitación	2.4	0.3
15/03/1999	Precipitación	2.1	0.3
15/04/1999	Precipitación	2.4	0.3
15/05/1999	Precipitación	3.0	0.3
15/06/1999	Precipitación	2.8	0.3
15/07/1999	Precipitación	1.7	0.3
15/08/1999	Precipitación	3.1	0.3
15/09/1999	Precipitación	2.8	0.3
15/10/1999	Precipitación	2.2	0.3
15/11/1999	Precipitación	2.3	0.3
15/12/1999	Precipitación	2.7	0.3
15/01/2000	Precipitación	2.2	0.3
15/04/2000	Precipitación	2.5	0.3
15/05/2000	Precipitación	2.2	0.3
15/06/2000	Precipitación	2.3	0.2
15/07/2000	Precipitación	2.4	0.3
15/08/2000	Precipitación	2.1	0.3
15/09/2000	Precipitación	2.5	0.3
15/10/2000	Precipitación	2.6	0.3
15/11/2000	Precipitación	2.6	0.3
15/12/2000	Precipitación	2.6	0.3
15/01/2001	Precipitación	2.1	0.2
15/02/2001	Precipitación	2.6	0.2
15/03/2001	Precipitación	2.0	0.2
15/04/2001	Precipitación	1.9	0.2
15/05/2001	Precipitación	1.7	0.2
15/06/2001	Precipitación	2.2	0.2
15/09/2001	Precipitación	2.8	0.2
15/10/2001	Precipitación	2.4	0.2
15/11/2001	Precipitación	2.3	0.3
15/12/2001	Precipitación	1.5	0.3
15/01/2002	Precipitación	2.3	0.3
15/02/2002	Precipitación	1.8	0.3
15/03/2002	Precipitación	1.8	0.3

**C. BASE DE DATOS ISOHIS PARA MARACAY,  
VENEZUELA.**

<b>FECHA</b>	<b>TIPO DE MUESTRA</b>	<b>H3 UT</b>	<b>ERROR UT</b>
15/04/1965	Precipitación	60.5	2.3
15/10/1967	Precipitación	20.7	2.0
15/04/1968	Precipitación	19.2	1.8
15/04/1969	Precipitación	20.0	2.3
15/07/1970	Precipitación	24.8	1.0
15/04/1971	Precipitación	9.0	0.4
15/01/1972	Precipitación	12.7	0.6
15/04/1973	Precipitación		3.6
15/05/1974	Precipitación	10.9	0.6
15/08/1975	Precipitación	11.4	0.6

**D. RESULTADOS DE LABORATORIO CEIAM ANALISIS DE  
CLORUROS**



OFICINA: CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - UIS	INFORME DE RESULTADOS	MAYO 13 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TITULO: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	

SOLICITANTE: Dra. ZULY GOMEZ  
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: AGUAS LLUVIA  
 FECHA DEL MUESTREO: ABRIL DE 2005  
 FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO: MAYO 5 DE 2005  
 MUESTRA TOMADA POR: TRAJIDA AL LABORATORIO  
 PARÁMETROS A EVALUAR: CLORUROS

REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA

PARAMETRO	UNIDADES	METODO	#1	#2	#3	#4	#5	#6
CLORUROS	mg/l Cl <sup>-</sup>	Potenciométrico	<0.02	<0.02	0.72	0.23	0.38	1.16

Nota: Limite de detección = 0.02mg/l Cl<sup>-</sup>

Realizado Por:

  
**YANETH QUINTERO LÓPEZ**  
 Directora Laboratorio CEIAM PQ 1744

Revisado por:

**DR. EDGAR FERNANDO CASTILLO M.**  
 Director CEIAM



OFICINA: CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - UIS	INFORME DE RESULTADOS	JUNIO 21 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TÍTULO: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	

**SOLICITANTE:** Dra. ZULY GOMEZ  
**DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:** AGUAS LLUVIA  
**FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO:** JUNIO 17 DE 2005  
**MUESTRA TOMADA POR:** TRAIDA AL LABORATORIO  
**PARÁMETROS A EVALUAR:** CLORUROS

**REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA**

PARAMETRO	UNIDADES	METODO	#1	#2	#3	#4	#5	#6
CLORUROS	mg/l Cl <sup>-</sup>	Potenciométrico	<0.02	0.26	<0.02	<0.02	0.97	1.23

Nota: L.D = 0.02mg/L Cl<sup>-</sup>

Realizó:

  
**YANETH QUINTERO LÓPEZ**  
 Directora Laboratorio CEIAM P.Q. 1744

Revisó y aprobó:

**EDGAR FERNANDO CASTILLO M.**  
 Director CEIAM



OFICINA: CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - UIS	INFORME DE RESULTADOS	JULIO 13 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TITULO: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	


SOLICITANTE: Dra. ZULY GOMEZ  
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: AGUA LLUVIA  
FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO: JUNIO 28 DE 2005  
MUESTRA TOMADA POR: TRAJIDA AL LABORATORIO  
PARÁMETROS A EVALUAR: CLORUROS

REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA

PARAMETRO	UNIDADES	METODO	#1	#2	#3	#4	#5
CLORUROS	mg/l Cl	Potenciométrico	1.36	10.72	23.75	20.47	23.89

Nota: L.D = 0.02mg/L Cl

Realizó:

  
YANETH QUINTERO LÓPEZ  
Directora Laboratorio CEIAM P.Q. 1744

Revisó y aprobó:

  
EDGAR FERNANDO CASTILLO M.  
Director CEIAM



OFICINA: CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - UIS	INFORME DE RESULTADOS	JULIO 15 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TITULO: ANÁLISIS FISIQUIMICO	


SOLICITANTE: Dra. ZULY GOMEZ  
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: AGUA LLUVIA  
FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO: JUNIO 11 DE 2005  
MUESTRA TOMADA POR: TRADA AL LABORATORIO  
PARÁMETROS A EVALUAR: CLORUROS

REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA

PARAMETRO	UNIDADES	METODO	#1	#2	#3	#4	#5	#6
CLORUROS	mg/l Cl	Potenciométrico	1.75	0.28	0.31	0.02	5.03	2.95

Nota: L.D = 0.02mg/L Cl

Realizó:

  
YANETH QUINTERO LÓPEZ  
Directora Laboratorio CEIAM P.Q. 1744

Revisó y aprobó:

  
EDGAR FERNANDO CASTILLO M.  
Director CEIAM



OFICINA CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - IBS	INFORME DE RESULTADOS	AGOSTO 26 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TÍTULO: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	

SOLICITANTE: Dra. ZULY GOMEZ  
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: AGUA LLUVIA  
 FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO: AGOSTO 10 DE 2005  
 MUESTRA TOMADA POR: TRAIDA AL LABORATORIO  
 PARÁMETROS A EVALUAR: CLORURO

REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA								
PARAMETRO	UNIDADES	METODO	#1	#2	#3	#4	#5	#6
CLORURO	mg/l Cl	Potenciométrico	0.52	0.25	0.12	0.57	0.93	<0.02

Nota: L.D = 0.02mg/L Cl

Realizó:

YANETH QUINTERO LÓPEZ  
 Directora Laboratorio CEIAM P.O. 1744

Revisó y aprobó:

EDGAR FERNANDO CASTILLO M.  
 Director CEIAM



OFICINA: CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - UIS	INFORME DE RESULTADOS	AGOSTO 26 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TÍTULO: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	

SOLICITANTE: Dra. ZULY GÓMEZ  
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: AGUA LLUVIA  
FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO: AGOSTO 22 DE 2005  
MUESTRA TOMADA POR: TRAIDA AL LABORATORIO  
PARÁMETROS A EVALUAR: CLORUROS

REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA

PARAMETRO	UNIDADES	METODO	#1	#2
CLORUROS	mg/l Cl	Potenciométrico	5.75	25.48

Nota: LD = 0.02mg/L Cl

Realizó:

YANETH QUINTERO LÓPEZ  
Directora Laboratorio CEIAM P.O. 1744

Revisó y aprobó:

EDGAR FERNANDO CASTILLO M.  
Director CEIAM



OFICINA: CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - UIS	INFORME DE RESULTADOS	OCTUBRE 07 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TÍTULO: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	

**SOLICITANTE:** Dra. ZULY GOMEZ  
**DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:** AGUA LLUVIA  
**FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO:** SEPTIEMBRE DE 2005  
**MUESTRA TOMADA POR:** TRAIDA AL LABORATORIO  
**PARÁMETROS A EVALUAR:** CLORUROS

**REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA**

PARAMETRO	UNIDADES	METODO	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
CLORUROS	mg/l Cl <sup>-</sup>	Potenciométrico	1.13	0.05	<0.02	1.06	5.25	<0.02	<0.02

Nota: L.D. = 0.02mg/l Cl<sup>-</sup>

Realizó:

**YANETH QUINTERO LÓPEZ**  
Directora Laboratorio CEIAM P.Q. 1744

Revisó y aprobó:

**EDGAR FERNANDO CASTILLO M.**  
Director CEIAM



OFICINA: CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CEIAM) - UIS	INFORME DE RESULTADOS	OCTUBRE 0 DE 2005
REALIZADO POR:  Qca. Esp. Qca ambiental YANETH QUINTERO LÓPEZ	TÍTULO: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	

SOLICITANTE: Dra. ZULY GOMEZ  
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: AGUA LLUVIA  
 FECHA DE RECEPCIÓN AL LABORATORIO: OCTUBRE 05 DE 2005  
 MUESTRA TOMADA POR: TRAIDA AL LABORATORIO  
 PARÁMETROS A EVALUAR: CLORUROS

#### REPORTE LABORATORIO AGUA LLUVIA

PARAMETRO	UNIDADES	MÉTODO	#1	#2	#3	#4	#5	#6
CLORUROS	mg/l Cl <sup>-</sup>	Potenciométrico	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	2.91	<0.02

Nota: L.D = 0.02mg/L Cl<sup>-</sup>

Realizó:

YANETH QUINTERO LÓPEZ  
 Directora Laboratorio CEIAM P.Q. 1744

Revisó y aprobó:

EDGAR FERNANDO CASTILLO M.  
 Director CEIAM