

CARACTERIZACION FISICO-QUIMICA Y MICROBIOLOGICA PARA AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN ZONA DE INFLUENCIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA E IMPLEMENTACION DE LOS METODOS
DE ANÁLISIS PARA ARSÉNICO, SELENIO Y FLUOR

INGRID CRISTINA CACUA P.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA

2004

CARACTERIZACION FISICO-QUIMICA Y MICROBIOLOGICA PARA AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN ZONA DE INFLUENCIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA E IMPLEMENTACION DE LOS METODOS
DE ANÁLISIS PARA ARSÉNICO, SELENIO Y FLUOR

INGRID CRISTINA CACUA P.

Trabajo de grado presentado
como requisito parcial para optar al
Título de Química

Directora
Luz Yolanda Vargas Fiallo
Química

Codirector
Carlos Parra
Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA

2004

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a DIOS, por que me ha dado lo mas importante la VIDA, por que me guió siempre en este largo camino.

A mi madre MARGARITA PEREZ, por ser el impulso de mi vida, por su apoyo incondicional y su educación.

A mi padre LUIS ALBERTO CACUA, por enseñarme a vivir, por su gran experiencia, que ha sido para mi de gran sabiduría.

A mis hermanos JOSE LUIS, CYRIS, JENNY, ZULMA y MARGARET, quienes con su apoyo me ayudaron y me soportaron en momentos difíciles.

A mis amigos y compañeros.

Y en especial a mi GORDO.

AGRADECIMIENTOS

Al ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA, quienes me dieron la oportunidad de vivir esta experiencia profesional de mi vida.

A CARLOS PARRA, a la Dr. CONSUELO ALMEIDA ORDÓÑEZ, LEONOR CHACON, por su amistad y por enseñanzas que me aportaron en este proyecto.

A LUZ YOLANDA VARGAS FIALLO, por sus enseñanzas, paciencia y dirección para realizar este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por entregarme el conocimiento, la sabiduría.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	3
1.1 AGUAS SUBTERRÁNEAS	3
• El Agua Subterránea en el planeta	5
• Localización del Agua Subterráneas	5
• Diferencias entre el Agua Subterránea y Agua Superficial	6
1.2 EXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN COLOMBIA	7
1.2.1 Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá	7
1.2.2 Programa de Explotación de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Bucaramanga.	9
1.3 CALIDAD DEL AGUA	11
1.3.1 Actividades Contaminantes	13
1.4 EFECTOS EN LA SALUD POR CONTAMINANTES EN AGUA SUBTERRÁNEA	14
1.5 QUIMICA DE AGUA NATURAL	20
1.6 MICROBIOLOGIA DE AGUA NATURAL	21
1.7 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA	22
1.8 ESPECTROMETRIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	23
1.8.1 Generador de Hidruros	23
1.9 POTENCIOMETRIA	24
1.9.1 Ion Selectivo para Fluor	24
1.10 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
1.10.1 Exactitud	27
1.10.2 Precisión	27
1.10.3 Límite de Detección	28
1.10.4 Límite de Cuantificación	29
1.10.5 Linealidad	29

1.10.6 Sensibilidad del Método	29
1.10.7 Recuperación	29
2. METODOLOGÍA	30
2.1 MATERIALES	30
2.2 IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS ANALÍTICAS	30
2.2.1 Absorción Atómica con Generador de Hidruros	30
2.2.2 Potenciometría por Ion Selectivo	32
2.2.3 Análisis Estadístico	33
2.3 RECOLECCION Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS	36
2.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA	38
2.4.1 pH	38
2.4.2 Conductividad	39
2.4.3 Turbiedad	39
2.4.4 Color Verdadero	40
2.4.5 Cloruros	40
2.4.6 Sulfatos	41
2.4.7 Alcalinidad	41
2.4.8 Dureza Total	42
2.4.9 Sólidos Suspendidos	42
2.4.10 Sólidos Totales	43
2.4.11 Sólidos Disueltos	43
2.4.12 Nitratos	43
2.4.13 Nitritos	43
2.4.14 Fluoruros	44
2.4.15 Metales Pesados	44
2.4.16 Fenoles, BTEX's y Plaguicidas	46
2.5 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA	46
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	48
3.1 IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS	48
3.1.1 Arsénico	48
3.1.2 Selenio	55

3.1.3 Fluoruro	62
3.2 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS	65
3.2.1 Pozo en el Sector de Llano Grande	65
3.2.2 Pozo en el Sector de Bucarica	67
4. CONCLUSIONES	70
5. RECOMENDACIONES	72
6. BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	78

LISTA DE TABLAS

		Pag.
Tabla 1.	Porcentajes de las Distintas Cantidades de Agua en el Planeta	5
Tabla 2.	Cuadro de Explotación de Pozos en Colombia	8
Tabla 3.	Parámetros físico-químicos de potabilidad.	15
Tabla 4.	Elementos Analizados por Generador de Hidruros.	23
Tabla 5.	Valores teóricos de pendiente vs temperatura.	26
Tabla 6.	Parámetros de Operación MHS-10 para Arsénico.	31
Tabla 7.	Parámetros de Operación MHS-10 para Selenio.	31
Tabla 8.	Características Pozos Perforados.	36
Tabla 9.	Preservación de Muestras.	37
Tabla 10.	Parámetros Instrumentales para determinar Metales.	44
Tabla 11.	Parámetros Instrumentales para Mercurio.	45
Tabla 12.	Disposición de tubos de Fluorocult y peptona.	46
Tabla 13.	Datos de Concentración As ($\mu\text{g/L}$) y Absorbancia.	48
Tabla 14.	Datos de arsénico para la gráfica de Ringbom.	49
Tabla 15.	Datos para la curva de trabajo de arsénico.	50
Tabla 16.	Limite de Detección para Arsénico.	52
Tabla 17.	Datos de Absorbancia de patrones de $10\mu\text{g/L}$ As	53
Tabla 18.	Datos de patrón certificado para arsénico	55
Tabla 19.	Datos de Concentración Se ($\mu\text{g/L}$) y Absorbancia	56
Tabla 20.	Datos de para la gráfica de Ringbom para Selenio	57
Tabla 21.	Datos para la curva de trabajo para Selenio	58
Tabla 22.	Limite de Detección para Selenio	59
Tabla 23.	Datos de Absorbancias de patrones de $10\mu\text{g/L}$ Se	60
Tabla 24.	Datos de patrón certificado para Selenio	62
Tabla 25.	Datos de Concentración y milivoltios para Fluoruros	63
Tabla 26.	Datos para medir la Recuperación para Fluoruros	64
Tabla 27.	Resultados análisis físico-químico y microbiológico pozo Llano Grande.	66
Tabla 28.	Resultados de análisis físico-químico y microbiológico pozo Bucarica.	68

LISTA DE FIGURAS

		Pag.
Figura 1.	Ciclo Hidrológico	3
Figura 2.	Sondeo Eléctrico Vertical	10
Figura 3.	Tomografía del Parque San Pío	10
Figura 4.	Proceso de Reducción	23
Figura 5.	Espectrofotómetro de absorción atómica generador de hidruros	30
Figura 6.	Electrodo de Ion Selectivo para Fluor	32
Figura 7.	pHmetro Mettler MP-220	38
Figura 8.	Conductímetro Multinile P4	39
Figura 9.	Turbidímetro Digital Hach 2100N	39
Figura 10.	Espectrofotómetro Hach DR 2000	40
Figura 11.	Titulador Automático Metrohm modelo 702	41
Figura 12.	Curva de Calibración para Arsénico	49
Figura 13.	Curva de Ringbom para Arsénico	50
Figura 14.	Curva de Trabajo para Arsénico.	51
Figura 15.	Curva de Calibración para Selenio	56
Figura 16.	Curva de Ringbom para Selenio	57
Figura 17.	Curva de Trabajo para Selenio	58
Figura 18.	Curva de Calibración para Fluoruro	63

ANEXOS

- Anexo A.** Relación de pozos profundos construidos.
- Anexo B.** Mapa. Localización de la Información Hidrogeológica Analizada de Bucaramanga.
- Anexo C.** Tabla de resultados en la determinación por SPME/HRGC-MSD/SIM de fenoles en la *Muestra de agua subterránea - Pozo de Bucarica*.
- Anexo D.** Cromatogramas de corrientes iónicas de los extractos obtenidos por SPME (PA-85 μ m) de la muestra de agua subterránea – Pozo Bucarica y agua, analizados por HRGC-MSD/SIM.
- Anexo E.** Tabla de resultados en la determinación por SPME/HRGC-MSD/SIM de fenoles en la *Muestra de agua subterránea - Pozo de Llano Grande.*.
- Anexo F.** Cromatogramas de corrientes iónicas de los extractos obtenidos por SPME (PA-85 μ m) de la muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande y agua, analizados por HRGC-MSD/SIM.
- Anexo G.** Tabla de resultados en la determinación por S-HS/HRG/FID de BTEX's en una muestra de agua identificada como "Muestra de agua subterránea – Pozo Bucarica", enviada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- Anexo H.** Cromatogramas obtenidos por S-HS/HRGC/FID de la muestra de agua subterránea – Pozo Bucarica (por duplicado) y un patrón de 5 ppb.
- Anexo I.** Tabla de resultados en la determinación por S-HS/HRG/FID de BTEX's en una muestra de agua identificada como "Muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande", enviada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

- Anexo J.** Cromatogramas obtenidos por S-HS/HRGC/FID de la muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande (por duplicado) y un patrón de 5 ppb.
- Anexo K.** Tabla de resultados en la cuantificación de pesticidas organoclorados presentes en la “Muestra de agua subterránea – Pozo Bucarica”.
- Anexo L.** Cromatogramas del extracto analizado por HRGC/ μ -ECD de la muestra de agua pozo Bucarica, obtenido por extracción líquido-líquido continua, así como la mezcla de patrón de pesticidas organoclorados.
- Anexo M.** Tabla de resultados en la cuantificación de pesticidas organoclorados presentes en la “Muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande”.
- Anexo N.** Cromatogramas del extracto analizado por HRGC/ μ -ECD de la muestra de agua pozo Llano Grande, obtenido por extracción líquido-líquido continua, así como la mezcla de patrón de pesticidas organoclorados.
- Anexo O.** Tabla de resultados en la cuantificación de pesticidas organofosforados presentes en la “Muestra de agua subterránea – Pozo Bucarica”.
- Anexo P.** Cromatogramas del extracto analizado por HRGC/NPD de la muestra de agua pozo Bucarica, obtenido por extracción líquido-líquido continua, así como la mezcla de patrón de pesticidas organofosforados.
- Anexo Q.** Tabla de resultados en la cuantificación de pesticidas organofosforados presentes en la “Muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande”.
- Anexo R.** Cromatogramas del extracto analizado por HRGC/NPD de la muestra de agua pozo Llano Grande, obtenido por extracción líquido-líquido continua, así como la mezcla de patrón de pesticidas organofosforados.

RESUMEN

TITULO

CARACTERIZACION FISICO-QUIMICA Y MICROBIOLOGICA PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONA DE INFLUENCIA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA E IMPLEMENTACION DE LOS METODOS DE ANÁLISIS PARA ARSÉNICO, SELENIO Y FLUOR*

AUTOR

Cacua P., Ingrid Cristina.**

PALABRAS CLAVES

Agua subterráneas, generador de hidruros, Ion selectivo.

DESCRIPCIÓN

El agua subterránea reviste una importancia fundamental en el suministro de agua potable, debido a que aporta el 0.62% del agua total sobre el planeta.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, ha desarrollado un proyecto de nuevos fuentes de abastecimientos que comprende básicamente la utilización de agua proveniente de pozos subterráneos.

Este proyecto tiene como objetivo hacer una evaluación preliminar de la calidad del agua en dos pozos subterráneos, ubicados en el área metropolitana de Bucaramanga.

El estudio de las aguas subterráneas se llevo a cabo en el laboratorio de control de calidad del acueducto, en donde se realizaron los análisis físico-químicos como pH, alcalinidad, dureza, color, turbiedad, sulfatos, metales pesados etc. y los análisis microbiológicos donde se estudio la cantidad de coliformes fecales y totales. Este estudio se realizó de acuerdo a los decretos 1594 de 1984 y al decreto 475 de 1998.

También se implementaron técnicas analíticas, de gran interés, para la determinación de arsénico, selenio y fluoruros, utilizando el método de absorción atómica con generador de hidruros y el método potenciométrico de Ion selectivo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Luz Yolanda Vargas F.

ABSTRACT

TITLE

PHYSICAL-CHEMISTRY AND MICROBIOLOGY CHARACTERIZATION FOR GROUNDWATERS IN AREA OF IT INFLUENCES OF THE METROPOLITAN AQUEDUCT OF BUCARAMANGA AND IMPLEMENTATION OF METHODS OF ANALYSIS FOR ARSENIC, SELENIUM AND FLUORINE*

AUTHOR

Cacua P., Ingrid Cristina**

KEY WORDS

Groundwater, hydride generation, specific ion.

DESCRIPTION

The groundwater had a fundamental importance in the supply of drinkable water, because it contributes 0.62% of the total water on the planet.

The Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga, it has developed a project of new sources of supplies that she/he understands the use of water coming from underground wells basically.

This project has as objective to make a preliminary evaluation of the quality of the water in two underground wells, located in the metropolitan area of Bucaramanga.

The study of the underground waters you carries out in the laboratory of control of quality of the aqueduct where you/they were carried out the physical-chemical analyses as pH, alkalinity, hardness, color, turbidity, sulfates, metals heavy etc. and the analysis microbiologic where you study the quantity of fecal and total coliformes. This study was carried out according to the ordinances 1594 of 1984 and to the ordinance 475 of 1998.

They were also implemented technical analytic, of great interest, for the arsenic determination, selenium and fluorides, using the method of atomic absorption with hydride generator and the method potential metric of selective ion.

* Work of Degree

** Faculty of Sciences. School of Chemistry. Luz Yolanda Vargas F.

INTRODUCCION

Cada año caen aproximadamente 110 billones de metros cúbicos (m³) de agua en forma de precipitaciones pluviales sobre los continentes del globo terráqueo. La población del planeta se estima en 5.700 millones de habitantes, lo que significa que cada uno recibe en promedio cerca de 53.000 litros, o 53 toneladas, de agua dulce por día, y esto sin considerar el agua que cae en forma de lluvia o nieve en los océanos. Ciertamente, el agua debería alcanzar para todos.

Sin embargo, a pesar de esta aparente abundancia de agua, a diario mueren miles de personas por enfermedades asociadas con esquemas inadecuados de abastecimiento de agua limpia. Una solución que el hombre ha aplicado a estos problemas ha sido levantar sus asentamientos cerca de fuentes confiables de agua.

En Bucaramanga el acueducto, tiene una capacidad mínima instalada de Abastecimiento de 3700 lps. para una confiabilidad del 100% de suministro al sistema actual del Área Metropolitana de Bucaramanga, que de acuerdo a los estudios de crecimiento de la población y de la demanda, la prestación del servicio esta garantizado hasta año 2005.

A partir del año 2005 y con un horizonte al año 2025, la proyección de la población para el Área Metropolitana de Bucaramanga, Piedecuesta, Floridablanca y Girón se acerca al 1.600.000 habitantes, para una demanda adicional de 3000 lps. que serán suministrados por el Proyecto de Nuevos Abastecimientos que comprende, entre otras alternativas, las aguas provenientes pozos subterráneas, utilizados principalmente en épocas de invierno.

En este texto, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, teniendo en cuenta los principios de protección, conservación y renovación del medio ambiente, esta desarrollando el *“Proyecto de Explotación de Aguas Subterráneas”*.

Este proyecto tiene como objetivo hacer una evaluación preliminar de la calidad del agua subterránea. La caracterización se llevo a cabo en el laboratorio de control de calidad el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, en donde además se implementaron técnicas analíticas, de gran interés, para la determinación de arsénico, selenio y fluoruros.

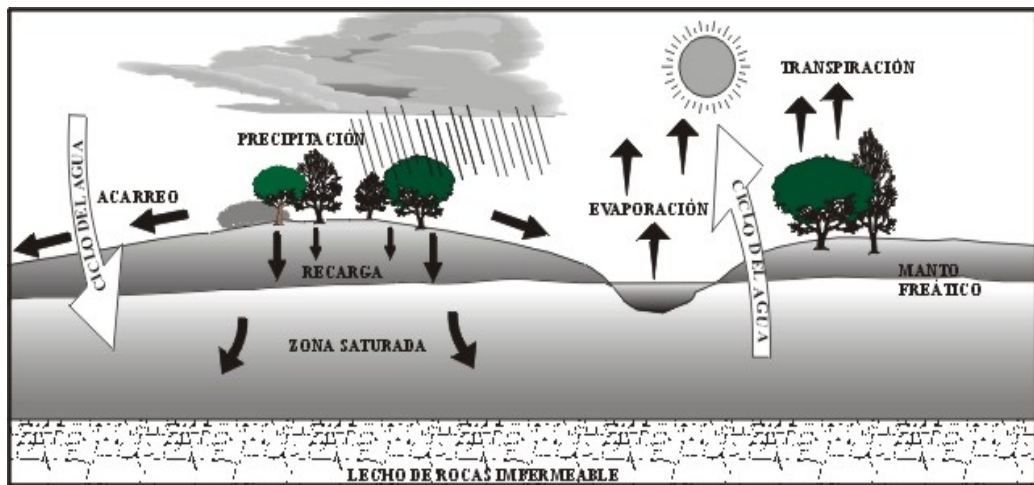
1. FUNDAMENTO TEORICO

1.1 AGUAS SUBTERRÁNEAS

El agua subterránea se encuentra bajo la superficie terrestre, en el interior de poros entre partículas sedimentarias y en las fisuras de las rocas más sólidas. En las regiones árticas el agua subterránea puede helarse. En general mantiene una temperatura muy similar al promedio anual en la zona.

Para que el agua de infiltración pueda penetrar en las rocas y circular por ellas, es necesario que éstas sean porosas y que los poros se comuniquen entre sí o que estén fracturadas, fisuradas o trituradas. La permeabilidad de una roca es su capacidad para transmitir los fluidos. La arcilla puede tener una porosidad tan elevada como la arena, pero su permeabilidad es prácticamente nula, ya que los huecos están interconectados.

Figura 1. Ciclo Hidrológico



La movilidad del agua subterránea depende del tipo de rocas subterráneas en cada lugar dado. Las capas permeables saturadas capaces de aportar un suministro útil de agua son conocidas como acuíferos. Suelen estar formadas por arenas, gravas, calizas o basaltos.

Otras capas, como las arcillas, pizarras, morrenas glaciales y limos tienden a reducir el flujo del agua subterránea. Las rocas impermeables son llamadas acuífugas, como las margas, pizarras y arcillas.^[15-41]

El agua subterránea es parte integral del ciclo del agua, (ver figura 1). El ciclo empieza con la precipitación sobre la superficie. Los *escurrimientos* de la lluvia van directamente a los lagos y arroyos. Un porcentaje del agua que se filtra en la tierra es usada por las plantas para la *transpiración*. El agua restante, llamada *agua de recarga*, es llevada a través del suelo a la *zona saturada*, donde el agua llena todos los espacios entre las partículas del suelo y las rocas.

Lo más alto de la zona saturada es la capa o manto freático, que es el nivel al cual el agua se mantiene en un pozo. El agua se mueve dentro de la zona saturada desde áreas donde la capa de agua es alta hacia áreas donde es baja, por lo que el agua subterránea se transforma en lagos, arroyos u océanos. Las corrientes salen del subsuelo y forman el *agua superficial*. Cuando se *evapora* sale a la atmósfera, se condensa, y viene la *precipitación* completando el ciclo del agua.^[45]

El agua subterránea es un recurso valioso que se encuentran en el subsuelo de la mayor parte del planeta. Debido a su disponibilidad y buena calidad, en general, el agua subterránea es usada ampliamente para uso doméstico y otros propósitos.

El agua subterránea es considerada frecuentemente una fuente inagotable, pero recientemente las circunstancias indican que el agua subterránea es muy vulnerable a la contaminación y a su desaparición.^[7-45]

- **El Agua Subterránea en el Planeta**

A nivel mundial se cuenta con una cantidad total de aproximadamente $1.380.000 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ de agua. El agua subterránea representa solamente una fracción ($7.000 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ aproximadamente) del agua total.

Tabla 1. Porcentajes de las distintas cantidades de agua en el planeta

Tipo de Agua	% Agua Tierra
Agua Superficial	0,0171
Lagos de Agua dulce	0,0090
Lagos de agua salada y mares interiores	0,0080
Agua de ríos y canales	0,0001
Agua Subterráneas	0,6250
Aguas vadosas (incluye la humedad del suelo)	0,0050
Agua subterránea almacenada hasta una profundidad de 1 Km (algunas de esta agua son saladas)	0,330
Agua subterránea mas profunda (muy salada e im potable)	0,290
Otras Aguas	99,351
Océanos	97,2
Glaciales y casquetas polares*	2,15
Atmósfera	0,001

* Antártica 86% (1,85 agua total), Ártica 13%, otros glaciales 1%
 Fuente: Michael Price. Agua Subterránea. 2003

En realidad el ciclo de agua incluye la transferencia entre diversos depósitos temporales. El océano es el mayor receptor, pero las moléculas de agua pueden residir mucho tiempo en témpanos de hielo o en los espacios porosos de las rocas. La atmósfera y los ríos contienen una mínima porción de los recursos de agua existentes, pero no debe olvidarse que su tránsito es indispensable para el mantenimiento de la vida. ^[17]

- **Localización del Agua Subterránea.** El agua puede ser encontrada debajo de la tierra casi en cualquier sitio. Cerca del 97 por ciento del agua dulce del mundo es agua subterránea. La calidad y cantidad del agua subterránea disponible varía de sitio a sitio. Las reservas mayores de agua subterránea son llamadas acuíferos.

Los acuíferos ocurren en dos tipos de formaciones geológicas. Las *formaciones consolidadas* son aquellas compuestas de rocas sólidas, donde el agua subterránea se encuentra en las grietas que estas poseen. La cantidad de agua en una formación consolidada depende de la cantidad de grietas que existen y del tamaño éstas. Por ejemplo, las formaciones calizas frecuentemente contienen cavernas con mucha agua en su interior.

Las *formaciones no consolidadas* están compuestas de arena, grava, piedras, tierra suelta o material de suelos. La cantidad de agua subterránea en una formación consolidada varía en dependencia de la compactación del material sólido y la finura de sus granos. Las formaciones de arena, grava, y piedras generalmente producen acuíferos de gran capacidad, sin embargo, los suelos formados por partículas muy finas suelen tener bajas cantidades de agua. El agua subterránea puede salir espontáneamente formando manantiales o puede ser extraída a través de un pozo. Un manantial ocurre cuando la capa de agua alcanza la superficie de la tierra.^[7]

- **Diferencias entre el Agua Subterránea y Agua Superficial.** La mayoría de las personas está más familiarizada con el agua superficial que con el agua subterránea. Los depósitos de agua superficial como lagos, arroyos y mares pueden ser vistos en los alrededores, pero no los depósitos de agua subterránea. Existen algunas diferencias entre el agua subterránea y el agua superficial que vale la pena resaltar.

El agua subterránea usualmente se mueve mucho más lentamente que el agua superficial. El agua en un arroyo puede moverse a varios pies por minuto, mientras que el agua subterránea puede moverse sólo a varios pies por mes. Esto es debido a que el agua subterránea encuentra una fricción o resistencia mayor al moverse a través de los espacios pequeños de las rocas y del suelo. Existen excepciones a esta regla, un ejemplo son los ríos subterráneos en cavernas de roca caliza donde el agua puede moverse relativamente más rápidamente.^[3]

1.2 EXPLOTACION DE AGUA SUBTERRÁNEA EN COLOMBIA

En Colombia la explotación del agua subterránea se ha dejado a un lado por las fuentes de agua superficial. La visión global de la distribución regional del agua subterránea en

Colombia, la determinan las áreas potencialmente acuíferas y la caracterización regional de la calidad química del agua.

Los estudios hidrológicos en el país no abarcan mas del 15% del total del área con posibilidad de explotación de agua subterránea (414.375 km²), con unas reservas estimadas totales 140.875 km², equivalentes a cerca del 70 veces el total de aguas superficiales en el país, estimada en 2.097 km³.

Las áreas con mayor explotación y estudio regionales corresponden a la Media Guajira, Cundinamarca y el Valle del Cauca, seguido por Cesar, Norte de Santander, Tolima, Córdoba, Magdalena, Sucre, Atlántico y Boyacá. En menor proporción se encuentra en San Andrés y en el piedemonte Llanero (ver tabla 2).

En general, en Colombia se extrae agua subterránea de depósitos recientes y de unidades sedimentarias terciarias y cretácicas mediante pozos, con profundidades que varían entre 50 – 300 m.^[12]

1.2.1 Agua subterránea en la Sabana de Bogotá. Las aguas subterráneas en Bogotá y sus alrededores se han explotado parcialmente y por lo general en capas acuíferas de la llamada formación Sabana de edad cuaternaria. Las formaciones rocosas que circundan la Sabana son predominantemente areniscosas y arcillosas y muy diaclasadas, con rellenos y cementaciones silíceas y ferruginosas (hidróxido de hierro).

La calidad química del agua subterránea de la Sabana de Bogotá contiene, excesiva cantidad de hierro, no son potables y requieren para su uso, y aun para fines industriales, un tratamiento previo.^[12-14]

Tabla 2. Cuadro de Explotación de Pozos en Colombia

Zona	Área km ²	Tipo de Acuífero	Número de Pozos	Caudales Lps	Profundidad Pozos (m)	Usos	Calidad del agua
Media Guajira	3.200	Confinado-semiconfinado	1.000-5.000	40	60-240	Abastecimiento publico y domestico.	Salobre, dura
Cuenca río Cesar	30.000	Libre	501-1.000	50	40-120	Abastecimiento domestico, irrigación, ganadería y uso industrial.	Dulce, moderadamente dura
Valle inferior Magdalena	32.000	Libre	51-500	80	50-150	Abastecimiento publico, y domestico, irrigación.	Moderadamente dulce y dura
Cuenca río Sinú	25.000	Semiconfinado-libre	51-500	15-50	60-250	Abastecimiento publico y domestico, irrigación.	Dulce y dura
Canal Dique	6.500	Confinado-libre	51-500	50	100-200	Abastecimiento publico, uso industrial, irrigación y ganadería	Moderadamente dulce
Atrato-San Juan	29.250	Libre	<50	30	50-100	Abastecimiento publico y domestico, uso industrial.	Moderadamente dura
Valle alto Magdalena	10.000	Semiconfinado-libre	51-500	80	60-120	Abastecimiento publico y domestico, irrigación, industrial,	Dulce, moderadamente dura
Cuenca río Cauca	4.600	Semiconfinado-libre	1.001-5.000	30-130	100-200	Abastecimiento publico y domestico, irrigación, agro-industria, uso industrial.	Dulce, dura
Valle medio Magdalena	26.000	Semiconfinado	<50	15	60-140	Abastecimiento publico	Dulce, moderadamente dura
Cuenca río Patía	12.000	Libre	<50	15-30	50-80	Abastecimiento publico y domestico.	Moderadamente dulce, dura
Cuenca río Tachirá	3.500	Libre-confinado	50-500	30	50-120	Abastecimiento publico.	Moderadamente dulce, dura
Sabana de Bogota	4.300	Libre-confinado	>5.000	80	50-500	Abastecimiento domestico, irrigación, uso industrial.	Dulce, dura
Altiplano Cundiboyacense	76.000	Libre-confinado	500-1.000	30	100-250	Abastecimiento publico y domestico, irrigación, industria	Dulce, moderadamente dura
Piedemonte Llanero	152.000	Libre-confinado	<50	80	50-200		Dulce, moderadamente dura
San Andres	25	Confinado	<50	10	50-80	Abastecimiento publico y domestico.	Dulce, salobre

Fuente: Marín, Ingeominas 1998.

1.2.2 Programa de Explotación de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Bucaramanga. El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, ha venido trabajando en el “Programa de Exploración de Aguas Subterráneas” con diferentes actividades encaminadas a investigar la posibilidad de utilizar otras alternativas de emergencia para garantizar el suministro de agua para consumo humano en los próximos años.

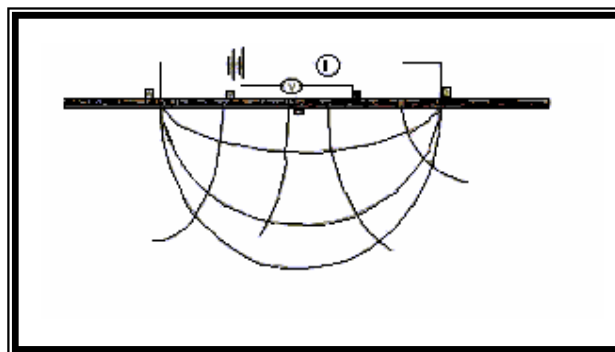
Dentro del Programa mencionado se precisó el Modelo Hidrogeológico de la Depresión Geológica de Bucaramanga, para el cual se realizó los siguientes estudios:

- Caracterización Geofísica y Geológica del Macizo de Santander al oriente de la Falla Bucaramanga-Santa Marta y la depresión Geológica de Bucaramanga, estudios a cargo de los investigadores: Ing. Sully Gómez y Ing. Jorge Zambrano, de la Universidad Industrial de Santander, y pertenecientes al Grupo de Modelamiento Hidroclimático.

Se realizó un inventario de pozos profundos construidos en el área Metropolitana de Bucaramanga, para tener una idea global de las áreas de explotación. (Anexo A)

- Asesoría Geotécnica y Calibración del Modelo Hidrogeológico de Bucaramanga, a cargo del Ingeniero Jaime Suárez Díaz, de la firma Ingeniería de Suelos Ltda.
- Sondeos Eléctricos Verticales, permiten determinar la profundidad promedio de investigación aproximadamente a 300 m, para evaluar las posibilidades acuíferas en la zona de la ciudad de Bucaramanga.

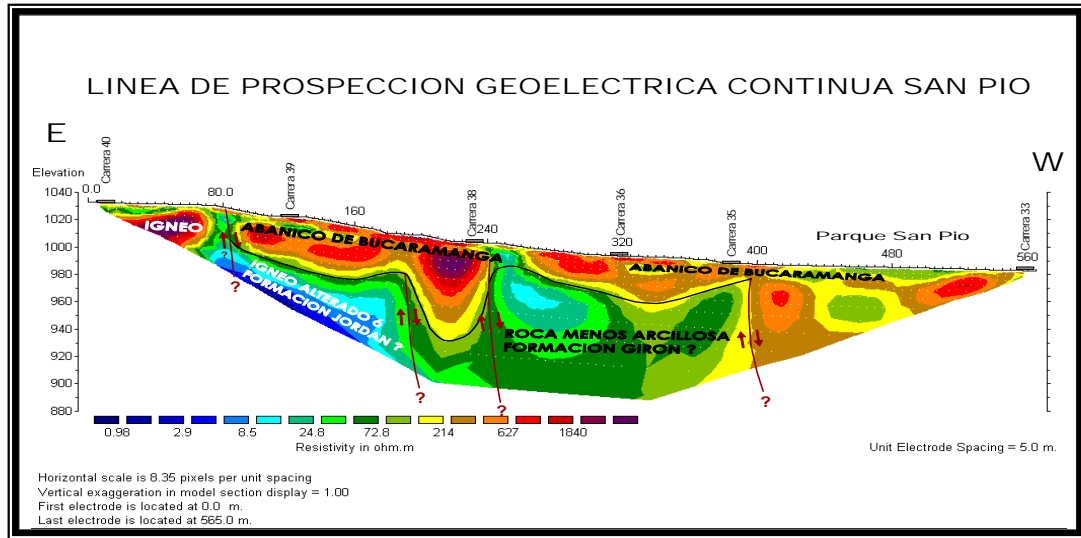
Figura 2. Sondeo Eléctrico Vertical



- Prospección Geofísica de la Depresión Geológica de Bucaramanga con la realización de Geoelectrónica continua (Tomografía 2D, dos dimensiones, que es la prospección geofísica más útil para evaluar a lo largo de una línea de investigación predeterminada las condiciones

y características de las diferentes capas que conforman el subsuelo), realizado por el Ingeniero Carlos Molano de la firma Hidrogeología de Colombia.^[34-12]

Figura 3. Tomografía de Parque San Pio



- En septiembre de 2003, se iniciaron las perforaciones exploratorias de cuatro pozos con profundidad de 250 metros aproximadamente, con un diámetro de 4 pulgadas (10 centímetros) y ampliaciones hasta 12 pulgadas (30 centímetros).

Producto del trabajo de campo se inició la exploración del subsuelo, en 4 sectores del Área Metropolitana.^[34]

- Parque San Pío.
- Sector Bucarica en Floridablanca.
- Parque Industrial (Chimitá).
- Sector Llano Grande en Girón.

En el Anexo B, se adjunta mapa en donde se en marca el área Metropolitana de Bucaramanga, localizando los pozos construidos mencionados en el anexo 1, los sondeos eléctricos verticales realizados para el estudio y la ubicación de los cuatro sectores de perforación.

De acuerdo con los resultados que se obtengan en esta fase exploratoria, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, tomará decisiones de explotación del recurso hídrico del

subsuelo e instalará piezómetros o pozos de observación que permitan obtener información adicional sobre el comportamiento de los niveles de agua en el subsuelo.

Los anteriores 4 sectores podrán ser complementados con otras perforaciones exploratorias en otras zonas inicialmente contempladas, lo que depende de las condiciones encontradas en los trabajos que se vayan realizando.^[34]

1.3 CALIDAD DEL AGUA

En general las aguas subterráneas son de buena calidad natural para el consumo humano y la contaminación de éstas, esta dada por la actividad directa del hombre.

La contaminación de los acuíferos puede deberse a varios factores. Pueden ser urbanos, por las aguas residuales de origen doméstico y desechos sólidos, también por materia orgánica y compuestos nitrogenados.

Si estos compuestos se infiltran en el subsuelo, llegando hasta el acuífero pueden originar contaminación del tipo bacterial y viral que ocasionan diarrea, tifoidea y hepatitis; o también con detergentes, desinfectantes y nitratos, transformando al agua subterránea en no potable.

Otro tipo de contaminación es la derivada de la actividad industrial, a través de los efluentes líquidos con altos compuestos orgánicos y metales pesados. Si estos efluentes no son tratados adecuadamente para reducir su efecto al ser depositados en un ambiente determinado, por infiltración o lixiviación van a llegar a las aguas subterráneas contaminándolas. También de importancia es la derivada de la producción agrícola, por un lado por encontrarse en una zona de recarga de acuíferos y otra por el uso de fertilizantes químicos y pesticidas. Sumado a la descarga de efluentes que provienen de la cría de ganado, produciendo una contaminación orgánica del agua subterránea.^[21-16]

El riesgo de contaminación de un acuífero viene dado por la vulnerabilidad del acuífero y el tipo de contaminante y la forma de depositarlo en el suelo. La vulnerabilidad de un acuífero es el grupo de características que determinan cuanto podrá ser afectado el acuífero por la disposición de un determinado contaminante. Esto juega un papel importante en acuíferos libres, condicionados por la profundidad de la capa freática, el tipo de porosidad del acuífero

y el material que lo constituye. Antes de que los contaminantes lleguen al acuífero, deben atravesar la zona no saturada o zona de aireación.

Esta zona no saturada es importante ya que la infiltración de los desechos contaminantes es un proceso lento, permitiendo que se produzcan reacciones físico-químicas que dan como resultado la retención de los mismos. Además por la acción de las bacterias en presencia de aire dan como resultado la biodegradación de los contaminantes.^[41-16]

Pero la acción de esta zona no siempre es efectiva en la eliminación de los contaminantes, sobretodo si la carga contaminante es tan grande que sobrepasa su capacidad de atenuación. Además algunos contaminantes no son fácilmente absorbidos o son resistentes a la acción bacteriana, como los solventes y desinfectantes clorados.^[17-24]

1.3.1 Actividades Contaminantes

❖ **Sistemas sépticos.** Los residuos que generamos en nuestros hogares son una de las grandes fuentes de contaminación de las aguas. Los sistemas sépticos o redes de recolección de aguas residuales instalados en las casas no están controlados y mantenidos correctamente, los desechos que generamos pueden contaminar las aguas subterráneas con bacterias, detergentes sintéticos, nitratos, cloruros y demás sustancias químicas utilizadas habitualmente en nuestro hogar.

❖ **Actividades industriales.** Las industrias de hoy, son los grandes responsables de la contaminación del planeta. Las diferentes sustancias químicas utilizadas en la producción industrial generan residuos tóxicos que deben almacenarse en algún sitio. Los depósitos que se construyen para esos desechos contaminan el agua. Por otra parte, existe una gran irresponsabilidad de muchas empresas que llevan a verter los desechos directamente a las aguas. Esas conductas, decididamente ilegales, se repiten en todas partes del planeta y deben ser detectadas por el gobiernos para su erradicación.

❖ **Actividades agrícolas.** Para el desarrollo de la agricultura el hombre utiliza enormes cantidades de fertilizantes y pesticidas químicos que pueden contaminar las aguas subterráneas. En el caso de los fertilizantes, la contaminación se produce especialmente por los nitrógenos que contienen, y que no logra ser asimilado por los vegetales.

❖ **Vertederos y embalses.** Las enormes cantidades de residuos líquidos y sólidos producidos en las industrias y nuestros hogares se almacenan muchas veces en vertederos y embalses superficiales que generalmente no cuentan con la impermeabilización necesaria para que estos desechos se filtren a través del suelo y subsuelo.

❖ **Depósitos subterráneos.** Otra práctica frecuentemente utilizada para almacenar los desechos generados por el hombre es la construcción de depósitos de basura por debajo del nivel del suelo. Estos depósitos tienen una vida útil limitada y por el paso del tiempo o porque han sido mal diseñados y construidos comienzan a filtrar las sustancias tóxicas hacia las aguas subterráneas.^[13]

1.4 EFECTOS EN LA SALUD POR CONTAMINANTES EN AGUA SUBTERRÁNEA

Los contaminantes ambientales son preocupantes porque se ha comprobado que poseen efectos adversos para la salud. Sin embargo, en el mercado se pueden encontrar actualmente 70.000 sustancias químicas diferentes y cada año se introducen otras 1500 nuevas. Esta situación plantea un gran desafío a muchos gobiernos que deben supervisar y gestionar estas sustancias potencialmente peligrosas.^[7]

En la Tabla 3. se incluyen los nombres de las sustancias contaminantes y los valores máximos permisibles establecidos en las normas de 1974 de la Organización Mundial de la Salud (OMS), las normas de la EPA de los Estados Unidos y en la Comunidad Económica Europea.

❖ **Toxicidad de los metales según el nivel de dosis y el tiempo de exposición**

- **Exposición aguda.** A través de agua de consumo humano, alimentos o exposición ocupacional, presentando la siguiente sintomatología: síndrome gastrointestinal agudo, disfunción renal, neurotoxicidad.

Tabla 3. Parámetros físico-químicos de potabilidad.

Parámetro	OMS 1985 Valor Guía	CEE Nivel-Guía	EE.UU. 1998	Produce
Turbiedad	< 1.0 Unt.	0-1 Unt.	0.5 Unt.	Interfiere con la desinfección
Color Verdadero UC	15	1	5 UC	Con el cloro crea trihalometanos
Olor	0	0	Inofensivo	Molesta al consumidor
Sabor	0	0	Inofensivo	Molesta al consumidor
Aluminio mg/L	0.2	0.05	0.1	Interfiere la diálisis de pacientes de riñón.
Antimonio mg/L	-	-	0.006	Altera colesterol y niveles de glucosa
Asbesto mg/L	-	-	7.0 millones fibras/L	Tumores benignos
Arsénico	0.05	0.05	0.05	Cáncer en la piel y afecta los nervios
Bario mg/L	-	0.1	2	Afecta el sistema circulatorio
Cadmio	0.005	0.005	0.005	Se concentra en el hígado, riñones y páncreas
Berilio	-	-	0.004	Riesgo cáncer huesos y pulmones
Cromo	0.05	0.005	0.1	Efectos en el hígado y los riñones
Cloruro	250	200	-	Afecta la digestión y produce mal sabor
Cianuro	0.1	0.050	0.2	Efectos en el bazo, hígado y riñones
Fluoruro	1.5	1.5-0.7	4	Daño de los dientes y los huesos
Fenol	0.001	-	-	Interfiere cloración
Mercurio	0.001	0.001	0.002	Daña el sistema nervioso
Hierro	0.3	0.05	-	Agua Roja
Magnesio	-	30	-	Puede contribuir a enfermedades cardíacas
Manganeso	0.1	0.02	-	Agua Roja
Níquel	-	0.05	0.1	Sensibiliza piel y sistema nervioso
Nitratos (N)	-	2.5	10	Disminuye la oxigenación de la sangre de los niños
Nitritos (N)	-	-	1	
Selenio	0.01	-	0.05	Ataca sistema nervioso
Sulfatos	400	25	500	Daños estomacales
Talio	-	-	0.002	Altera hígado, riñones, intestinos y cerebro
Plomo	0.05	0.05	0.015	Daña el sistema nervioso y riñones
Cobre	1.0	0.1	1.5	Tóxico para niños
Sodio	200	20	-	Afecta la presión sanguínea
Zinc	5.0	0.1	-	
Glifosfato	-	0.001	0.7	Afecta hígado y riñones
Benceno	0.01	-	0.005	Riesgo de Cáncer

Fuente: Jorge Arboleda. Acodal. 2000

- **Exposición prolongada.** A través de agua de consumo humano, por vía aérea o por contacto con suelos contaminados. Desarrollo de distintos tipos de cancer; hiperqueratosis; hiperpigmentación de la piel en el caso particular del arsénico; inflamación crónica de las vías respiratorias; insuficiencia renal; dermatitis; síntomas neurológicos; daño reproductivo; fetotoxicidad, teratogenicidad, aborto espontáneo.^[20-13]

- **Metales carcinogénicos:** Arsénico, cadmio, cromo, manganeso, mercurio, plomo, talio.

- **Metales que causan daño reproductivo:** Mercurio, plomo, arsénico, cobre, selenio, cadmio, níquel, litio.

❖ **Riesgo para la salud humana**

- **Efectos tóxicos no carcinogénicos.** Existe un nivel de dosis umbral por debajo del cual no se observan efectos adversos. Estudios epidemiológicos en humanos son de gran utilidad, aunque pocas veces puede contarse con ellos.^[13]

- **Efectos tóxicos carcinogénicos.** Las curvas dosis-respuesta no poseen umbral, aún a valores muy bajos de dosis existe la posibilidad de contraer cáncer por exposición a sustancias cancerígenas.

- **Cadmio.** Se estima que la absorción media de cadmio en el tracto gastrointestinal del hombre es de alrededor de un 5% del total ingerido, sin embargo, puede variar influida por algunos factores nutricionales y fisiopatológicos. Así, en personas con bajas reservas de hierro o con problemas de eliminación fecal, la proporción de cadmio absorbido es mayor. Por otra parte, se ha observado en animales que una dieta baja en calcio y proteína aumenta la absorción intestinal de cadmio.^[16]

- **Mercurio.** Ha aumentado sus niveles en la cadena alimentaria como consecuencia del incremento de contaminación de las aguas marinas y fluviales por los vertidos industriales. El compuesto de mercurio más tóxico es su forma metilada (metilmercurio), producida por bacterias anaerobias que viven en medios acuosos carentes o muy pobres en oxígeno. La acumulación de mercurio en el organismo, especialmente la forma metilada, produce degeneraciones del sistema nervioso central, ceguera, sordera e incluso malformaciones congénitas durante la gestación. La presencia de una u otra forma depende de diversos

factores, y además tanto en el medio ambiente como en el organismo se pueden transformar unas en otras mediante reacciones de óxido-reducción y de metilación, reacciones en las que pueden intervenir algunos microorganismos.

La toxicidad del compuesto organomercurial más estudiado, el metilmercurio, es principalmente debida a su efecto sobre el sistema nervioso. En el hombre, el efecto tóxico se manifiesta tanto en el sistema nervioso central como en el periférico. Los órganos donde se acumula mayoritariamente el metilmercurio ingerido por vía oral son: el sistema oseo, riñones, hígado y cerebro.^[20-16]

- **Arsénico.** Es un metaloide de color gris acero, que se encuentra en diversos minerales. Se obtiene como producto secundario en la producción y refinación de cobre, plomo, zinc, estaño y oro, pues está como impureza en muchos minerales de estos metales.

Por razones geológicas naturales, en ciertas zonas del mundo el agua para beber de algunas poblaciones puede contener más arsénico inorgánico del habitual, tal es el caso de Argentina, Chile y México. Ingresa al hombre por vía digestiva a través de agua contaminada, alimentos contaminados y malos hábitos higiénicos en el trabajo. También por inhalación de polvo y vapores, entre la población cercana a los sitios en donde se refina o utiliza y en los trabajadores.

En exposiciones agudas y a altas concentraciones irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La exposición aguda al arsénico puede causar efectos adversos en el sistema circulatorio, sistema nervioso, riñón, hígado y tracto gastrointestinal, causando convulsiones, alteraciones renales, hemorragias graves, pérdida de fluidos y electrolitos, shock y muerte. En las poblaciones que beben agua contaminada con altas concentraciones de arsénico, se han descrito efectos vasculares periféricos caracterizados por cianosis y pérdida progresiva de la circulación en las extremidades, que puede finalizar en gangrena seca, mejor conocida como enfermedad del pie negro.

En estas poblaciones se incrementa el riesgo de presentar cáncer de piel o tumores en vejiga, riñón, hígado y pulmón. El arsénico es un carcinogénico comprobado y puede dañar el material genético indirectamente, es un inhibidor enzimático, que se combina con los grupos sulfhidrilos, interfiriendo en el metabolismo celular.^[17-24]

- **Plomo.** Es un metal muy empleado desde la antigüedad y en la actualidad se utiliza principalmente en la industria del petróleo con varios fines, entre ellos, como antidetonante en la gasolina. También es utilizado en la fabricación de baterías, en la industria de las pinturas y pigmentos y como estabilizante en la fabricación de algunos tipos de plástico. El plomo que ingresa en el organismo por vía digestiva, respiratoria o a través de la piel, se asocia en una primera fase a los eritrocitos. A largo plazo, alrededor del 95% del metal presente en el organismo se acumula a nivel óseo sustituyendo al calcio, el resto se acumula principalmente en los riñones e hígado.

El plomo ejerce un efecto tóxico doble sobre el sistema hematopoyético, reduciendo por una parte la vida media de los eritrocitos circulantes, y por otra inhibiendo la síntesis de hemoglobina con la consiguiente aparición de anemia. Este metal también ejerce un efecto tóxico sobre el sistema nervioso central, y se ha asociado con deficiencias en el desarrollo intelectual de niños expuestos a plomo incluso a concentraciones relativamente bajas. En los riñones de hombres o animales expuestos al plomo se producen nefropatías que normalmente son de tipo crónico, aunque en los niños puede presentarse un síndrome de tipo agudo. La toxicidad del plomo también se refleja a nivel del sistema cardiovascular y reproductor.^[29]

- **Fluor.** Procede de la dieta, que esta presente fundamentalmente en las aguas de bebida y también en los alimentos en pequeñas cantidades, exceptuando algunos casos como el té (50-150 mg/Kg) y pescados (4-5 mg/Kg), o los que proceden de zonas de cultivos ricos en fluor, así como las aguas minerales o vinos de zonas volcánicas, que pueden presentar todos ellos contenidos importantes.^[4-36]

El fluor puede catalogarse como un elemento "posiblemente esencial" desde el punto de vista de la nutrición humana, ya que es un oligoelemento imprescindible para la formación de huesos y dientes. Otros aspectos destacables son que hace más resistente el organismo a la descalcificación, interfiere la actividad metabólica de las bacterias de la placa dental y, según la OMS, es el único agente eficaz para la prevención de la caries suministrado a través del abastecimiento de agua. En Colombia este se consume en la sal.^[136]

Para la consecución de los efectos descritos hay que tener en cuenta que su asimilación por el organismo puede estar condicionada por el consumo coincidente de otros elementos con los que pudiera reaccionar, como es el caso del calcio.

A pesar de lo anterior, el fluor sigue siendo un elemento claramente tóxico, en el que sólo la cantidad de las dosis consumidas diferencia los efectos beneficiosos de los perniciosos. Es por ello que resulta necesaria la determinación de las cantidades diarias ingeridas para comprobar si se ajustan a las consideradas como óptimas para el consumo humano, teniendo en cuenta que la dosis óptima es la que se encuentra comprendida entre 0.05 y 0.07 mg/Kg, si se encuentra entre 2 y 4 mg/Kg es tóxica, y entre 6 y 83 mg/Kg es letal.^[36-28-27]

La cuantificación económica de los resultados de esta medida demuestra que los beneficios producidos superan claramente los costes que implica, extendiendo además su efecto positivo a todos los habitantes de una región con independencia de su nivel socio-económico.^[17]

Debemos pues aceptar que, aunque existen sectores que critican la conveniencia de la fluoración, tanto por una discutida falta de eficacia como por su carácter coercitivo, existen razones fundadas para pensar que actúa como un factor determinante en la prevención de la caries dental, sin olvidar que en el terreno de la prevención siempre hay que considerar múltiples factores y el fluor es tan sólo uno de esos factores.

La OMS establece una serie de requisitos básicos que deben cumplirse para que la fluoración pueda ser considerada una medida eficaz: grado suficiente de desarrollo económico, constancia de que la población bebe agua de la red pública, moderada frecuencia de caries dental en la comunidad, etc.

1.5 QUIMICA DE AGUA NATURAL

Considerando el agua como un elemento de vital importancia en el desarrollo normal y funcional de todos los organismos superiores, la calidad química y física de esta sustancia natural ha ocupado siempre un puesto preferencial en la preocupación del hombre por suministrar agua potable que satisfaga todas las exigencias que ella debe tener, sin daño para la salud de los consumidores.^[12]

Los contaminantes inorgánicos que se detectan comúnmente incluyen nitratos, sulfatos, cloro, hierro, manganeso y metales pesados como el arsénico, selenio, cadmio, cobres, etc, los cuales ocurren de manera natural a un nivel de fondo. Las concentraciones en exceso se

originan de muchas fuentes, especialmente residenciales y sistemas de drenaje de las ciudades, molinos, minas e industrias.

La característica más importante de los metales pesados, que las distinguen de otros contaminantes, es que no se descomponen por actividad microbiana (no son biodegradables); una vez ingresados al agua, su toxicidad es controlada en gran medida por la forma química y la concentración en que se encuentre.^[16]

Las aguas subterráneas de modo natural presenta metales pesados como As, Se, Fe, Cu, Zn, Cd, Hg, Cr, Pb y Ag entre otros, estos metales se encuentran en concentraciones muy pequeñas ($\mu\text{g/mL}$).

1.6 MICROBIOLOGIA DEL AGUA NATURAL

Otro parámetro de calidad de aguas para el consumo humano es la presencia de bacterias coliformes. Estas, si bien no son generalmente patógenas de por sí, son indicadoras de presencia de microbios potencialmente patógenos, y por lo tanto son un índice de deficiencias sanitarias en las fuentes de agua. La ingestión de agua contaminada incrementa el riesgo de contraer enfermedades.^[43]

Cabe señalar sin embargo, que aunque se reconoce que la determinación de la concentración de estas bacterias en el agua es un elemento crítico para determinar el riesgo de enfermedades relacionadas al consumo de las mismas, no existe una relación simple entre el nivel de coliformes en el agua, la presencia de microorganismos patógenos en la misma y el riesgo de enfermedades.^[41]

Dentro de los coliformes totales, se pueden distinguir dos tipos, por un lado están los coliformes fecales, que proviene del tracto intestinal del animal de sangre caliente y que serían los mejores indicadores de riesgo de afecciones humanas, y por otro lado existen otro grupo de coliformes que son residentes naturales en el suelo y el agua.

El movimiento del agua en profundidad transporta estas bacterias desde el suelo hacia el agua subterránea. Se ha señalado que la presencia de coliformes fecales en agua, esta indicando la contaminación reciente de la misma por estiércol animal.^[3]

A demás la supervivencia de los coliformes es mas probable en aguas profundas, de lento movimiento y altamente polucionadas. Es de señalar que las bacterias coliformes son fáciles de identificar, ya que se desarrollan en colonias de tamaño visible, utilizando medios para microbiología, lo que simplifica su determinación.

1.7 CARACTERIZACION DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Cada país ha tratado de adoptar una serie de normas y sistemas. Colombia, por ejemplo tiene sus parámetros de control instauraron en:

- ❖ El decreto 1594 del 26 junio de 1984, capitulo IV Criterios de calidad para el agua cruda, articulo 38.
- ❖ El decreto 475 de 1998, capitulo III criterios de calidad química para características de acción directa sobre la salud.

Las condiciones anteriores, son exigidas para que el agua pueda considerarse como potable. Los análisis para evaluar el agua, permiten determinar las características físico-químicas y microbiológicas, que establecen si el agua es potable o que tratamiento es adecuado para potabilización, también nos conduce al uso que se le debe dar al agua.

1.8 ESPECTROMETRIA DE ABSORCIÓN ATOMICA

1.8.1 Generador de Hidruros

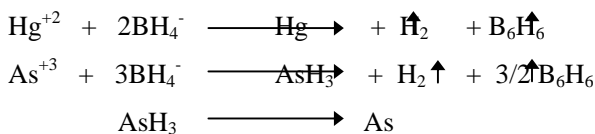
El generador de hidruros es un sistema externo del equipo de absorción atómica, que utiliza agentes reductores, comúnmente borohidruro de sodio (NaBH_4). En donde la muestra reacciona con el agente reductor, y es llevado por el gas de arrastre a la celda de cuarzo.^[8]

Este método es aplicable en la determinación de arsénico, mercurio y selenio, su principio es la conversión de estos metales en su correspondiente hidruro.

- **Principio Químico.** El borohidruro de sodio (NaBH_4) es un agente usado exclusivamente como reductor en el MHS-10. El borohidruro de sodio (NaBH_4) libera

hidrógeno en contacto con ácidos. El mecanismo de reacción implica la reducción de iones del metal esto toma lugar a la formación intermedia de radicales.

Figura 4. Proceso de Reducción



La determinación del mercurio se hace usando la técnica de vapor en frío.^[32]

- **Ventajas.** Los elementos determinados por generador de hidruros se encuentran en la tabla 4. Para estos elementos el límite de detección se determina $\mu\text{g/L}$. Los resultados de límite de detección en vapor en frío para mercurio es extremadamente bajo.^[11]

Tabla 4. Elementos Analizados por Generador de Hidruros

As	Bi	Ge
Pb	Sb	Se
Sn	Te	

Las ventajas del sistema automático es que las muestras y la separación de hidruros utilizan un sistema de inyección por descomposición de hidruros por calentamiento eléctrico.^[8]

- **Desventajas.** La mayor limitación de la técnica es la restricción de los elementos que se pueden analizar. Los resultados dependen mucho de la variedad de parámetros, incluyendo el estado de valencia del analito, tiempo de reacción, presión de los gases, temperatura de la celda de cuarzo y de la concentración ácida. Sin embargo, el éxito de la técnica depende del cuidado de la operación. La formación de los hidruros del analito esta contenida en el numero de compuestos presentes en la matriz, dejando sujeta la técnica a las interferencias químicas.^[32-8]

1.9 POTENCIOMETRIA

Los métodos potenciométrico de análisis se basan en las medidas del potencial de las celdas electroquímicas en ausencia de corrientes apreciables.

En la actualidad las concentraciones de los iones se obtienen directamente del potencial de un electrodo de membrana selectiva. Estos electrodos están relativamente libres de interferencias y proporcionan un medio rápido y adecuado para estimaciones cuantitativas de numerosos cationes y aniones.

El equipo requerido para los métodos potenciométricos es sencillo, incluye un electrodo de referencia, un electrodo indicador y un dispositivo para medir el potencial.^[37]

1.9.1 Ion Selectivo para Fluor. Este método se basa en la medida del potencial de una solución que contiene iones de fluoruro, que al sumergir el electrodo específico de fluoruro y el electrodo de referencia, se crea una corriente eléctrica entre la muestra y la solución interna del electrodo de ion selectivo, cuyo potencial será la medida de concentración de fluoruro.

Debido a la sencillez de este método, las muestras no necesitan pretratamiento especial antes de la lectura, lo que permite medir aisladamente el ion fluoruro.

- **Operación teórica.**

El electrodo de fluoruro contiene una banda sensible en el cuerpo epoxi, cuando esta banda esta en contacto con la solución emite un potencial, que depende de la concentración de iones fluoruros presentes, esta medida de potencial es digitalizada en pH/mV. La medida del potencial corresponde al nivel de iones fluoruros descrito por la ecuación de Nernst:

$$E = E_o + S \log (A)$$

Donde, E = Potencial Medido

E_o = Potencial de Referencia

S = Pendiente del electrodo (≈ 57 mV)

A = Actividad de iones de fluoruro en la solución

La actividad de iones fluoruro, A, es relacionada con la concentración de iones libres, C_i , por el coeficiente de actividad, Y_i .

- **Interferencias.** Muchos cationes y aniones no interfieren con la respuesta del electrodo de fluoruros. Aniones comúnmente asociados con fluoruros como Cl^- , Br^- , I^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} , y acetato, no interfieren con la operación del electrodo.

Los iones OH^- son interferencia para el electrodo. Algunos aniones, como CO_3^{2-} o PO_4^{3-} , hacen que la muestra sea más básica, incrementando la interferencia de OH^- , pero no interfieren directamente con el electrodo.

La mayor interferencia presente es la utilización del material de vidrio, ya que los iones fluoruro se adhieren a los silicatos. Es recomendable utilizar material de laboratorio plástico.

- **Efectos pH.** En soluciones ácidas con pH por debajo de 5, complejos de hidrógeno realizan soluciones fluoradas, formando soluciones ácida HF y iones HF_2^- .
- **Efectos de la Temperatura.** El potencial es afectado por cambios de temperatura, las muestras y las soluciones patrones podrán estar entre $\pm 1^\circ\text{C}$.

La pendiente del electrodo de fluoruro varía con la temperatura, indicando en el valor “S” en la ecuación de Nernst que es equivalente al factor de Nernst para los fluoruros que están en la tabla. Si la temperatura cambia, el electrodo debe ser recalibrado.

Tabla 5. Valores teóricos de pendiente vs temperatura

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Pendiente (mV)
0	-54.2
10	-56.2
20	-58.2
25	-59.2
30	-60.1
40	-62.1
50	-64.1

Fuente: Termo Orion. 2001

- **Complejos.** Los fluoruros forman complejos con aluminio, silicio, hierro (Fe^{3+}) y otros cationes polivalentes. El alcance del complejo depende de la concentración del agente complexante, la concentración de fluoruros totales, el pH de la solución y la fuerza iónica. El Tisab contiene, CDTA, este preferiblemente compleja el aluminio o el hierro en las muestras.^[22]

1.10 **ANÁLISIS ESTADÍSTICO.** Es una rama de las matemáticas que se ocupa de reunir, organizar y analizar datos numéricos y que ayuda a resolver problemas como el diseño de experimentos y la toma de decisiones.

Existen ciertos parámetros que sirven como criterios de confiabilidad, estos son:

1.10.1 Exactitud

Es el grado de aproximación entre el valor obtenido experimentalmente y el valor real o aceptado. Es una medida de la diferencia entre el promedio de los resultados del análisis y el valor verdadero; se puede establecer entonces un error promedio o relativo.^[21-41]

1.10.2 Precisión

La precisión de un método analítico es el grado de concordancia entre los resultados analíticos obtenidos para réplicas de una misma muestra, aplicando el mismo procedimiento experimental bajo condiciones prefijadas.^[9-26]

Se expresa en términos de la *Desviación estándar (S)* o *Desviación estándar relativa* o *Coefficiente de variación (CV)*.

- **Coefficiente de variación (CV).** Se define como la relación existente entre la desviación estándar de los datos y el valor medio de los mismos y se expresa en porcentaje. El coeficiente de variación exigido depende de las unidades de concentración en que se encuentra el analito.
- **Desviación estándar (S).** Corresponde a la relación entre el promedio. La desviación estándar de los datos, se expresa en porcentaje como el coeficiente de variación ($CV \% = 100 * \text{desviación est}$)

La precisión es una medida del grado de reproducibilidad y/o repetibilidad del método analítico bajo las condiciones normales de operación.

- **Reproducibilidad.** Mide el grado de cercanía entre las medidas obtenidas de análisis realizados repetidamente de múltiples muestreos de una muestra homogénea. La reproducibilidad es la precisión de un método analítico expresada como la concordancia entre determinaciones independientes realizadas bajo condiciones diferentes (diferentes

analista, en diferentes días, en e mismo o diferente laboratorios, utilizando el mismo o diferentes equipos, etc.).

- **Repetitividad.** Es la concordancia entre los resultados obtenidos con el mismo método, en muestras idénticas y bajo las mismas condiciones (experimentador, reactivos, instrumentos).

1.10.3 Limite de Detección.

Es la mínima concentración de analito detectada, pero no necesariamente cuantificada bajo las condiciones experimentales definidas.

La práctica común identifica varios límites de detección, cada uno con un propósito definido, pero para fines prácticos se toma el **Limite de Detección del Método (DM)**, como la concentración mínima que puede ser medida con una exactitud y una precisión aceptables.^[9]

- **Limite de Detección Instrumental (LDI).** Aquella concentración del analito que proporciona una señal significativamente diferente de la señal de fondo. Es similar en muchos aspectos al nivel crítico. Se estableció como 1.645 veces la desviación estándar del blanco de análisis. Resulta muy útil para valorar la concentración de analito o la cantidad de un extracto necesaria para producir una señal que permita calcular un LDM estimado.^[26-9-10]

- **Limite de Detección del Método (LDM).** Concentración de analito que, cuando se procesa a través del método completo, produce una señal con una probabilidad del 99% de ser diferente del blanco.

1.10.4 Limite de Cuantificación.

Es la menor concentración de analito que produce una señal más grande que el blanco y que puede ser detectada bajo las condiciones de operación establecidas.

1.10.5 Linealidad.

La linealidad se refiere a la proporcionalidad entre la concentración y la señal producida por el instrumento y se debe verificar si en el laboratorio se cumple el rango y tipo de linealidad que reporta la literatura del método.

La linealidad se determina por análisis de regresiones rectas resultados de concentración y se reporta en términos de varianza de la pendiente obtenida.

1.10.6 Sensibilidad del Método.

Herramienta que permite establecer los rangos de concentración en los cuales el método es aplicable y confiable para poder tomar la decisión de ampliarlo a concentraciones altas o reducirlo a niveles bajos.

1.10.7 Recuperación.

Es la capacidad que tiene un procedimiento analito para definir cuantitativamente una especie química que ha sido adicionada a una muestra. ^[9-26]

2. METODOLOGIA

2.1 MATERIALES

Los reactivos, material de laboratorio y equipos fueron suministrados por el laboratorio de Control de Calidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. de igual manera el transporte para los muestreos de los pozos perforados fue por parte de la empresa.

2.2 IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS ANALÍTICAS

Se implementaron las técnicas analíticas en aguas naturales, para la determinación de arsénico y selenio por el método de absorción atómica con generador de hidruros y la determinación de fluoruros a través del método potenciométrico de ion selectivo.

2.2.1 Absorción Atómica por Generador de Hidruros. Para la implementación de las técnicas se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo 2380 y un generador de hidruros MHS-10 (ver figura 6).

Figura 5. Espectrofotómetro de absorción atómica con generador de hidruros



Cuyo procedimiento para cada análisis es el siguiente:

- **Determinación de Arsénico en Aguas naturales.** La técnica para el análisis de Arsénico se implemento siguiendo el procedimiento del manual de Operaciones MHS-10, con los siguientes parámetros de operación.^[32]

Tabla 6. Parámetros de Operación MHS-10 para Arsénico

Parámetro MHS-10 para As	
Lámpara	Cátodo hueco
Longitud de onda (nm)	193.8
Slit Setting (nm)	0.7
Gas de Purga	Nitrógeno
Llama	Aire / acetileno
Celda	Cuarzo
Reductor	NaBH ₄ 3%

Se prepararon patrones de tritisol de concentración 1; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 50 mg/ml de As, a partir de un patrón de 1000 mg/L As. Se tomaron 10 mL de cada patrón en frascos de reacción y se le adicionaron 3 mL de HCl 32% y 1 mL de KI 3%, se dejaron una hora en reacción. Esto hizo que el arsénico trivalente (As III) pase al estado pentavalente As(V). Finalmente se leyó cada patrón en el equipo para determinar la Absorbancia.

- **Determinación de Selenio en Aguas naturales.** La técnica para determinar selenio en aguas naturales se implemento siguiendo el procedimiento del manual de Operaciones MHS-10¹², con los siguientes parámetros de operación.

Tabla 7. Parámetros de Operación MHS-10 para Selenio

Parámetro MHS-10 para Se	
Lámpara	Cátodo hueco
Longitud de onda (nm)	196
Slit Setting (nm)	2.0
Gas de Purga	Nitrógeno
Llama	Aire/acetileno
Celda	Cuarzo
Reductor	NaBH ₄ 3%

Se tomo 50 mL de un patrón tritisol de concentración 10 ppm, se adiciono 5 mL HNO₃ concentrado y se calentó hasta reducir el volumen a la mitad, luego se aforo al volumen inicial. A partir de la anterior solución se prepararon patrones de 1; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40 ppb (mg/mL) Se leyó cada uno en el equipo para determinar la Absorbancias.^[32]

2.2.2 Potenciométrico por Ion Selectivo

- **Determinación de Fluoruros en Aguas naturales.** Para la determinación de las concentración de fluoruro se utilizó un electrodo de ion selectivo, siendo esta la metodología más adecuada actualmente. Para las determinaciones realizadas se empleó; un electrodo ión selectivo de fluoruro marca Orion Mod. 9409 de estado sólido, un potenciómetro marca Termo Orion, modelo 290 y un agitador magnético (ver figura 7) y se procedió de la siguiente manera: ^[37-22]

Figura 6. Electrodo de Ion Selectivo para Fluor



Se prepararon soluciones estándares de 0.19 a 1.9, a partir de una solución de 1900 ppm F⁻, se procedió a pipetear 10 mL de cada solución estándar en un vaso plástico, a este mismo se le agrego 10 mL de Tisab II (1,2-Cyclohexanediaminetetra acético acid CDTA), solución que ajusta la fuerza iónica del medio para elimina interferencias, y se coloco a agitación magnética para su respectiva lectura, teniendo en cuenta la profundidad de emersión del electrodo, que fue 1 cm, y las revoluciones por minuto en el agitador magnético.

2.2.3 Análisis Estadístico

Una vez realizado los montajes, se procedió a realizar el siguientes análisis estadístico, para cada método de análisis, se realizaron una serie de pruebas a diferentes concentraciones, con el fin de estandarizar los parámetros instrumentales.

- **Curva de Calibración**

Se prepararon mínimo 10 patrones a partir de un patrón de 1000 mg/L, en concentraciones según sugerencia del manual del equipo. Luego se leen sus absorbancias o milivoltios según el análisis. Con estos datos se gráfica absorbancia vs concentración o milivoltios vs log concentración y se determina el coeficiente de correlación y la ecuación de la recta.

- **Curva de Ringbom**

A partir de los datos de la curva de calibración concentración y absorbancia se calculo: porcentaje de transmitancia (%T), absorbancia ($Abst = 100 - \%T$) y el log de la concentración (log C), y se gráfico absorbancia vs log de concentración.

- **Curva de Trabajo**

Con la gráfica de Ringbom se halló el rango lineal, y se gráfico concentración vs absorbancia descartando o incluyendo datos. Se determino el coeficiente de correlación y la ecuación de la recta.

- **Límite de detección instrumental.**

Se prepararon 10 blancos de reactivo, y se lee su absorbancia. Calcular la media y la desviación estándar de las concentraciones de los blancos.

$$LDI = 1.645 \times S \quad \text{donde } S = \text{desviación estándar}$$

- **Límite de detección del método.**

Se preparó un patrón de concentración baja cerca al 20% de la curva de trabajo, el cual se lee 10 veces, para cada lectura se calibra el espectrofotómetro a 100% de transmitancia o 0.000 de absorbancia con respecto a un blanco de reactivo. A partir de estos datos de absorbancia, se obtuvo la media y la desviación estándar.

- **Límite de cuantificación.**

Con los datos del límite de detección se determino del límite de cuantificación, mediante el uso de la siguiente formula:

$$L.C \text{ mg/L} = 10 \times L.D.M$$

L.C = límite de cuantificación

L.D.M = límite detección método

- **Precisión.**

Con los valores usados para el límite de detección del método, se determinó la precisión expresada como el coeficiente de variación, que es el índice de concordancia entre los resultados obtenidos para réplica de una misma muestra, bajo condiciones similares. El coeficiente de variación se determina mediante:^[23]

$$CV = \frac{\sigma \times 100}{Media} \text{ donde,}$$

CV = Coeficiente de variación
 σ = Desviación estándar
Media = Media de la concentración

- **Sensibilidad del método.**

Con la pendiente obtenida de la ecuación de la curva de trabajo, se determina la sensibilidad (S) método, a partir de la siguiente ecuación:

$$S = 0.0044/m$$

donde, 0.0044 equivale a la máxima precisión del equipo.

m = pendiente de la curva de trabajo.

- **Exactitud.**

Se determinó la exactitud mediante la utilización de un patrón de referencia certificado Acuestandar, el cual se leyó mínimo 6 veces contra el blanco de reactivo y mediante la siguiente fórmula se halla el % de exactitud:

$$\% Error = \frac{Valor_{exp} - Valor_{teorico}}{Valor_{teorico}} \times 100$$

- **Recuperación.**

Se expresa como %R y se calcula como:

$$\% R = \frac{C_X - C_{BK}}{C_A} \times 100$$

C_X = Concentración promedio determinada.

C_{BK} = Concentración del blanco.

C_A = Concentración adicionada.

2.3 RECOLECCION Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS

De acuerdo a los estudios hidrogeológicos realizados por el acueducto metropolitano de Bucaramanga (ver sección 1.2.2), los pozos o acuíferos presentan las siguientes características:

Tabla 8. Características Pozos Perforados

Localización pozo	Sector Llano Grande	Sector Bucarica Floridablanca
Profundidad (m)	250	250
Caudal (Lps)	8	1.8
Diámetro Pulgadas	8 m – 6” 250 m – 4”	87m – 6” 250 m – 4”
Características	Hasta 109 m deposito consolidado (no hay roca)	Todo es roca, baja permeabilidad.
Nivel freatico	5-10 metros	

Se tomó una muestra de cada pozo para realizar los respectivos análisis físico-químicos y microbiológicos.

Una vez extraída la muestra de agua, esta se envasa en recipientes de vidrio o plástico, cuidadosamente lavados y preparados para la preservación y transporte, de acuerdo a los parámetros a determinar. El volumen de la muestra depende del tipo de análisis, entre 500 – 1.000 mL, para asegurar la homogeneidad y representatividad en el muestreo, además de garantizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos.^[20]

- **Preservación de Muestras**

Las muestras se preservaron y almacenaron, dependiendo de los análisis y el tiempo de preservación.

en la tabla 9, se observa los parámetros medidos, envases utilizados para almacenar, volúmenes de almacenamiento, reactivos adicionados para preservar y tiempo de almacenamiento.

Tabla 9. Preservación de Muestras

Parámetro	Volumen muestra mL	Envase	Preservación	Tiempo Almacenamiento
Conductividad	500	P, V	Refrigero	28 horas
Turbiedad	100	P, V	Analizo Inmediatamente	Antes 6 horas
Color	500	P, V	Refrigero	48 horas
Cloruros	50	P, V	No Requiere	28 días
Sulfatos	100	P, V	Refrigero	28 días
Alcalinidad	200	P, V	Refrigero	28 días
Dureza Total	100	P, V	Adiciono HNO ₃ . pH<2	6 meses
Sólidos Totales	200	P, V	Refrigero	7 días
Fluoruros	100	P	No Requiere	28 días
Nitratos	200	P, V	Analizo Inmediatamente	
Nitritos	200	P, V	Refrigero	24 horas
Fenoles	500	P, V	Refrigero, adicióno H ₂ SO ₄ , pH<2	28 días
BTX	500	P, V	Refrigero, adicióno H ₂ SO ₄ , pH<2	28 días
Pesticidas	1000	V	Refrigero, adicióno 1000 mg/L ácido ascórbico	7 días
Arsénico	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Selenio	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Mercurio	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Hierro	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Cobre	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Zinc	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Cadmio	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Cromo	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Plomo	500	VA	Refrigero, adicióno HNO ₃ , pH<2	6 meses
Coliformes Totales	100	V	Analizo Inmediatamente	Antes 24 horas
Coliformes Fecales	100	V	Analizo Inmediatamente	Antes 24 horas
Aerobios Mesó filos	100	V	Analizo Inmediatamente	Antes 24 horas

P : Plástico

V: Vidrio

VA: Vidrio enjuagado con HNO₃ 10%

Fuente: Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. 1995

2.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

Una vez conducida la muestra al laboratorio, se le determinaron propiedades como pH, conductividad, turbiedad, color, cloruros, sulfatos, dureza total, dureza magnesiana, dureza calcica, magnesio, calcio, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, nitratos, nitritos, fluoruros, y metales (Hg, As, Se, Fe, Cd, Zn, Cr, Cu y Pb), bajo los siguientes procedimientos:

2.4.1 pH. Para la medición del pH se empleó un pHmetro Mettler MP-220, (ver figura 7), y se procedió de la siguiente manera:

Figura 7. pHmetro Mettler MP-220



Antes de registrar la medida del pH de la muestra, es indispensable haber calibrado los electrodos previamente con soluciones buffers de pH conocido (pH 7.00 y 4.00). Este análisis se efectuó según el ESTÁNDAR METHODS 4500 A,B.

Se tomó 50 ml de muestra, y se introdujo el electrodo de referencia para calcular pH, el cual, contiene en su interior un regulador de temperatura que ajusta la medida del pH a esta propiedad físico-química.

2.4.2 Conductividad. La conductividad se realizó por el método conductimetrico,

Figura 8. Conductímetro Multiline P4.



El equipo se calibró antes de cualquier análisis. Este análisis se realizó según norma STANDARD METHODS.

Se tomó 50 ml de muestra, y se introdujo el electrodo para calcular su conductividad directamente, en $\mu\text{s}/\text{cm}$.

2.4.3 Turbiedad. Este análisis se realizó de acuerdo a las normas ASTM D1889-88A y STANDARD METHODS 2130 edición 19.

Figura 9. Turbidímetro Digital Hach 2100N



Se tomaron 25 ml de muestra, se agitó vigorosamente hasta ver desaparición de burbujas de aire, luego se vertió la muestra en la celda y se introdujo en el turbidímetro Hach 2100N,

(ver figura 9), después de 5 segundos la señal se estabilizó y se leyó directamente el valor registrado en la pantalla del equipo.

2.4.4 Color verdadero. Se midió con un espectrofotómetro Hach DR 2000

Figura 10. Espectrofotómetro Hach DR 2000



Se tomó 50 ml de muestra, se hizo pasar por un papel de filtro S & S de referencia No 10311610, luego se pasó a la celda respectiva para ser leído por el espectrofotómetro (ver figura 9), siguiendo norma STANDARD METHODS 2120/95.

2.4.5 Cloruros. Los cloruros se analizaron por el método potenciométrico, empleando un titulador automático Metrohm modelo 702, y electrodo de plata-cloruro de plata. (ver figura 12)

En un vaso de precipitado se tomaron 100 ml de muestra con un agitador magnético, se colocó en el sistema como se ve en la figura 12, se sumergió el electrodo combinado de vidrio para medir cloruros y se tituló con solución de nitrato de plata $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 0.0141N, y se esperó a que el equipo diera respuesta, según norma Standard Methods 4500-Cl⁻ A, D.

Figura 11. Titulador Automático Metrohm modelo 702



2.4.6 Sulfatos. Para el análisis de sulfatos se utilizó un Turbidímetro Hach 2100N (ver figura 10) y un agitador magnético, de la siguiente manera:

Se preparó una curva de Calibración con patrones de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 mg/l SO_4^{2-} , se tomó 50 ml de cada uno de los patrones, y se le adicionó 10 ml de solución buffer, solución de cloruro de magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), acetato de sodio $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, nitrato de potasio KNO_3 y ácido acético CH_3COOH (99%), se mezcló con agitación magnética, agregando una cucharadita de cloruro de bario (aprox. 0.3 g), se continuó la agitación por 1 min a velocidad constante y finalmente se pasó la muestra a la celda de lectura y se midió la turbiedad en la escala de 0-100.

2.4.7 Alcalinidad. La determinación de la alcalinidad se llevó a cabo por el método potenciométrico, empleándose para ello el Titulador Automático Metrohm modelo 702 y el equipo medidor de pH; con los electrodos apropiados (ver figura 12), el desarrollo de la técnica fue el siguiente:

Se tomó 50 mL de muestra en un vaso de precipitado pequeño limpio y seco, y se introdujo un agitador magnético, luego se colocó este sistema sobre una manta de agitación propia del equipo, se sumergió el electrodo combinado de vidrio para medir alcalinidad y se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.02 N, esperando a que el equipo arrojará el valor asignado a la

muestra. El procedimiento relatado anteriormente, se practicó teniendo en cuenta la norma 2330c del STANDARD METHODS.

2.4.8 Dureza Total. Este análisis se realizó por un método titulométrico con ion selectivo.

La dureza total del agua se determinó con el titulador automático marca Metrohm modelo 702 (ver figura 12); utilizando los electrodos ISE de Ca y el de referencia Ag/AgCl.

En 50 mL de muestra se introdujo un agitador magnético y se le adicionó 5 mL de la solución acondicionadora TRIS-acetilcetona, luego se sumergió los electrodos y se tituló con una solución tituladora de EDTA 0.02N en KOH 0.1N, se esperó la respuesta del equipo de dureza total, dureza calcio y dureza magnesiana, en mg/L CaCO₃, además de la concentración de calcio y magnesio, en mg/L. Este método está bajo la norma Standard Methods 4500-NO₃⁻-A,D.

2.4.9 Sólidos Suspendidos Se pesó un crisol Gooch previamente secado y enfriado en un desecador, y se adicionó 100 mL de muestra, la cual se filtró por vacío.

Se removió el crisol Gooch, se secó por una hora en un estufa a 103-105°C, luego se dejó enfriar en el desecador y finalmente se pesó. Se calculó los sólidos suspendidos de la siguiente manera:

$$SS \text{ mg/l} = \frac{(A-B) \times 1000}{V}$$

donde A = Peso crisol más residuo (g)
B = Peso del crisol (g)
V = Volumen muestra filtrada
SS = Sólidos suspendidos Totales

Esta técnica se empleó según norma Standard Methods 2540 A,D.

2.4.10 Sólidos Totales. Se pesó una cápsula de porcelana limpia, se seca a 103 - 105°C por una hora, enfriada en un desecador y se pesa.

Se adicionó un volumen de muestra. Sobre una placa de calentamiento, se dejó evaporar hasta sequedad controlando la temperatura para evitar salpicaduras (2°C por debajo del punto de ebullición del agua). Se secó el residuo, calentándolo por una hora en el horno a

103 - 105°C, se enfrió en el desecador y se peso en la balanza analítica. Se calculo los sólidos totales según la siguiente ecuación:

$$S. T. = \frac{(A - B) \times 1000}{V}$$

S.T. = Sólidos totales, mg/L

A = Peso del recipiente + residuo seco, en mg.

B = Peso del recipiente vacío, en mg.

V = Volumen de muestra, en mL.

Esta técnica se utilizo según norma Standard Methods 2540 A,B.

2.4.11 Sólidos Disueltos. Los sólidos disueltos se calcularon haciendo la diferencia entre los sólidos totales y sólidos suspendidos.

2.4.12 Nitratos. Se determinó por el método de ion selectivo, empleando un pH de escala digital con resolución 0.1mV y un electrodo para medición de nitratos.

Se preparó una serie de patrones de 1 a 10 mg/L de NO₃⁻, a partir de un patrón certificado. Se tomo los mV, esto para hacer una curva de calibración de igual forma se hizo con las muestras. Esta determinación es según la norma Standard Methods 4500-NO3 A, D.

2.4.13 Nitritos. Se desarrollo por el método colorimetrico, utilizando un espectrofotómetro U.V visible, marca Perkin Elmer Lambda EZ 201.

Se preparó una curva patrón de nitritos de 0.007 a 0.15 mg/L N-NO₂, y se estandarizo con KMnO₄ 0.05N, HSO₄ con concentrado y sulfato ferroso amoniacal 0.05N, hasta que presento un color rosa. Y se midió la absorbancia en el espectrofotómetro a 543nm, de igual forma se hizo con las muestras y se determino cada concentración con la curva de calibración.

2.4.14 Fluoruros. Para el análisis de fluoruros en las muestras, se siguió el procedimiento descrito anteriormente (ver sección 2.2.2), obteniéndose las concentraciones de fluoruros leídas directamente del equipo, para cada muestra analizada.

2.4.15 Metales pesados. La determinación de los metales pesados se llevó a cabo por el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 2380. Ver figura 18.

Para los metales Fe, Cu, Zn, Cd, Cr y Pb, se realizo primero una digestión con ácido nítrico HNO₃ concentrado, y luego se paso por el equipo de absorción atómica. Para cada análisis se prepararon patrones para realizar la curva de calibración.

Las concentraciones se calcularon elaborando para cada metal una curva de calibración de Absorbancia Vs. Concentración de los patrones y luego se determino la concentración del metal correspondiente.

En el siguiente cuadro se observan los parámetros instrumentales utilizados para la determinación de cada metal:

Tabla 10. Parámetros Instrumentales para determinar Metales

Metal	Longitud Onda (nm)	Slit	Chequeo Sensibilidad
Cobre	324.8	0.7	2.0 ppm
Hierro	248.3	0.2	2.0 ppm
Zinc	213.9	0.7	0.5 ppm
Plomo	217	0.7	4.0 ppm
Cadmio	228.8	0.7	0.75 ppm
Cromo	357.9	0.7	2.0ppm

Para la determinación del arsénico y selenio se procedió de la anterior forma (ver sección 2.2.1- 2.2.2), posteriormente se registró los datos.

- **Mercurio.** La determinación de mercurios se llevo a cabo en el espectrofotómetro Perkin Elmer modelo 2380 con generador de hidruros, de la siguiente manera:

Tabla 11. Parámetros Instrumentales para Mercurio

Parámetro MHS-10 para Hg	
Lámpara	Cátodo hueco
Longitud de onda (nm)	253.7
Slit Setting (nm)	0.7
Gas de Purga	Nitrógeno
Llama	-
Celda	Cuarzo
Reductor	NaBH ₄ 3%

A partir de la solución intermedia de mercurio de 10.0 µg Hg /L, prepararon cinco patrones de 0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 µg Hg /L.

Cada patrón se transfirió 10 ml a un vaso de reacción y se mezcló con 1 ml de mezcla ácida al 1.5 % (H₂SO₄ :HNO₃) y dos gotas de KMnO₄ al 5% hasta obtener una coloración violeta estable. Ensambló el frasco en el generador e inició la medida.

Los patrones y muestras se hicieron reaccionar con la solución reductora, el borohidruro de sodio al 3%, hasta obtener un valor máximo de absorbancia en la pantalla. Se tomó estas lecturas.

- **Arsénico.** De acuerdo a la técnica implementada, anteriormente, se prosiguió a realizar los análisis a cada muestra (ver sección 2.2.1), se realizó una curva de calibración de Absorbancia Vs. Concentración de los patrones y se determinó la concentración de arsénico en cada muestra correspondiente.
- **Selenio.** Según el método implementado en la sección 2.2.1, se realizaron los análisis a las muestras (ver sección 2.2.1), de igual forma se elaboró una curva de calibración de Absorbancia vs concentración y se calculó la concentración de selenio en cada muestra.

2.4.16 Fenoles, BTEX's y Plaguicidas. Como el objetivo primordial es la calidad del agua, se hizo necesario realizar un estudio por cromatografía de gases-espectrometría de masas (HRGC-MSD), para determinar el contenido de fenoles, BTEX's y plaguicidas en las muestras de los acuíferos.

Este estudio lo realizó el Laboratorio de Cromatografía de la Universidad Industrial de Santander.

2.5 CARACTERIZACION MICROBIOLÓGICA

La presencia de microorganismos es otro parámetro que se analizó, como indicador de presencia de microbios patógenos, que son índice de deficiencia sanitaria en el agua. A continuación se describe el procedimiento que se realizó para el análisis microbiológico:

Este análisis se realizó por la técnica del número más probable (NMP). (Manual de medios de cultivo MERCK 2002)

- En una gradilla 9 tubos con Caldo Fluorocult, dispuestos en tres series de tres tubos y una peptona por cada serie (ver tabla 12).

Tabla 12. Disposición de tubos de Fluorocult y peptona,
para análisis microbiológico

FLUOROCULT			PEPTONA
○	○	○	○
○	○	○	○
○	○	○	○

- Se adicionó 1 ml de muestra a cada tubo de Caldo Fluorocult de la primera serie y al tubo de la peptona (ver la tabla 12). A demás para el recuento de mesófilos, se agregó 1 ml de muestra a una caja de petri grande.
- De la primer peptona (Dilución 1/10), se tomó 5 ml y se agregó 1 ml de muestra en cada uno de los tubos de la segunda serie y también en la caja de petri para el recuento de mesófilos.
- De la segunda peptona (Dilución 1/100), tomar 4 ml y servir de a 1 ml en los tres tubos de fluorocult y en la caja de petri.
- Tapar los tubos y agitarlos para que la muestra se distribuya uniformemente.
- Los tubos se incubaron durante 18-24 horas a $35 \pm 1^\circ\text{C}$.
- Se adicionó en las cajas petri 10 ml de Agar Nutritivo y se mezclo en forma circular, junto con la muestra (el agar a una temperatura de $50-55^\circ\text{C}$ en siembra profunda). Se dejo solidificar durante 10 a 15 minutos.

Las cajas con Agar solidificado, se incubaron por inversión durante 18 a 24 h a $35 \pm 1^\circ\text{C}$.

3. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Siguiendo un orden cronológico, son expuesto a continuación los resultados y el análisis respectivo del trabajo desarrollado en el laboratorio de *control de calidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*.

Inicialmente se presentaran los datos obtenidos para la implementación de las técnicas analíticas, en donde solo se reportaran en forma tabulada, los valores óptimos de cada técnica.

3.1 IMPLEMENTACION DE TÉCNICAS

3.1.1 Arsénico

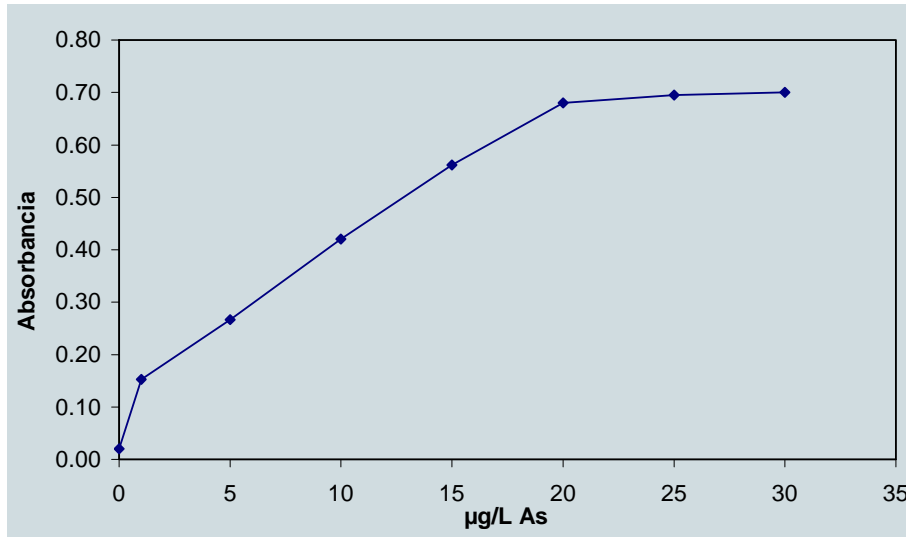
- **Curva de Calibración.**

En la tabla 13, se encuentran los datos de concentración y absorbancia para la construcción de la curva de calibración, la cual se realizó con patrones tritisol de una concentración de 1 a 30 $\mu\text{g/L}$ As, se eligieron estas concentraciones de acuerdo a una serie de pruebas realizadas.

Tabla 13. Datos de Concentración As ($\mu\text{g/L}$) y Absorbancia

Concentración As ($\mu\text{g/L}$)	Absorbancia 193.8 nm
0	0.020
1	0.153
5	0.267
10	0.420
15	0.562
20	0.680
25	0.695
30	0.700

Figura 12. Curva de Calibración para Arsénico



La curva de calibración establece, con mayor exactitud, la correspondencia entre la concentración y la absorbancia medida en el equipo, de igual forma muestra el comportamiento del equipo ante las concentraciones a determinar.

La respuesta del equipo, ver en la figura 12, en donde representa la menor concentraciones que es de 1 µg/L As, esta respuesta no es lineal, mientras que a concentraciones mayores de 20 µg/L As, la respuesta del equipo presenta una concentración constante.

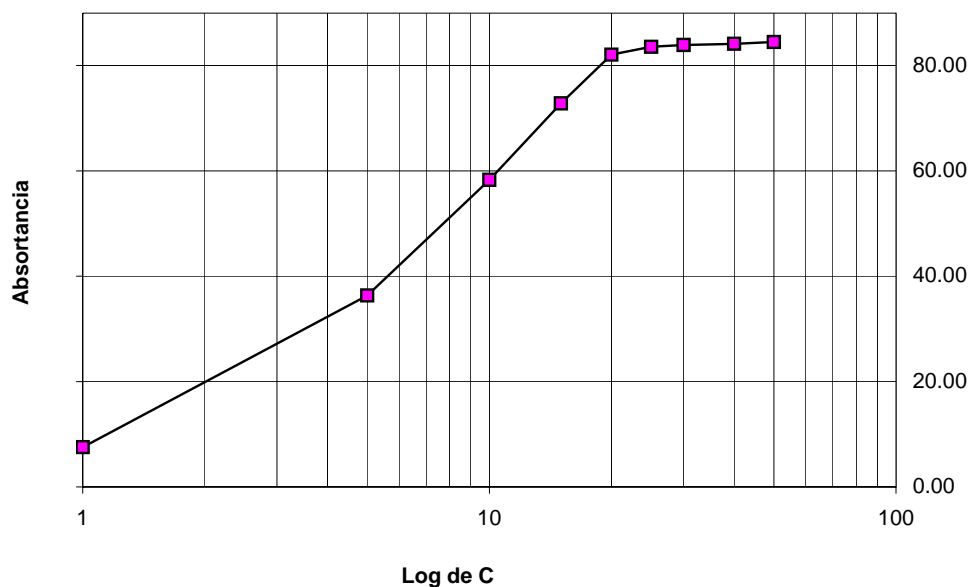
- **Curva de Ringbom.**

Esta curva determina el rango lineal de trabajo. En la tabla 14 se encuentran los datos obtenidos.

Tabla 14. Datos de arsénico para la gráfica de Ringbom

µg/L As	Absorbancia	%T	Absortancia	T	C/c	Log de c
0	0.020	95.50	4.50	0.955		
1	0.153	70.31	29.69	0.703	-4.035	0.000
5	0.267	54.08	45.92	0.541	-3.006	0.699
10	0.420	38.02	61.98	0.380	-2.718	1.000
15	0.562	27.42	72.58	0.274	-2.817	1.176
20	0.680	20.89	79.11	0.209	-3.055	1.301
25	0.695	20.18	79.82	0.202	-3.094	1.398

Figura 13. Curva de Ringbom para Arsénico



De acuerdo a los resultados obtenidos en la curva de Ringbom podemos decir que el rango lineal de trabajo se encuentra entre las concentraciones de 5 a 20 $\mu\text{g/L}$ As, de 20 $\mu\text{g/L}$ As en adelante la curva no es constante.

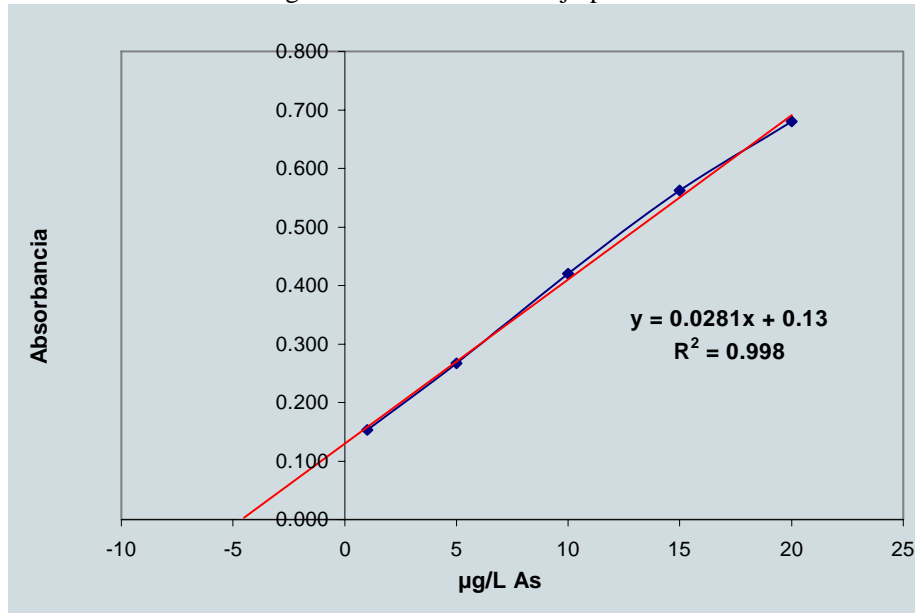
- **Curva de Trabajo.**

A partir del rango lineal obtenido en la curva de Ringbom, se hizo la curva de trabajo, la cual determina a que concentraciones se puede realizar los análisis con mayor exactitud.

Tabla 15. Datos para la curva de trabajo de Arsénico

Concentración As ($\mu\text{g/L}$)	Absorbancia
1	0.153
5	0.267
10	0.420
15	0.562
20	0.680

Figura 14. Curva de Trabajo para Arsénico



En la figura 14 se observa la curva de trabajo con una línea de tendencia, la cual marca la linealidad, de la misma forma encontramos la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación, que indica el ajuste que hay entre la línea de tendencia y la curva de trabajo. Se observa que la curva no pasa por el origen, debido a que el blanco presenta una absorbancia diferente de cero.

- **Límite de Detección Instrumental.**

Para determinar el límite de detección se realizaron 10 mediciones del blanco de reactivo. A los cuales se les realizó el mismo tratamiento que a los patrones. Los datos se encuentran en la tabla 16.

Tabla 16. Límite de Detección para Arsénico

Muestra No	Absorbancia (193.8 nm)
1	0.012
2	0.015
3	0.013
4	0.014
5	0.011
6	0.013
7	0.016
8	0.018
9	0.010
10	0.015
Media	0.014
Desviación estándar	0.0023

Se calculo el límite de detección a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{LDI} = 1.645 \times S \quad \text{donde } S = \text{desviación estándar}$$

$$\text{LDI} = 0.004 \mu\text{g/L As}$$

Este valor indica que es la mínima concentración de arsénico que el equipo puede detectar.

- **Límite de Detección del Método.**

El límite de detección del método se determino, haciendo pasar 10 patrones de una concentración de 10 $\mu\text{g/L As}$, y leyendo sus absorbancias, a estos patrones se les realizó el mismo tratamiento, adicionándoles HCl al 32% y KI 3%.

En la tabla 17, se encuentran los datos obtenidos

Tabla 17. Datos de Absorbancia de patrones de 10 $\mu\text{g/L As}$

Muestra No	Absorbancia
1	0.423
2	0.468
3	0.452
4	0.465
5	0.444
6	0.436
7	0.418
8	0.433
9	0.456
10	0.441
Media	0.4436
Desviación estándar	0.0168

El límite de detección del método es:

$$\text{L.D.M.} = 0.017 \mu\text{g/L As}$$

Este valor representa la mínima concentración detectada por este método.

- **Límite de Cuantificación.**

Con el límite de detección del método se halló el limite de cuantificación de la siguiente forma:

$$L.C \mu\text{g/L} = 10 \times L.D.M$$

L.C = límite de cuantificación
L.D.M = límite de detección método

$$L.C \mu\text{g/L} = 10 \times 0.0168$$

$$L.C = 0.168 \mu\text{g/L As}$$

El límite de detección de cuantificación es 0168 $\mu\text{g/L As}$, esto representa la menor concentración medible, bajo las condiciones de operación establecidas.

- **Precisión.**

Con los datos de la tabla 17, se determino la precisión, que se expresa como el coeficiente de variación, según la siguiente formula:

$$CV = \frac{\sigma \times 100}{Media} \text{ donde}$$

CV = Coeficiente de variación
 σ = Desviación estándar
Media = Media de la concentración

$$CV = 3.78\%$$

Este resultado indican que el 3.78% hay de variación, entre resultados analíticos obtenidos y las replicas de una misma muestra.

- **Sensibilidad del Método.**

La sensibilidad tiene la capacidad de discriminación en las pequeñas diferencias que pueden presentar un analito de interés. Se determinó como la pendiente de la curva de calibración (ver figura 15).

Se calculo de la siguiente forma:

$$S = 0.0044/m$$

donde, 0.0044 equivale a la máxima precisión del equipo.

m = pendiente de la curva de trabajo.

Por lo tanto la sensibilidad del método es:

$$S = 0.142 \mu\text{g/L As}$$

Este es el rango de concentración en donde el método es aplicable y confiable.

- **Exactitud.**

La exactitud se estimó mediante un patrón de referencia acuestandar certificado, el cual se leyó 6 veces, este patrón certifica una concentración de 10 µg/L As.

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 18.

Tabla 18. Datos de patrón certificado para arsénico

Concentración 10 µg/L As	Absorbancia	Concentración µg/L As
1	0.421	10.35
2	0.429	10.64
3	0.425	10.50
4	0.420	10.32
5	0.430	10.67
6	0.419	10.28

Se determino la media de las concentraciones, que es igual a 10.46, este es el valor experimental.

El calculo de la exactitud se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\% Error = \frac{Valor_{exp} - Valor_{teorico}}{Valor_{teorico}} \times 100$$

$$\% Error = \frac{10.46 - 10}{10} \times 100$$

$\% Error = 4.6$

La exactitud se midió a partir del error, es decir que el método presenta un error del 4.6% con respecto al valor verdadero.

3.1.2 Selenio

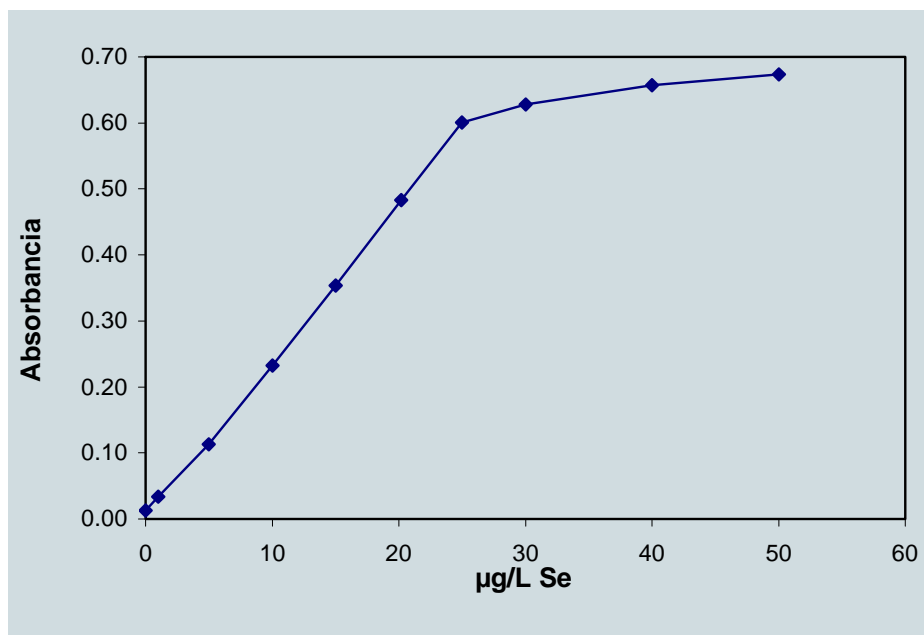
- **Curva de Calibración.**

En la tabla 19, se encuentran los datos de concentración y absorbancia para la construcción de la curva de calibración, la cual se realizó con patrones tritisol de una concentración de 1 a 30 µg/L Se.

Tabla 19. Datos de Concentración Se ($\mu\text{g/L}$) y Absorbancia

Concentración Se ($\mu\text{g/L}$)	Absorbancia 193.8 nm
0	0.013
1	0.034
5	0.113
10	0.232
15	0.354
20	0.483
25	0.601
30	0.628
40	0.657
50	0.674

Figura 16. Curva de Calibración para Selenio



La curva de calibración del selenio presenta un comportamiento lineal hasta una concentración de 25 $\mu\text{g/L}$ Se, luego estas concentraciones permanecen constantes frente a la absorbancia.

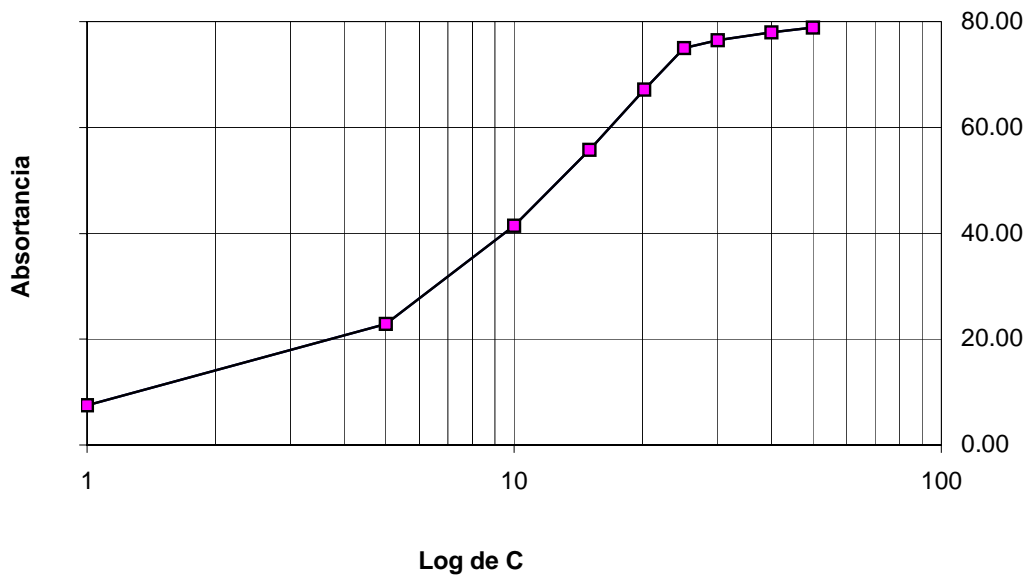
- **Curva de Ringbom.**

Esta curva me determino el rango lineal de trabajo en concentración, en la tabla 20, se encuentran los datos obtenidos, a partir de los datos de la curva de calibración.

Tabla 20. Datos de para la gráfica de Ringbom para Selenio

$\mu\text{g/L As}$	Absorbancia	%T	Absortancia	T	Log de c
0	0.013	97.05	2.95	0.971	
1	0.034	92.47	7.53	0.925	0.000
5	0.113	77.09	22.91	0.771	0.699
10	0.232	58.61	41.39	0.586	1.000
15	0.354	44.26	55.74	0.443	1.176
20	0.483	32.89	67.12	0.324	1.301
25	0.601	25.06	74.94	0.251	1.398

Figura 17. Curva de Ringbom para Selenio



La curva de Ringbom me presenta una linealidad de 1 a 25 $\mu\text{g/L Se}$.

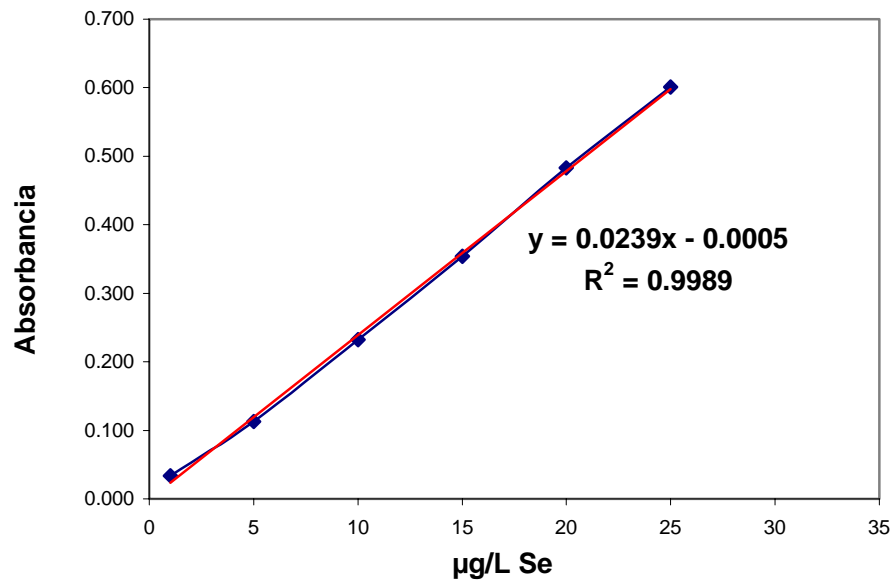
- **Curva de Trabajo.**

Esta curva determino los valores óptimos de concentración, por las lecturas de absorbancia de la curva de Ringbom, en la tabla 21, se encuentran los datos obtenidos.

Tabla 21. Datos para la curva de trabajo para Selenio

Concentración Se ($\mu\text{g/L}$)	Absorbancia
1	0.034
5	0.113
10	0.232
15	0.354
20	0.483
25	0.601

Figura 18. Curva de Trabajo para Selenio



La curva de trabajo, figura 18, con línea de tendencia, la cual marcar la linealidad, de igual manera encontramos la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación, que indica el ajuste que hay entre la línea de tendencia y la curva de trabajo.

- **Límite de Detección Instrumental.**

Para determinar el límite de detección se realizaron 10 mediciones del blanco de reactivo. Los datos se encuentran en la tabla 22.

Tabla 22. Límite de Detección para Selenio

Muestra No	Absorbancia (193.8 nm)
1	0.013
2	0.019
3	0.018
4	0.010
5	0.009
6	0.011
7	0.008
8	0.012
9	0.017
10	0.007
Media	0.012
Desviación estándar	0.0042

Para calcular el límite de detección se determino a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{LDI} = 1.645 \times S \quad \text{donde } S = \text{desviación estándar}$$

LDI = 0.007 µg/L Se

El límite de detección Instrumental es 0.007 µg/L Se, es la mínima concentración de selenio que el equipo me puede detectar bajo las condiciones establecidas.

- **Límite de Detección del Método.**

El límite de detección del método se determino, haciendo pasar 10 patrones de una concentración de 10 µg/L Se, y leyendo sus absorbancias.

Tabla 23. Datos de Absorbancias de patrones de 10µg/L Se

Muestra No	Absorbancia
1	0.223
2	0.227
3	0.218
4	0.215
5	0.220
6	0.217
7	0.213
8	0.210
9	0.222
10	0.213
Media	0.2178
Desviación estándar	0.0052

El límite de detección del método es:

$$\text{L.D.M.} = 0.005 \mu\text{g/L Se}$$

Este es el valor mínimo detectado por este método en las condiciones establecidas.

- **Límite de Cuantificación.**

Con el límite de detección del método se halló el límite de cuantificación de la siguiente forma:

$$\text{L.C } \mu\text{g/L} = 10 \times \text{L.D.M} \quad \text{L.C} = \text{límite de cuantificación}$$
$$\text{L.D.M} = \text{límite de detección método}$$

$$\text{L.C } \mu\text{g/L} = 10 \times 0.0052$$

$$\text{L.C} = 0.052 \mu\text{g/L Se}$$

El límite de detección de cuantificación es 0.052 $\mu\text{g/L Se}$, esto representa la menor concentración, bajo las condiciones de operación establecidas.

- **Precisión.**

Con los datos de la tabla 23. se determinó la precisión, que se expresa como el coeficiente de variación, según la siguiente fórmula:

$$CV = \frac{\sigma \times 100}{\text{Media}} \quad \text{donde}$$

CV = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar

Media = Media de la concentración

$$CV = 2.39\%$$

Este resultado indica que hay una variación del 2.387%, entre resultados analíticos obtenidos en replicas de una misma muestra.

- **Sensibilidad del Método.**

La sensibilidad tiene la capacidad de discriminación, en las pequeñas diferencias que pueden presentar un analito de interés.

Se determinó como la pendiente de la curva de calibración (ver figura 21).

Se calculo de la siguiente forma:

$$S = 0.0044/m$$

donde, 0.0044 equivale a la máxima precisión del equipo.

m = pendiente de la curva de trabajo.

Por lo tanto la sensibilidad del método es:

$$S = 0.184 \mu\text{g/L Se}$$

Es la concentración donde el método es aplicable y confiable.

- **Exactitud.**

La exactitud se estimó mediante la lectura de 6 veces, un patrón acuestandar certificado, donde la concentración es de 7.5 $\mu\text{g/L Se}$. Los resultados de las absorbancias se encuentran en la tabla 24.

Tabla 24. Datos de patrón certificado para Selenio

No	Absorbancia	Concentración $\mu\text{g/L Se}$
1	0.174	7.48
2	0.170	7.32
3	0.178	7.65
4	0.167	7.19
5	0.173	7.44
6	0.165	7.11

Se determino la media de las concentraciones que es igual a 7.37, este es el valor experimental.

El calculo de la exactitud se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Valor}_{\text{exp}} - \text{Valor}_{\text{teorico}}}{\text{Valor}_{\text{teorico}}} \times 100$$
$$\% \text{ Error} = \frac{7.5 - 7.37}{7.5} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = 1.7$$

La exactitud se midió a partir del error, es decir que el método presenta un error del 1.733% con respecto al valor verdadero.

3.1.3 Fluoruro

Para la implementación de la técnica de fluoruros se realizó una curva de calibración y un análisis de recuperación.

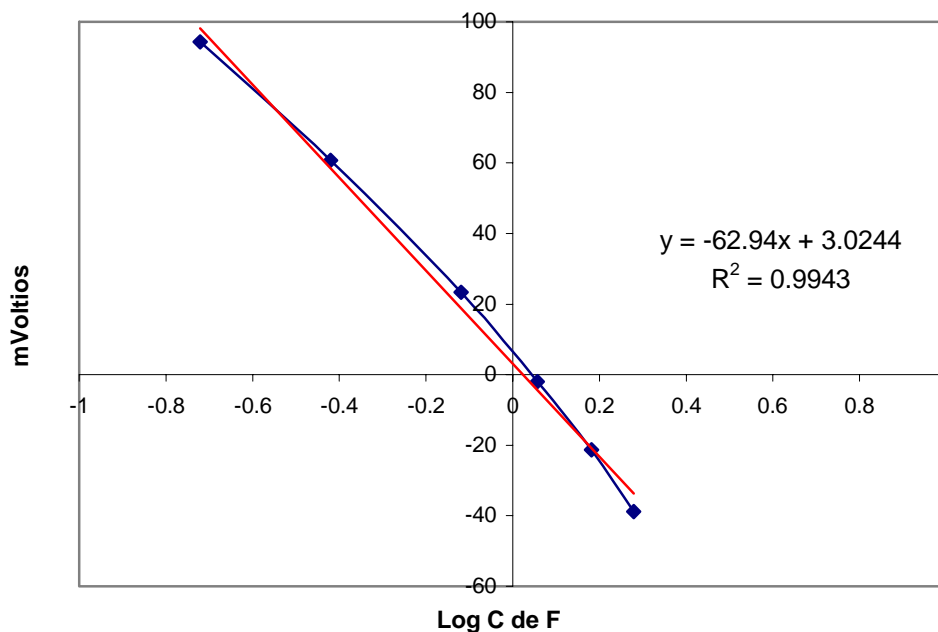
- **Curva de Calibración**

En la tabla 25, se encuentran los datos de logaritmo de concentración de fluoruros y milivoltios obtenidos, con estos datos se construyó la curva de calibración, la cual se realizó con patrones de concentración de 0.19 a 1.9 mg/L F⁻, se eligieron estas concentraciones por sugerencia del manual de instrucciones del electrodo, ya que de esta forma se obtendría una pendiente entre -54 a -66, fue son las mas adecuadas.

Tabla 25. Datos de Concentración y milivoltios para Fluoruros

Concentración (ppm)	Log C	mV
0.19	-0.7272	94.3
0.38	-0.4202	60.7
.76	-0.1191	23.3
1.14	0.0569	-2.0
1.52	0.1818	-21.3
1.9	0.2787	-38.8

Figura 19. Curva Calibración para Fluoruros



La curva presenta una pendiente de -62.98 que esta dentro del rango establecido por el equipo.

- **Recuperación**

La recuperación se determinó adicionando una concentración de analito en una patrón de concentración conocido, en la tabla 26, se encuentran los datos obtenidos.

Tabla 26. Datos para medir la Recuperación para Fluoruros

Concentración ppm	Concentración Adicionada ppm	Valor Determinado ppm
3.8	1.9	5.1
3.8	1.9	5.3
3.8	1.9	5.0
3.8	1.9	4.9
3.8	1.9	4.7
3.8	1.9	5.1
3.8	1.9	5.0
3.8	1.9	4.6
3.8	1.9	4.3
3.8	1.9	4.2
Promedio		4.82

Se expresa como %R y se calcula como:

$$\%R = \frac{C_X - C_{BK}}{C_A} \times 100$$

$\%R = 97.64$

Con este porcentaje podemos afirmar que este método recupera el 97.64% de los analitos analizados.

3.2 RESULTADO DE LOS ANALISIS FISICO-QUIMICOS Y MICROBIOLOGICOS

Finalmente los análisis realizados para la caracterización físico-química y microbiológica, dieron los siguientes resultados:

3.2.1 Pozo en el sector de Llano Grande.

En la tabla 27, se registran los resultados de los análisis físico-químico y microbiológico de la muestra “*agua pozo Llano Grande*”.

De acuerdo a los datos obtenidos en los análisis, se observa que los resultados de los parámetros cloruro y plomo sobrepasan el límite establecido en el decreto 1594/84, el cual fija los parámetros óptimos para aguas crudas, para tratamiento convencional o desinfección. Estos valores pueden regularse llevando el agua a diluciones considerables.

El decreto 475/98 establece los valores de concentración admisibles para agua potable. En el pozo de Llano Grande sobre pasan estos limites la conductividad, los cloruros, la alcalinidad total, los sólidos totales, los nitratos, el hierro y el plomo. Estos parámetros pueden ser removidos o minimizados con tratamiento convencional o llevando el agua diluciones considerables.

En los resultados de los análisis microbiológicos se observa ausencia del grupo coliformes totales y fecales, índice de contaminación patógena, pero si presenta microorganismos de tipo aerobios mesófilos, razón por la cual no cumplen el decreto, que establece la potabilización del agua, debido a esto no debe ser utilizado directamente para consumo.

Otros parámetros analizados fueron los fenoles, BTEX's y plaguicidas, determinaciones realizadas en *el Laboratorio de Cromatografía de la Universidad Industrial de Santander*.

Los Cromatogramas de la muestra del pozo de Llano Grande y sus respectivas tablas de resultados no reportan presencia de estos compuestos. Ver anexos G, H, K, L, O, P, S y T.

Tabla 27. Resultados de análisis físico-químico y microbiológico pozo Llano Grande

Parámetros	Unidades	Pozo Llano Grande	Criterio para uso del Agua en Consumo Humano Decreto 1594/84		Norma Agua Potable Decreto 475/98
			Tratamiento convencional	Desinfección	
pH	Unidades	7.37	5.0-9.0	6.5-8.5	6.5-9.0
Conductividad	Micromhos/cm	1898	-	-	50-1000
Turbiedad	UNT	2.36	-	10	<5
Color	UPC	12	75	20	<15
Cloruros	mg/L Cl ⁻	265.94	250	250	250
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	91.25	400	400	250
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	154.7	-	-	100
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	122.17	-	-	160
Dureza Calcica	mg/L CaCO ₃	87.3	-	-	-
Dureza Magnesiana	mg/L CaCO ₃	34.83	-	-	-
Calcio	mg/L Ca	34.93	-	-	60
Magnesio	mg/L Mg	9.36	-	-	36
Sólidos Totales	mg/L	637	-	-	<500
Sólidos Suspendidos	mg/L	5	-	-	-
Sólidos Disueltos	mg/L	632	-	-	-
Fluoruros	mg/L F ⁻	0.97	-	-	1.2
Nitratos	mg/L NO ₃	14.38	44	44	10
Nitritos	mg/L NO ₂	0.0032	3,3	3.3	0.1
Fenoles	mg/L	*ND	0.002	0.002	0.001
BTX	mg/L	*ND	-	-	-
Plaguicidas	mg/L	*ND	-	-	0.001
Metales					
Arsénico	mg/L As	0.004	0.05	0.05	0.01
Selenio	mg/L Se	0.0005	0.01	0.01	0.01
Mercurio	µg/L Hg	*ND	2	2	1
Hierro	mg/L Fe	0.42	-	-	0.3
Cobre	mg/L Cu	0.01	1.0	1.0	1.0
Zinc	mg/L Zn	*ND	15.0	15.0	5.0
Cadmio	mg/L Cd	*ND	0.01	0.01	0.003
Cromo	mg/L Cr	*ND	0.05	0.05	0.01
Plomo	mg/L Pb	0.18	0.05	0.05	0.01
Microbiología					
Coliformes Totales	NMP/100ml	0.00	20000	1000	0 UFC/100ml
Coliformes Fecales	NMP/100mL	0.00	2000	-	0 UFC/100ml
Aerobios Mesofilos	UFC/mL	3320	-	-	100

*ND : No Detectable. Valores que están por debajo del límite de detección del método.

■ Valores que sobre pasan el decreto 1594/84.

■ Valores que sobre pasan el decreto 475/98.

3.2.2 Pozo en el sector de Bucarica.

En el “*pozo Bucarica*”, se realizaron los análisis físico-químicos y microbiológicos, exigidos en los decretos 1594/84 y 475/98. Ver tabla 28.

En la tabla 28, la turbiedad sobrepasa el límite establecido por el decreto 1594/84, el cual establece los parámetros óptimos para aguas crudas para tratamientos convencional o desinfección. Este parámetro puede ser debido a la presencia de arcilla en el terreno.

En el pozo de Bucarica se obtuvo una alta concentración de carbonatos de calcio (CaCO_3), analizada como alcalinidad total, una concentración de fluoruros, y una pequeña cantidad de hierro, estas concentraciones sobrepasan los niveles establecidos en el decreto 475/98.

La presencia del carbonato de calcio posiblemente se debe a la abundancia de minerales en el subsuelo como la calcita, caliza, estalactita entre otras. De igual forma el fluoruro puede presentarse en forma de fluorita, criolita y apatito. Estas sustancias pueden eliminarse realizando diluciones.

Los análisis microbiológicos presentan una gran concentración de microorganismos de tipo aerobios mesófilos, y ausencia de contaminación patógena por parte del grupo de coliformes totales y fecales, luego el agua necesita un tratamiento de desinfección y por lo tanto no debe ser consumida directamente.

Los parámetros como los fenoles, BTEX's y plaguicidas, fueron realizados en *el Laboratorio de Cromatografía de la Universidad Industrial de Santander*.

En el análisis cromatográfico se observó presencia de compuestos relacionados con los BTEX's específicamente, tolueno en una concentración de 0.0065 mg/L, pero este contenido según los decretos no establecen una concentración determinada como riesgo para la salud. Ver anexos C, D, E, F, I, J, M, N.

Tabla 28. Resultados de análisis físico-químico y microbiológico pozo Bucarica

Parámetro	Unidades	Pozo Bucarica	Criterio para uso DEL Agua en Consumo Humano Decreto 1594/84		Norma Agua Potable Decreto 475/98
			Tratamiento convencional	Desinfección	
pH	Unidades	7.43	5.0-9.0	6.5-8.5	6.5-9.0
Conductividad	Micromhos/cm	748	-	-	50-1000
Turbiedad	UNT	33.7	-	10	<5
Color	UPC	73	75	20	<15
Cloruros	mg/L Cl ⁻	22.64	250	250	250
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	19.25	400	400	250
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	348.65	-	-	100
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	76.26	-	-	160
Dureza Calcica	mg/L CaCO ₃	47.2	-	-	-
Dureza Magnesiana	mg/L CaCO ₃	29.0	-	-	-
Calcio	mg/L Ca	18.9	-	-	60
Magnesio	mg/L Mg	6.96	-	-	36
Sólidos Totales	mg/L	494.5	-	-	<500
Sólidos Suspendidos	mg/L	32.5	-	-	-
Sólidos Disueltos	mg/L	472	-	-	-
Fluoruros	mg/L F ⁻	1.51	-	-	1.2
Nitratos	mg/L NO ₃	4.13	44	44	10
Nitritos	mg/L NO ₂	0.004	3,3	3.3	0.1
Fenoles	mg/L	*ND	0.002	0.002	0.001
BTX	mg/L	0.0065	-	-	-
Plaguicidas	mg/L	*ND	-	-	0.001
Metales					
Arsénico	mg/L As	0.003	0.05	0.05	0.01
Selenio	mg/L Se	*ND	0.01	0.01	0.01
Mercurio	µg/L Hg	*ND	2	2	1
Hierro	mg/L Fe	0.65	-	-	0.3
Cobre	mg/L Cu	0.02	1.0	1.0	1.0
Zinc	mg/L Zn	0.162	15.0	15.0	5.0
Cadmio	mg/L Cd	0.01	0.01	0.01	0.003
Cromo	mg/L Cr	*ND	0.05	0.05	0.01
Plomo	mg/L Pb	0.01	0.05	0.05	0.01
Microbiología					
Coliformes Totales	NMP/100ml	0.00	20000	1000	0 UFC/100m 1
Coliformes Fecales	NMP/100mL	0.00	2000	-	0 UFC/100m 1
Aerobios Mesofilos	UFC/mL	3360	-	-	100

*ND : No Detectable. Valores que están por debajo del límite de detección del método.

■ Valores que sobre pasan el decreto 1594/84.

■ Valores que sobre pasan el decreto 475/98.

4. CONCLUSIONES

- La implementación de la técnica de análisis de arsénico y selenio por absorción atómica con generador de hidruros, es un método sensible y confiable para la identificación de estos analitos en agua, esto se ratifica con sus límites de detección y sensibilidad, ya que son muy bajos, los cuales me permiten determinar concentraciones a nivel de trazas (ppb o $\mu\text{g/L}$). De igual manera podemos resaltar su exactitud y precisión, los cuales presentan valor de: exactitud As = 4.6% y Se = 1.7%; precisión As = 3.78% y Se = 2.39%, estos me indican el porcentaje de error y la variación entre los resultados analíticos obtenidos y las replicas de la misma muestra.
- La determinación de fluoruros por ion selectivo, es considerado un método directo, rápido y económico, debido a que las muestras no necesitan un tratamiento previo para su análisis, a demás que permite medir los compuestos individualmente. De acuerdo con los valores obtenidos el porcentaje de recuperación fue del 97.64%, lo cual indica que el método estudiado es bueno, y en condiciones óptimas y apropiadas, el método de ión selectivo se puede ser aplicado a todo tipo de muestras de agua.
- Con los resultados obtenidos en la caracterización físico-química y microbiológica, se llevo a la conclusión que los pozos presentan cantidades considerables de sales minerales, algunos metales como hierro y plomo, y una pequeña presencia de fluoruros. A demás con microorganismos de tipo aerobio mesófilo.
- Al comparar los resultados obtenidos con los decretos 1594/84 y 475/98, se observó que el pozo de Llano Grande presenta valores por encima de los establecidos en las normas para los siguientes parámetros: cloruros, plomo, nitratos, sólidos totales, alcalinidad, conductividad y aerobio mesófilos. Indicando que esta agua subterránea no puede ser consumida directamente, sin antes realizar un tratamiento adecuado.
- En el pozo de Bucarica los parámetros que sobrepasan los valores permisibles de acuerdo con los decretos 475/98 y 1594/84 son: turbiedad, alcalinidad, aerobio mesófilos y fluoruros. Por lo tanto con estos resultados se sugiere que este pozo requiera de un tratamiento convencional, o mínimo una desinfección o llevarlos a diluciones considerables.

5. RECOMENDACIONES

- En el método de generador de hidruros es necesario establecer los parámetros instrumentales de trabajo, especialmente en la presión de los gases y la temperatura de la celda.
- Comparar la técnica de ion selectivo con otros métodos de análisis como la cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC), para verificar su exactitud y precisión.
- Realizar un muestreo periódico a cada pozo para tener un seguimiento, a los parámetros físico-químicos y microbiológicos, que permita determinar la calidad del agua subterránea y sus posibles tratamientos.
- A partir de los resultados de la evaluación de contaminación en el agua subterránea, se recomienda la implementación de medidas de control, especialmente para detectar arsénico, selenio y fluor, ya que actualmente no son analizadas.
- A demás se recomienda identificar las fuentes de contaminación del agua subterránea, para tratar de implementar medidas de prevención de la contaminación. De igual forma iniciar la evaluación del riesgo en la salud entre la población expuesta a estos contaminantes.

6. BIBLIOGRAFIA

1. **ABSORPTION** Spectrophotometry. Second Edition El Perkin-Elmer Corporation. 1993. p 4-3 a 4-5
2. **AGUILAR, PATRICIA**, Validación del Metodo Potenciometrico por Ion Selectivo para Determinación de Flúor en Sal, Agua y Orina, Tecnologia de Alimentos y Agroindustria, División de Química, Lima, Perú, 2001.
3. **ALARCON**, William. VII Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente y IV Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. EL AGUA SUBTERRÁNEA. Cartagena, Colombia. 2000
4. **ARMIJO**, M., Martin J., Armijo F. Contenido en ión fluor de algunas aguas mineromedicinales utilizadas frecuentemente como aguas de mesa. Anal Bromatol 1976; 28: 179-182.
5. **ARTICULO INTERNET**, Envioremental Health Criteria Serie, ICPS, Arsenic No 224, 1999.
6. **ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS, AOAC**, Fluoride in Water, Colometric Method, 1995.
7. **ASTDR**. Agency for Toxic Substances and disease registry.
8. **BEATY**, Richard D; kerber, Jack D. Concepts, Intrumentation and Technique Atomic
9. **CADENA**, Sandra M; Mancera, Luz S. Estandarización y Validación de Técnicas para el análisis de algunos parámetros fisico-quimicos del agua potable. 2002 p 19-33.
10. **COX**, Charles. Practica y Vigilancia de las Operaciones de Tratamiento de Aguas. Bogota. 1999. pp 303-306.
11. **COY**, Gurstavo A. Protocolo Estandarización de Metodos analíticos. Programa de fisico-quimica ambiental. Bogotá. 1999.

12. **DELGADO**, Carlos I. Química de las aguas subterráneas y su importancia. Ingeominas. Bogota. 1956
13. **DENNIS**, McQuillan, Anna Richards, y Jennifer Parker, El Agua Subterráneas un Tesoro para México. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unido. 2002
14. **DIWZEMANN**, W. Aguas Subterráneas en Bogota y sus alrededores. Informe No 1707 del Instituto Geológico Nacional. 1998
15. Enciclopedia Microsoft Encarta 98
16. **FORSTNER**, U and Wittmann G.T., Metal Pollutionin the aquatic environment. Srpingler-Verlag berlin heidelberg. New York. 1.979. 475 p.
17. **GALBRAITH**, N.S., N. J. Barret y R. Stanwell Smith, Water and disease after Croydon: a review of water borne and water associated disease en the UK 1937-86, Journal of the Institution of Water and Environmental Manageent 1: pp. 7-21
18. **GARCIA**, Marta; Dario S. Félix; Rodrigo, Marin. El Agua.
19. **GAVIRIA**, Luis Enrique; Calderon, Carlos Eduardo. Manual de metodos analíticos para el control de la calidad del agua. Instituto Colombiano de normas tecnicas, 9-10p.
20. **GUIA TECNICA COLOMBIANA GTC 30**, Gestión Ambiental, Suelos. Guía para el Monitoreo de Aguas Subterráneas, 6-10p [22]
21. **HUNTER**, C; Perkins, J; Tranter, J and Hardwick, P. 2000. Fecal bacteria in the water of and upland area in Derbishire, England; The influence of agricultural land use. J. Environ. Qual. 29: 1253-1261.
22. **MANUAL** de Instrucciones electrodo de fluoruro. Termo Orion. 2001. pp 33-38
23. **MANUAL DE PROCEDIMIENTOS**, Evaluación Estadística de Métodos Analíticos, Departamento de Control de Calidad, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 3-30p.

24. **MARTÍNEZ** Vidal J.L. Calidad y contaminación de aguas subterráneas: Los sistemas acuíferos del Campo de Dalías y Cuenca del Andarax. Actas del 1º y 2º Seminario del Agua. I.E.A. Almería (1997).
25. **MILLAN**, Moleon MT, Galvez Diaz AJ, Gomez Gracia E, Garcia Rodriguez A, y Fernandez-Crehuet Navajas J. Analisis del Coste-Beneficio de la fluoración de las aguas de abastecimiento de la ciudad de Málaga. Universidad de Granada. Gac Sanit 1991; mar.-abr.; : 82-86.
26. **MILLER**, J.C, Estadística para Química Analítica, Addison, Wesley, Iberoamericana, 27. Argentina, 1993.
28. **NELL** A. y Sperr W. Analysis of the fluoride content of drinking water in Austria. Abteilung fur Zahnerhaltung, Universitatsklinik fur Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Wien. Wien Klin Wochenschr 1994; 106 (19): 608-614.
29. **O'MULLANE** D.M. Systemic fluorides. Oral Health Services Research Centre, University Dental School. Cork (Ireland). Adv. Dent. Res. 1994; jul.; 8(2): 181-184.
30. **ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD**, Instituto Internacional de Ciencia de la Vida. Conocimiento Actual de Nutrición. Sexta Edición. Washington. 1991.
31. **PERKIN ELMER**, Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy. 1981.
32. **PERKIN ELMER**, Manual de Operación Espectrofotómetro de Absorción Atómica.
33. **PERKIN ELMER**, Manual de Operaciones MHS-10. 1981. 2-2 a 2-3 p.
34. **PRICE**, Michael; Agua Subterránea. Editores Noriega. 2003
35. **PROGRAMA** de Explotación de Aguas Subterráneas. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. 2003
36. **SÁNCHEZ**, A. y Robles M.P. Fluor y salud. Análisis del contenido de fluoruro en las aguas de consumo de la provincia de Salamanca. Salamanca: COF; 1989.

37. **SCHAMSCHULA**, R.G. y Barmes D.E. Fluoride and Health: dental caries, osteoporosis and cardiovascular disease. Ann Rev Nutr 1981.
38. **SERJEANT**, E.P, Potenciometry and Potenciometric Titrations, New York, 1984.
39. **Sin Autor**. University of Florida. Cooperativa Extension Service. Institute of food and Agricultural Sciences.
40. **STANDARD** Methods for the examination of water and wasterwater. American Public Health Association. 18th edition. 1995.
41. **TODD**, D.K, Groundwater hydrology, 2^a. Ed. Nueva York, Wiley.
42. **U. S. ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY**. 1986. Ambient water quality criteria for bacteria – 1986. EPA/440/5-84-002. USEPA, Office of Water Regulation and Standards. Washington, D.C, USA.
43. **VALENCIA**, Jorge A. Teoría y practica de la purificación del agua. ACODAL. Mc Graw Hill. Bogotá. Colombia. 2000
44. **VIÑUELA**, Enedina L. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ELEMENTOS TRAZAS EVALUACIÓN SEGÚN CODEX ALIMENTARIUS.
45. www.eccentrix.com/members/hidrogeologie.

ANEXO A
RELACIÓN DE POZOS PROFUNDOS CONSTRUIDOS

Hasta el momento se han investigado los siguientes pozos profundos construidos en el Área de Bucaramanga:

Pozo No.	Localización	Profundidad (mts)	Caudal aproximado Obtenido (Lps)	Observaciones
1	Asovicrist	125		Aparece formación de Girón a 80 metros.
2	Portería de Ruitoque Condominio	190	<1	Perforación a través de la misma formación
3	Coca-Cola	170	-	No apareció roca
4	Freska Leche	65	1	No apareció roca
5	Terpel-Chimitá	-	1.5	Saltante
6	Jardín de los Cesares	50	2.5	No apareció roca
7	Santandereana de Aceites	60	1.8	No apareció roca
8	Metrocentro (Éxito)	125	7.5	No apareció roca
9	La Aurora	48	1.5	
10	La Pedregosa	50	Seco	Apareció roca
11	Calle 48 Carrera 32	30	-	No se encontró roca
12	Palenque	50	-	Saltante
13	Estación Ciudad Bonita	60	10	
14	Terminal Transportes	60	0.15	
15	Parqueadero Palenque	47	0.06	

Ingeniería de Suelos Ltda. Calle 41 No 28-33 Bucaramanga Teléfonos: 6341255-6324888 E-mail: erosion@epm.net.co	Explotación de Aguas Subterráneas – Bucaramanga Asesoría Geotécnica	Pág. 38
---	--	------------------------------

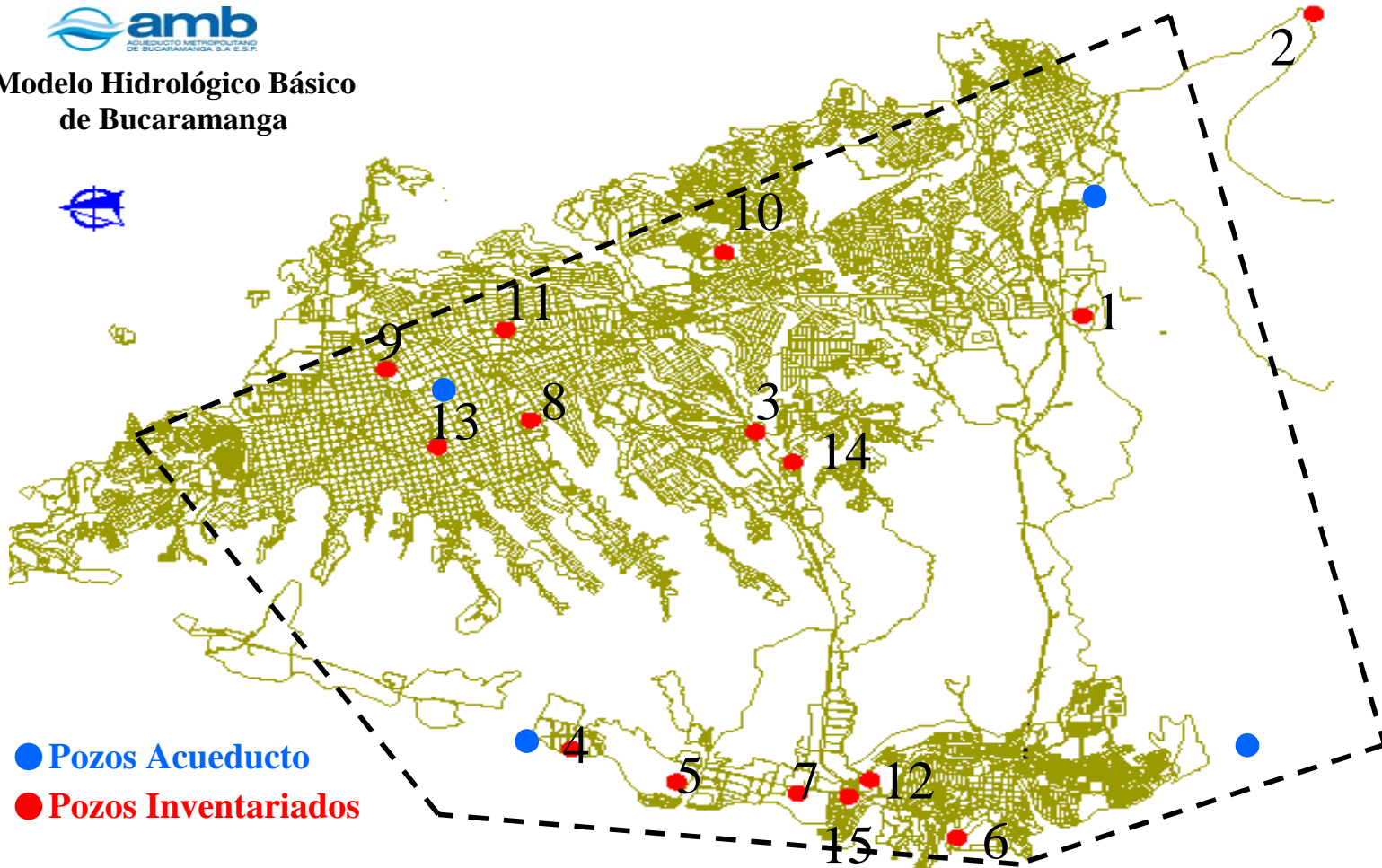
ANEXO B

MAPA.

LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA ANALIZADA DE BUCARAMANGA.



Modelo Hidrológico Básico
de Bucaramanga

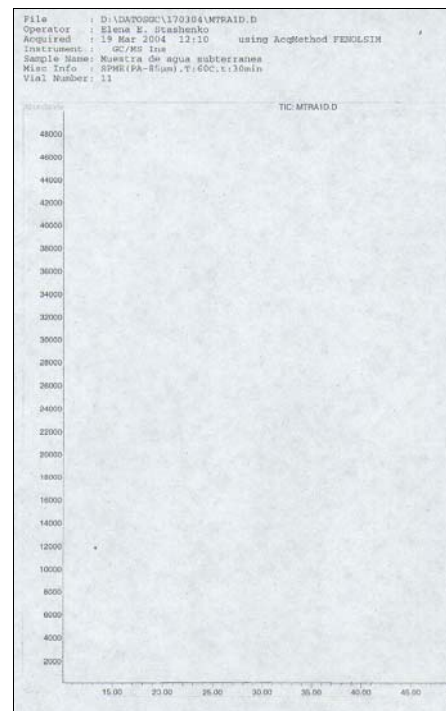
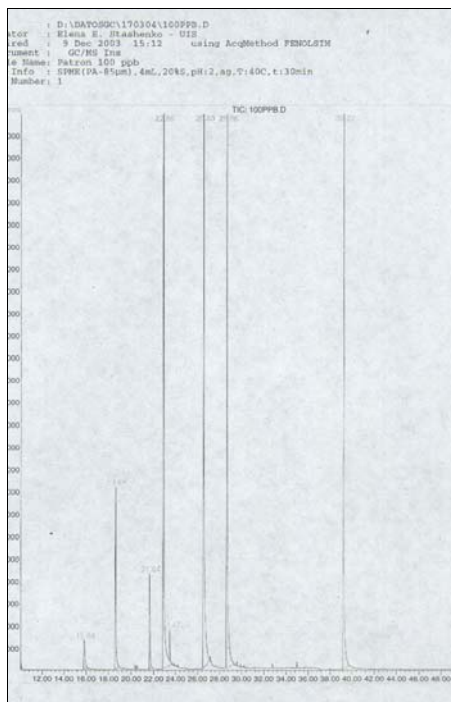


ANEXO C

TABLA DE RESULTADOS EN LA DETERMINACIÓN POR SPME/HRGC-MSD/SIM DE FENOLES EN LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA - POZO DE BUCARICA.

LABORATORIO DE CROMATOGRAFÍA- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
Tabla 4. Determinación por SPME/HRGC-MSD/SIM de fenoles en una muestra de agua identificada como "Muestra de agua subterránea – Pozo Bucarica", enviada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.		
Compuesto	Muestra de agua subterránea	
	Individual	Promedio
Fenol	< 32.2 ¹ < 32.2 ²	< 32.2
o-Cresol	< 3.5 < 3.5	< 3.5
o-Nitrofenol	< 5.1 < 5.1	< 5.1
2,4-Diclorofenol	< 0.5 < 0.5	< 0.5
4-Cloro-3-metilfenol	< 0.8 < 0.8	< 0.8
2,4,6-Triclorofenol	< 0.3 < 0.3	< 0.3
4-Nitrofenol	< 125.0 < 125.0	< 125.0
2-Metil-4,6-dinitrofenol	< 94.1 < 94.1	< 94.1
Pentaclorofenol	< 0.5 < 0.5	< 0.5
¹ Medición 1 ² Medición 2		
<p>En el Anexo, se adjuntan las corrientes iónicas reconstruidas (cromatogramas) de los extractos obtenidos por SPME (PA-85 µm) y analizado por HRGC-MSD/SIM de la muestra de agua, blancos de la fibra, vial y agua, así como una mezcla patrón de fenoles y las curvas de calibración.</p>		
Carrera 27 – Calle 9, Ciudad Universitaria, Edificio Camilo Torres: 201-204, Teléfono: (0X7) 634 4000 Ext. 2471. Línea directa: (0X7) 645 6737 Fax: (0X7) 635 8210. Celular: (315) 879 3865. A.A. 678 Bucaramanga, Colombia. E-mail: elena@tucan.uis.edu.co, rene@tucan.uis.edu.co		

ANEXO D
CROMATOGRAMAS DE CORRIENTES IÓNICAS DE LOS EXTRACTOS
OBTENIDOS POR SPME (PA-85µM) DE LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- POZO BUCARICA Y AGUA, ANALIZADOS POR HRGC-MSD/SIM.



ANEXO E

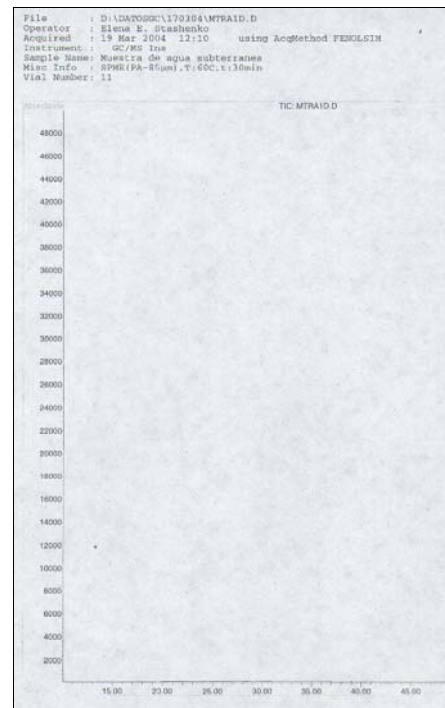
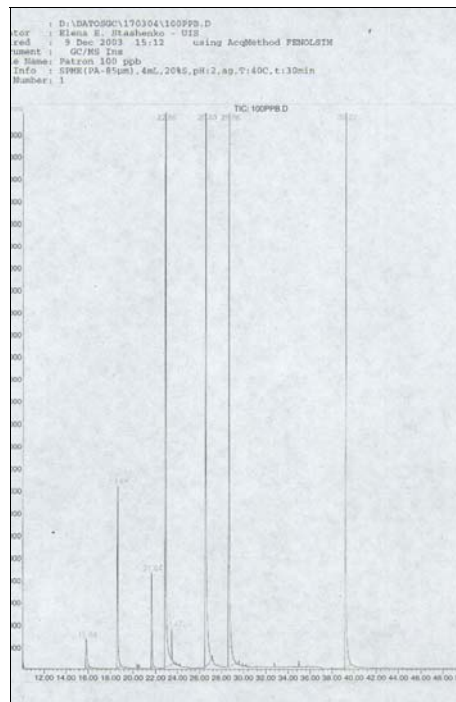
TABLA DE RESULTADOS EN LA DETERMINACIÓN POR SPME/HRGC-MSD/SIM DE FENOLES EN LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA - POZO DE LLANO GRANDE..

LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
Compuesto	Muestra de Agua Subterránea	
	Individual	Promedio
Fenol	<32.2 ¹ <32.2 ²	<32.2
o-Cresol	<3.5 <3.5	<3.5
o-Nitrofenol	<5.1 <5.1	<5.1
2,4-Diclorofenol	<0.5 <0.5	<0.5
4-cloro-3-metilfenol	<0.8 <0.8	<0.8
2,4,6-Triclorofenol	<0.3 <0.3	<0.3
4-Nitrofenol	<125.0 <125.0	<125.0
2-Metil-4,6-dinitrofenol	<94.1 <94.1	<94.1
Pentaclorofenol	<0.5 <0.5	<0.5

¹ Medición 1 ² Medición 2

Carrera 27 – Calle 9, Ciudad Universitaria, Edificio Camilo Torres: 201-204, Teléfono: (0X7) 6344000 Ext. 2471.
 Línea directa: (0X7) 6456737 Fax: (0X7) 6358210. Celular: (315) 879 3865. A.A. 678 Bucaramanga, Colombia.
 E-mail: alana@tiscali.us.edu.co, rene@tiscali.us.edu.co

ANEXO H
CROMATOGRAMAS DE CORRIENTES IÓNICAS DE LOS EXTRACTOS
OBTENIDOS POR SPME (PA-85 μ M) DE LA MUESTRA DE AGUA
SUBTERRÁNEA – POZO LLANO GRANDE Y AGUA, ANALIZADOS POR HRGC-
MSD/SIM.



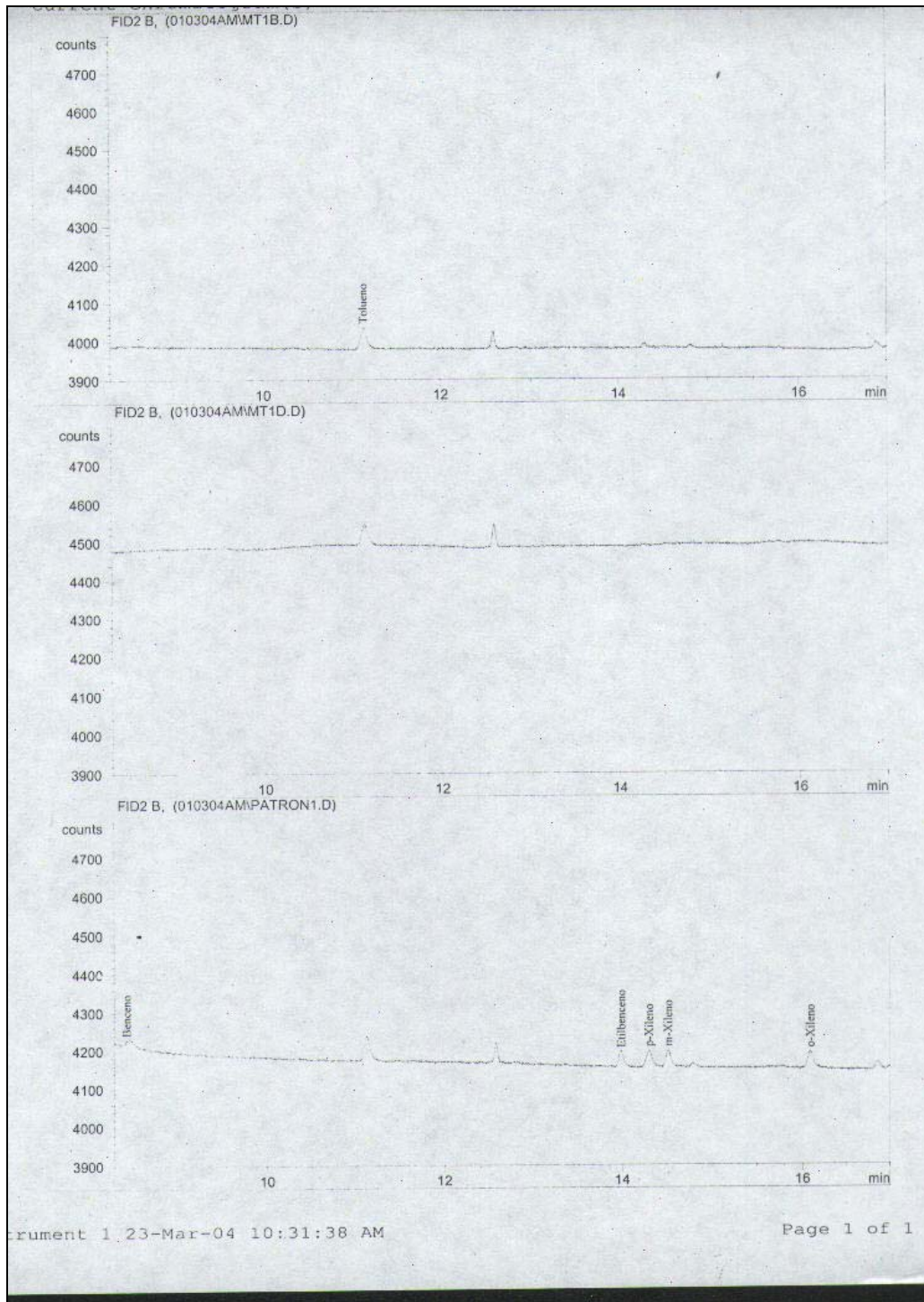
ANEXO G

TABLA DE RESULTADOS EN LA DETERMINACIÓN POR S-HS/HRG/FID DE BTEX'S EN UNA MUESTRA DE AGUA IDENTIFICADA COMO "MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA – POZO BUCARICA", ENVIADA POR EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA.

LABORATORIO DE CROMATOGRAFÍA- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
<p>Tabla 3. Determinación por S-HS/HRGC/FID de BTEX 's en una muestra de agua identificada como "Muestra de agua subterránea", enviada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.</p>		
Compuesto	Muestra de agua subterránea, µg/L	
	Individual	Promedio
Benceno	$< 2.3^1$ $< 2.3^2$	< 2.3
Tolueno	6.54 6.34	6.3 ± 0.1
Etilbenceno	< 2.3 < 2.3	< 2.3
p-Xileno	< 2.1 < 2.1	< 2.1
m-Xileno	< 2.1 < 2.1	< 2.1
o-Xileno	< 2.0 < 2.0	< 2.0
¹ Medición 1 ² Medición 2		
<p>En el Anexo, se adjuntan los cromatogramas obtenidos por S-HS/HRGC/FID de la muestra analizada (por duplicado), el blanco del agua, un patrón de 5 ppb, junto con las curvas de calibración para cada uno de los BTEX 's.</p>		
Carrera 27 – Calle 9, Ciudad Universitaria, Edificio Camilo Torres: 201-204, Teléfono: (0X7) 634 4000 Ext. 2471. Línea directa: (0-7) 645 6737 Fax: (0-7) 635 8210. Celular: (315) 879 3865. A.A. 678 Bucaramanga, Colombia. E-mail: elena@tucan.uis.edu.co, rene@tucan.uis.edu.co		

ANEXO H

CROMATOGRAMAS OBTENIDOS POR S-HS/HRGC/FID DE LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA – POZO BUCARICA (POR DUPLICADO) Y UN PATRÓN DE 5 PPB.



ANEXO I

TABLA DE RESULTADOS EN LA DETERMINACIÓN POR S-HS/HRG/FID DE BTEX'S EN UNA MUESTRA DE AGUA IDENTIFICADA COMO "MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA – POZO LLANO GRANDE", ENVIADA POR EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA.

LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

TABLA 4. Determinación por SPME/HRGC-MSD/SIM de BTEX's en una muestra de agua identificada como "Muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande", enviada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

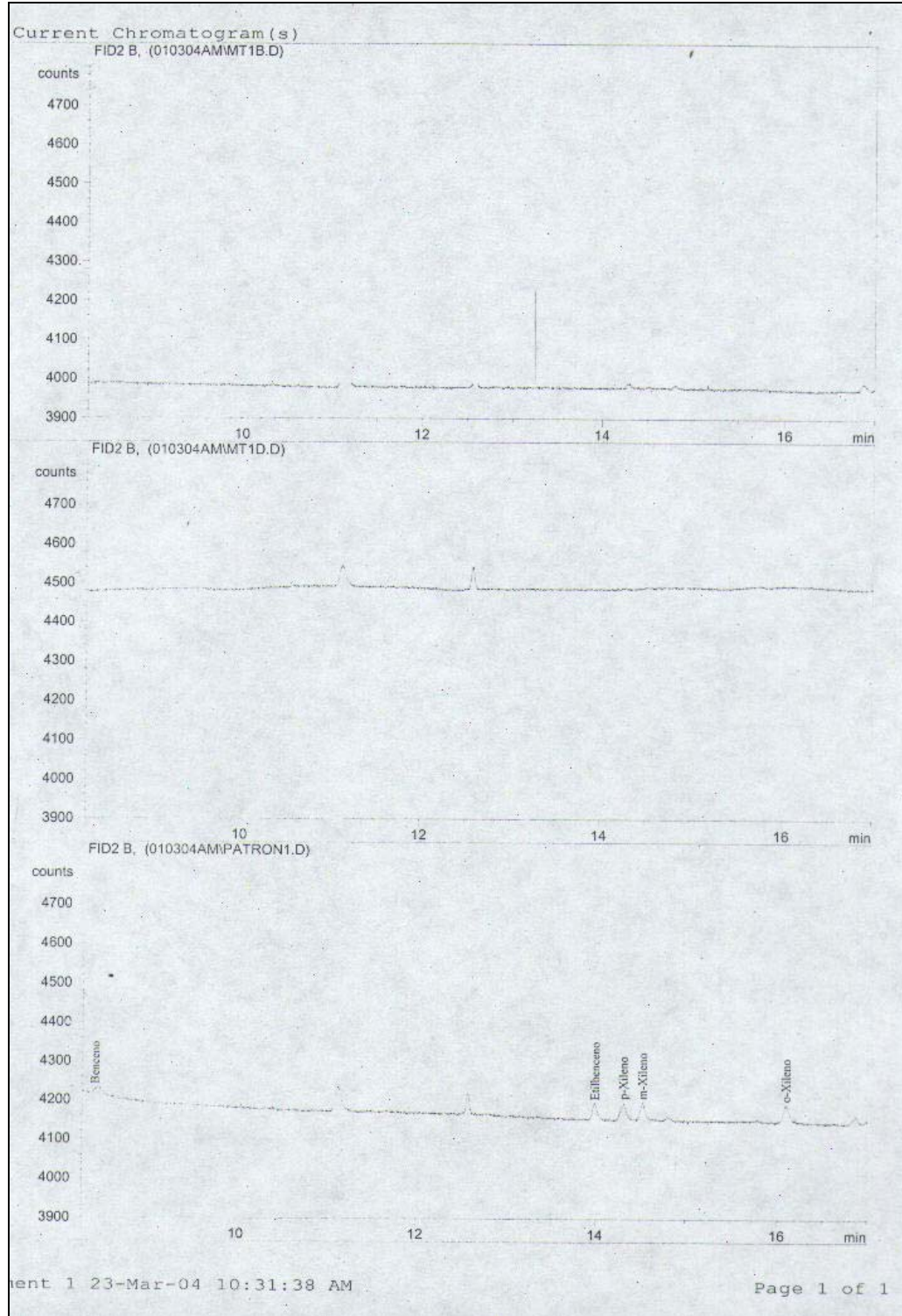
Compuesto	Muestra de Agua Subterránea	
	Individual	Promedio
Benceno	<2.3 ¹	<2.3
	<2.3 ²	
Tolueno	<2.0	<2.0
	<2.0	
Etilbenceno	<2.3	<2.3
	<2.3	
p-Xileno	<2.1	<2.1
	<2.1	
m-Xileno	<2.1	<2.1
	<2.1	
o-Xileno	<2.0	<2.0
	<2.0	

¹ Medición 1 ² Medición 2

Carrera 27 – Calle 9, Ciudad Universitaria, Edificio Camilo Torres: 201-204, Teléfono: (0X7) 6344000 Ext. 2471.
 Línea directa: (0X7) 6456737 Fax: (0X7) 6358210. Celular: (315) 879 3885. A.A. 678 Bucaramanga, Colombia.
 E-mail: elena@tucan.uis.edu.co, rene@tucan.uis.edu.co

ANEXO J

CROMATOGRAMAS OBTENIDOS POR S-HS/HRGC/FID DE LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA – POZO LLANO GRANDE (POR DUPLICADO) Y UN PATRÓN DE 5 PPB.



ANEXO K

TABLA DE RESULTADOS EN LA CUANTIFICACIÓN DE PESTICIDAS
ORGANOCORADOS PRESENTES EN LA “MUESTRA DE AGUA
SUBTERRÁNEA – POZO BUCARICA”.

LABORATORIO DE CROMATOGRFÍA- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

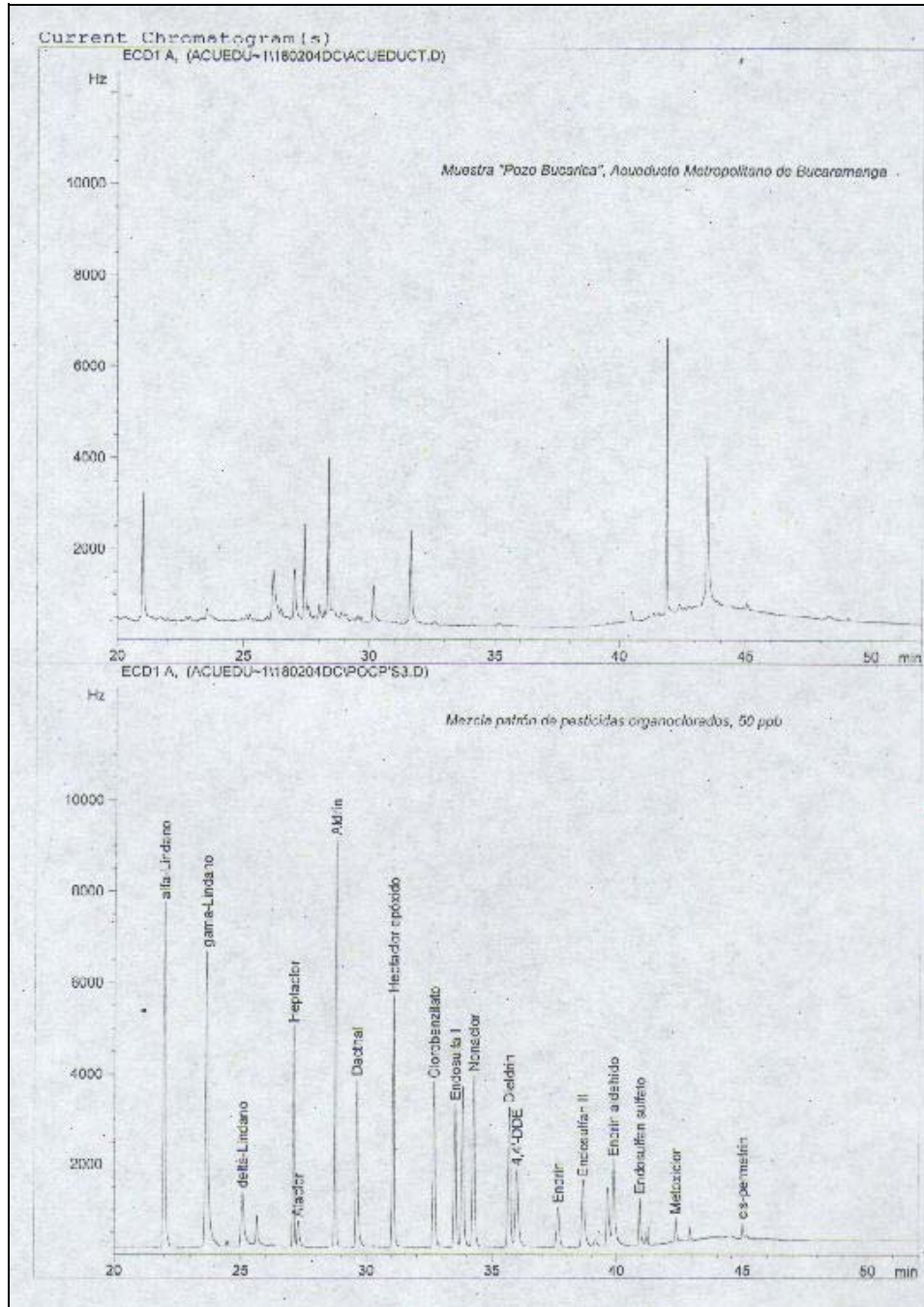
Tabla 3. Cuantificación de pesticidas organoclorados presentes en la muestra agua, enviada por la empresa Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

Pesticidas organoclorados	Concentración (ng/L) de pesticidas organoclorados en la muestra de agua analizada
α -Lindano	< 2.5
β -Lindano	< 12.5
γ -Lindano	< 2.5
δ -Lindano	< 5.0
Clorotalonil	< 125
Heptaclor	< 5.0
Alaclor	< 125
Aldrin	< 2.5
Dacthal	< 5.0
Heptaclor epóxido	< 2.5
Endosulfan I	< 2.5
Clordanos (<i>cis</i> - + <i>trans</i> -)	< 2.5
Nonaclor	< 2.5
Clorobenzilato	< 2.5
Dieldrin	< 5.0
4,4'-DDE	< 2.5
Endrin	< 12.5
Endosulfan II	< 5.0
4,4'-DDD	< 12.5
Endrin aldehído	< 5.0
Endosulfan sulfato	< 5.0
4,4'-DDT	< 25.0
Metoxiclor	< 50.0
<i>cis</i> -Permetrin	< 25
<i>trans</i> -Permetrin	< 125

Carrera 27 - Calle 9, Ciudad Universitaria, Edificio Camilo Torres: 202-204, Teléfono: (0X7) 6344000 Ext. 2471.
Línea directa (0X7) 645 6737. Fax (0X7) 635 8210. Celular: (315) 879 3865. A.A. 678 Bucaramanga, Colombia.
E-mail: elena@tucan.uis.edu.co, rene@tucan.uis.edu.co

ANEXO L

CROMATOGRAMAS DEL EXTRACTO ANALIZADO POR HRGC/ μ -ECD DE LA MUESTRA DE AGUA POZO BUCARICA, OBTENIDO POR EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO CONTINUA, ASI COMO LA MEZCLA DE PATRÓN DE PESTICIDAS ORGANOCORADOS.



ANEXO M

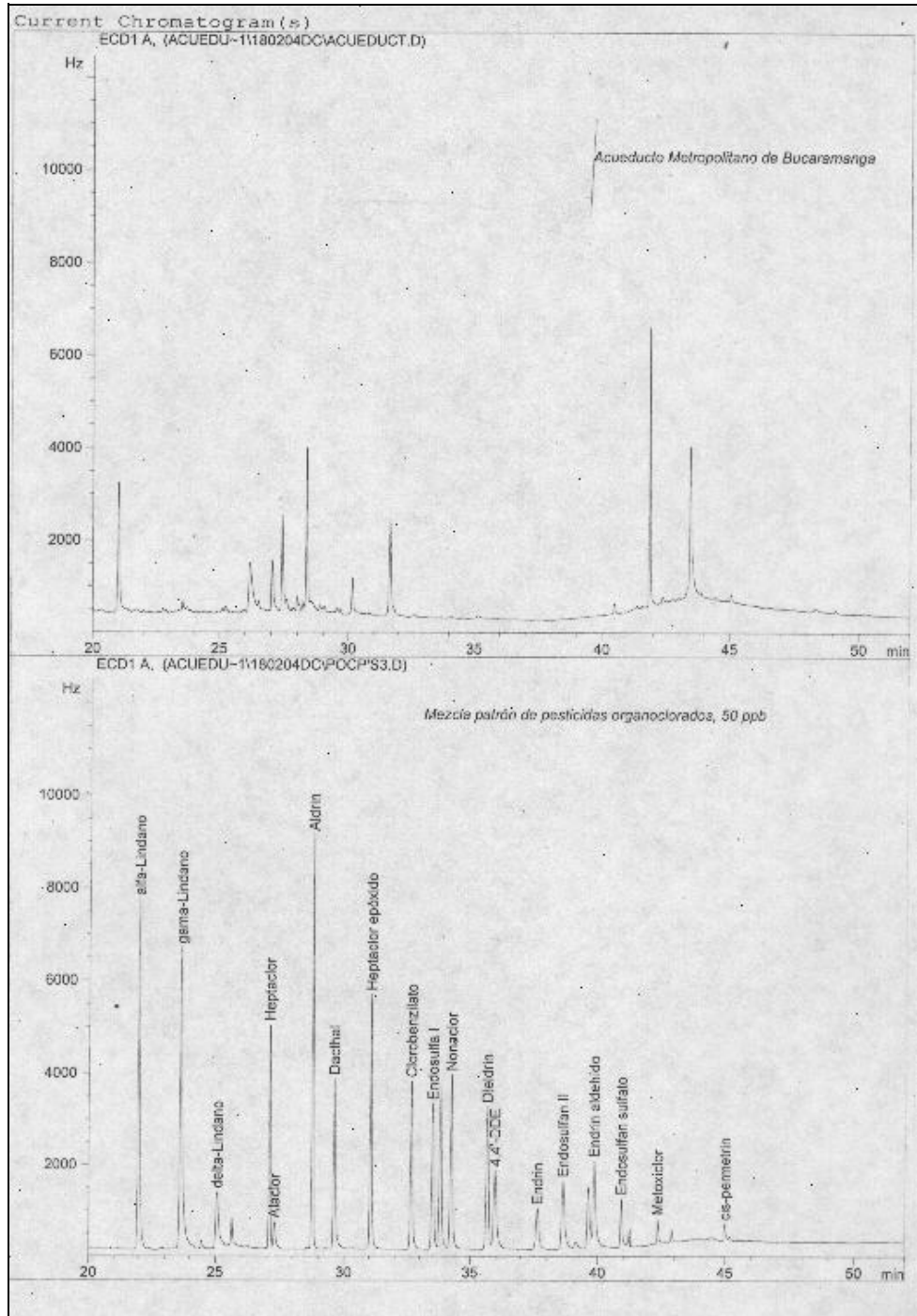
TABLA DE RESULTADOS EN LA CUANTIFICACIÓN DE PESTICIDAS ORGANOCORADOS PRESENTES EN LA “MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA – POZO LLANO GRANDE”.

LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
TABLA 3. Cuantificación de pesticidas organoclorados presentes en la "Muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande", enviada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.	
Pesticidas Organoclorados	Concentración (ng/L) de pesticidas Organoclorados en la muestra de agua analizada
α -Lindano	<2.5
β -Lindano	<12.5
γ -Lindano	<2.5
δ -Lindano	<5.0
Clorotalonil	<125
Heptaclor	<5.0
Alaclor	<125
Aldrin	<2.5
Dacthal	<5.0
Heptaclor epóxido	<2.5
Endosulfan I	<2.5
Clordanos (<i>cis</i> + <i>trans</i>)	<2.5
Nonaclor	<2.5
Clorobenzilato	<2.5
Dieldrin	<5.0
4,4'-DDE	<2.5
Endrin	<12.5
Endosulfan II	<5.0
4,4'-DDD	<12.5
Endrin aldehído	<5.0
Endosulfan sulfato	<5.0
4,4'-DDT	<25.0
Metoxiclor	<50.0
<i>cis</i> -Permetrin	<25
<i>trans</i> -Permetrin	<125
¹ Medición 1	² Medición

Carrera 27 – Calle 9, Ciudad Universitaria, Edificio Camilo Torres: 201-204, Teléfono: (0X7) 6344000 Ext. 2471.
 Línea directa: (0X7) 0456737 Fax: (0X7) 6358210 Celular: (316) 870 3965 A.A. 678 Bucaramanga, Colombia

ANEXO N

CROMATOGRAMAS DEL EXTRACTO ANALIZADO POR HRGC/ μ -ECD DE LA MUESTRA DE AGUA POZO LLANO GRANDE, OBTENIDO POR EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO CONTINUA, ASÍ COMO LA MEZCLA DE PATRÓN DE PESTICIDAS ORGANOCORADOS.



ANEXO O

TABLA DE RESULTADOS EN LA CUANTIFICACIÓN DE PESTICIDAS ORGANOFOSFORADOS PRESENTES EN LA “MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA – POZO BUCARICA”.

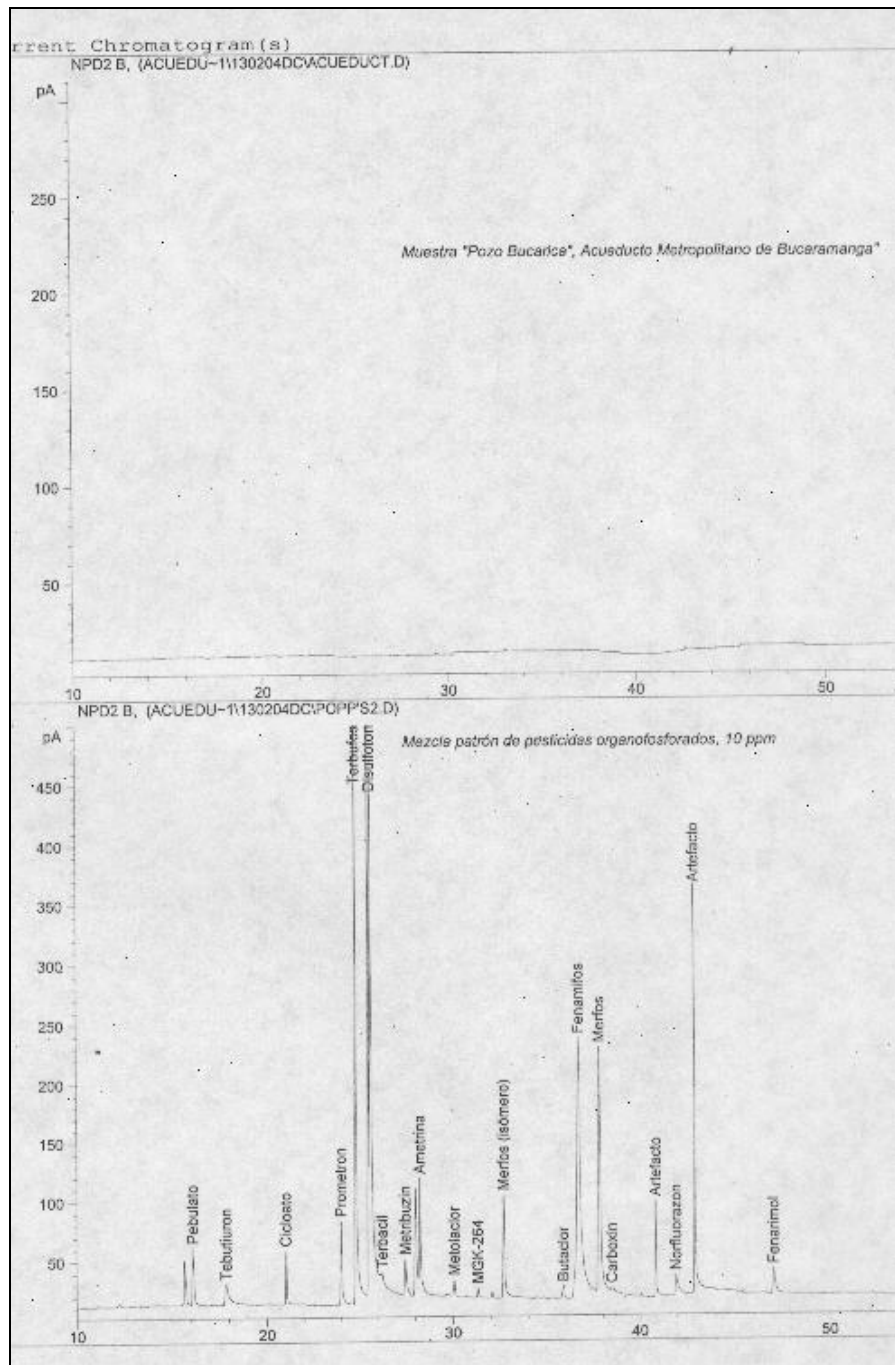
LABORATORIO DE CROMATOGRFÍA - UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Tabla 3. Cuantificación de pesticidas organofosforados presentes en la muestra agua, enviada por la empresa Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

Pesticidas organofosforados	Concentración ($\mu\text{g/L}$) de pesticidas organofosforados en la muestra de agua analizada,
Vernolato	< 0.25
Pebulato	< 0.25
Tebutiurón	< 0.25
Cicloato	< 0.25
Prometón	< 0.25
Terbufos	< 0.25
Diazinón	< 0.25
Disulfotón	< 0.25
Terbacil	< 10
Metribuzin	< 0.25
Simetrin	< 0.25
Ametrin	< 0.25
Metolaclor	< 0.25
MGK-64	< 0.25
MGK-64 (isómero)	< 0.25
Merfos	< 0.25
Butaclor	< 0.25
Fenaminfos	< 0.25
Devrinol	< 0.25
Tributilfosforotritioato	< 0.5
Carboxin	< 0.25
Norflurazón	< 1.2
Fenarimol	< 0.5

ANEXO P.

CROMATOGRAMAS DEL EXTRACTO ANALIZADO POR HRGC/NPD DE LA MUESTRA DE AGUA POZO BUCARICA, OBTENIDO POR EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO CONTINUA, ASÍ COMO LA MEZCLA DE PATRÓN DE PESTICIDAS ORGANOFOSFORADOS.



ANEXO Q

TABLA DE RESULTADOS EN LA CUANTIFICACIÓN DE PESTICIDAS ORGANOFOSFORADOS PRESENTES EN LA “MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA – POZO LLANO GRANDE”.

LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
<p>TABLA 4. Determinación por SPME/HRGC-MSD/SIM de BTEX's en una muestra de agua identificada como "Muestra de agua subterránea – Pozo Llano Grande", enviada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.</p>	
Pesticidas Organofosforados	Concentración (µg/L) de pesticidas Organofosforados en la muestra de agua analizada
Vernolato	<0.25.
Pebulato	<0.25
Tebutiurón	<0.25
Cicloato	<0.25
Prometón	<0.25
Terbufos	<0.25
Diazinón	<0.25
Disulfotón	<0.25
Terbacil	<10
Metribuzin	<0.25
Simetrin	<0.25
Ametrin	<0.25
Metolaclor	<0.25
MGK-64	<0.25
MGK-64 (isómero)	<0.25
Merfos	<0.25
Butaclor	<0.25
Fenamifos	<0.25
Devrinol	<0.25
Tributilfosforotriato	<0.5
Carboxin	<0.25
Norflurazón	<1.2
Fenarimol	<0.5

Carrera 27 – Calle 9. Ciudad Universitaria, Edificio Camilo Torres: 201-204. Teléfono: (0X7) 6344000 Ext. 2471.
 Línea directa (0X7) 6456737 Fax: (0X7) 6356210. Celular: (315) 879 3965. A.A. 678 Bucaramanga, Colombia.
 E-mail: e.ena@tucan.uis.edu.co, rene@tucan.uis.edu.co

ANEXO R
CROMATOGRAMAS DEL EXTRACTO ANALIZADO POR HRGC/NPD DE LA
MUESTRA DE AGUA POZO LLANO GRANDE, OBTENIDO POR EXTRACCIÓN
LÍQUIDO-LÍQUIDO CONTINUA, ASI COMO LA MEZCLA DE PATRÓN DE
PESTICIDAS ORGANOFOSFORADOS.

