

**ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE LOS METALES PESADOS ARSÉNICO Y  
PLOMO EN EL ACUÍFERO DE BUCARAMANGA EN LA ZONA DE  
INFLUENCIA DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EL  
CARRASCO**

**JUAN MANUEL ESPINOSA JIMÉNEZ**

**OMAR ANDRÉS SIERRA ALARCÓN**

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

**2015**

**ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE LOS METALES PESADOS ARSÉNICO Y  
PLOMO EN EL ACUÍFERO DE BUCARAMANGA EN LA ZONA DE  
INFLUENCIA DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EL  
CARRASCO**

**JUAN MANUEL ESPINOSA JIMÉNEZ**

**OMAR ANDRÉS SIERRA ALARCÓN**

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

**Director**

**SULLY GÓMEZ ISIDRO**

**Ingeniera Civil, MSc PhD.**

**Co-Director**

**EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA**

**Ingeniero Sanitario, MSc PhD.**

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

**2015**

## DEDICATORIAS

*A Dios por permitirme cumplir cuanto me he propuesto brindándome los medios y herramientas para lograrlo.*

*A Luis Manuel Espinosa, mi padre, quien dedicó sus mejores días a mi crecimiento y de estar en plena conciencia estaría muy orgulloso del logro obtenido.*

*A Emilse Jiménez, mi madre, incansable mujer que con su ejemplo de gallardía y perseverancia ha logrado ser motivo de orgullo para mí.*

*A Karolth Espinosa, mi hermana, quien caracteriza la grandeza de la mujer santandereana siendo un ejemplo de compromiso y dedicación.*

*A Omar Sierra, mi compañero y amigo en este trabajo, que trabajó junto a mí para poder llegar a obtener un buen resultado.*

*A mis cuatro amigos, acompañantes durante el proceso de formación que hoy nos lleva a ostentar el título de ingenieros civiles.*

**JUAN MANUEL ESPINOSA JIMÉNEZ**

*A Dios por permitir la bendición de culminar mi carrera, él me ha dado la vida y las capacidades para alcanzar cada objetivo; a él sea la Gloria y la honra.*

*A mi madre que es el motivo para mi crecimiento tanto personal como profesional, y que gracias a su esfuerzo y dedicación incondicional ha sido posible llegar hasta aquí.*

*A mi hermano que me impulsa a ser un buen ejemplo y apoyo para su futuro.*

*A toda mi familia por su compañía.*

*A todos mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo en este camino de crecimiento.*

**OMAR ANDRÉS SIERRA ALARCÓN**

## AGRADECIMIENTOS

A los profesores Sully Gómez Isidro y Edgar Ricardo Oviedo Ocaña por la orientación, colaboración y apoyo incondicional otorgado en todo el desarrollo del proyecto.

A la administración de la EDS Caneyes, lavadero El Palenque, Serviteca Los Coches, EDS Insercol y la empresa Prevesa SA. por el apoyo brindado en las visitas de campo.

Al Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático GPH UIS y Geomática UIS de la escuela de ingeniería civil por el préstamo de los equipos utilizados para llevar a cabo el proyecto.

A la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB por el acompañamiento en las visitas de campo.

En general a todos los que hicieron posible la realización de este proyecto.

JUAN MANUEL ESPINOSA JIMÉNEZ

OMAR ANDRÉS SIERRA ALARCÓN

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. MARCO TEÓRICO .....	20
1.1. DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	20
1.1.1. Descripción general.....	20
1.1.2. Subproductos .....	21
1.1.3. Impactos asociados a los lixiviados.....	21
1.1.4. Propagación de contaminantes.....	22
2. ESTADO DEL ARTE DE CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS POR VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	30
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	30
3.1.1. Información hidrogeológica de la zona de estudio.. ..	30

3.1.2.	Sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco.....	32
3.2.	Información preliminar para el estudio de pozos ubicados en área de influencia del vertedero de residuos sólidos El Carrasco.....	33
3.3.	Criterios para la selección de pozos .....	34
3.4.	Salidas de campo .....	35
3.4.1.	Permisos y solicitudes.....	35
3.4.2.	Equipos y materiales.....	35
3.4.3.	Procedimiento de campo.....	37
3.4.4.	Laboratorios para análisis de muestras.....	40
4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
4.1.	Estudio de pozos ubicados en el área de influencia del vertedero de residuos sólidos El Carrasco.....	41
4.2.	Selección de pozos.....	42
4.3.	Evaluación de características y niveles de arsénico y plomo en pozos seleccionados.....	44

5.	CONCLUSIONES .....	50
6.	RECOMENDACIONES .....	51
	CITAS.....	52
	BIBLIOGRAFIA.....	56
	ANEXOS .....	61

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Contaminación de un acuífero por lixiviados de residuos sólidos vertidos en superficie, abatimiento del nivel freático y explotación a la superficie. ....	22
Figura 2 Contaminación de un acuífero por actividades agrícolas.....	23
Figura 3 (Según Deutsch, 1963) flujo inducido hacia un pozo de extracción.....	23
Figura 4 Perfil con dirección Este-Oeste de Estratigrafía.....	31
Figura 5 Mapa de direcciones de flujo de oriente a occidente de los puntos de agua subterránea.....	34
Figura 6 Localización de puntos de agua subterránea .....	41
Figura 7. Planta de localización de pozos seleccionados.....	43

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Tipos de vertederos .....	20
Tabla 2 Características Estratigráficas de la Formación Bucaramanga.....	30
Tabla 3 Tabla de coordenadas de los pozos seleccionados.....	43
Tabla 4 Pozos seleccionados con parámetros fisicoquímicos, contenido de arsénico y plomo .....	44
Tabla 5 Resultados del primer muestreo en campo.....	48
Tabla 6 Resultados del segundo muestreo en campo .....	48
Tabla 7 Resultados de las contramuestras para EDS Caneyes .....	49

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Inventario de puntos de agua subterránea .....	61
Anexo B. Planta-Perfil, El Carrasco-EDS Caneyes.....	64
Anexo C. Planta-Perfil, El Carrasco-EDS Insercol.....	65
Anexo D. Planta-Perfil, El Carrasco-Parqueadero El Palenque.....	66
Anexo E. Planta-Perfil El Carrasco- Prevesa S.A. ....	67
Anexo F. Formato de Campo .....	68

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE LOS METALES PESADOS ARSÉNICO Y PLOMO EN EL ACUÍFERO DE BUCARAMANGA EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EL CARRASCO\*

**AUTORES:** JUAN MANUEL ESPINOSA JIMÉNEZ  
OMAR ANDRÉS SIERRA ALARCÓN\*\*

**PALABRAS CLAVE:** ACUÍFERO, CONTAMINACIÓN, ARSÉNICO, PLOMO, VERTEDERO CONTROLADO, LIXIVIADO.

### DESCRIPCIÓN:

La ciudad de Bucaramanga se localiza al Oriente de Colombia, y genera cerca de 700 ton/día de residuos sólidos que fueron dispuestos en un botadero a cielo abierto hasta 1985 en lo que hoy se conoce como El Carrasco; desde entonces se dio inicio a la construcción de un relleno sanitario que poco a poco fue adquiriendo las características básicas de manejo de gases y lixiviados. La percolación de líquidos lixiviados producto de la disposición de residuos sólidos acumula compuestos contaminantes que están sujetos a la infiltración a través del suelo, hasta alcanzar depósitos de agua subterránea; por esta razón es imprescindible ejecutar un monitoreo del acuífero para conocer el desplazamiento, la evolución y la presencia de los contaminantes. Los resultados de estudios anteriores indican una probable contaminación de las aguas subterráneas del acuífero profundo de Bucaramanga reportando la presencia de metales pesados en pozos profundos localizados en proximidades del relleno sanitario El Carrasco. A partir de inventarios realizados en los años 2011, 2013 y 2014, se hizo la selección de cuatro pozos para tomar muestras de agua subterránea y determinar las probables concentraciones de Arsénico y Plomo en dos periodos, bajo el acompañamiento de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). Los estudios realizados en el presente trabajo, permiten concluir que durante los meses de Agosto y Octubre de 2015 las concentraciones de Arsénico y Plomo son inferiores a los límites establecidos por la normativa colombiana.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Sully Gómez Isidro. Co-Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF THE PRESENCE OF HEAVY METALS ARSENIC AND LEAD IN BUCARAMANGA'S AQUIFER IN THE AREA OF INFLUENCE OF THE SITE OF SOLID WASTE DISPOSAL EL CARRASCO\*

**AUTHORS:** JUAN MANUEL ESPINOSA JIMÉNEZ  
OMAR ANDRÉS SIERRA ALARCÓN\*\*

**KEYWORDS:** AQUIFER POLLUTION, ARSENIC, LEAD, CONTROLLED LANDFILL, LEACHATE.

### DESCRIPTION:

Bucaramanga is located to the east of Colombia, and generates about 700 tons / day of solid waste that were disposed in an open dump until 1985 in what is now known as Carrasco; thence it begins construction of a sanitary landfill that was gradually acquiring the basic characteristics of gas and leachate management. The percolation of leachate proceeds from disposing of solid waste accumulated contaminant compounds that are subject to infiltration through the soil to reach groundwater reservoirs; for this reason it is essential to implement a groundwater monitoring to determine the displacement, evolution and the presence of contaminants. The results of earlier studies indicate potential contamination of groundwater from the deep aquifer of Bucaramanga reporting the presence of heavy metals in deep wells located in close proximity to the landfill Carrasco. From inventories carried out in the years 2011, 2013 and 2014 was made the selection of four of them to take groundwater samples and determine the likely concentrations of arsenic and lead in two periods, under the support of the Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CMDDB). Studies in this paper, support the conclusion that during the months of August and October 2015 the concentrations of arsenic and lead are below the limits established by Colombian regulation.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Civil Engineering School. Director: Sully Gómez Isidro. Co-Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

## INTRODUCCIÓN

La alta generación de residuos sólidos urbanos depositados en botaderos o rellenos representa un riesgo de contaminación a los suelos, al agua y a la salud pública por la proliferación de vectores transmisores de enfermedades [1]. La disposición de residuos orgánicos genera gases y lixiviados productos de la descomposición con un alto poder contaminante. En el caso de los lixiviados, éstos se forman mediante el proceso de percolación de líquidos a través de residuos en proceso de descomposición (basuras) que al fluir recogen compuestos orgánicos volátiles, metales pesados y otras sustancias químicas [2]. El caso de los metales como el Arsénico y el Plomo es de especial interés, porque son cancerígenos, producen efectos sobre el sistema cardiovascular, nervioso periférico, reproductivo y respiratorio, daños en el hígado y en el riñón [3], y generalmente han sido de interés en otros estudios como los reportados por Hossain et al. (2014) [4], Adeolu et al. (2011) [5] y Giacomán & Ponce (2008) [6].

El grado de riesgo de contaminación del agua depende de la construcción del sitio, el tipo y nivel de fragmentación de los residuos, el método de almacenamiento y las condiciones hidrogeológicas e hidrográficas del relleno [7]. En el caso de rellenos sanitarios, lo que se busca es controlar la contaminación a través de sistemas de recolección de los lixiviados, y la aplicación de técnicas de tratamiento. En vertederos a cielo abierto la situación es más compleja y se presenta la contaminación del suelo y de acuíferos mediante la infiltración en el área de influencia.

Los principales problemas de contaminación en los acuíferos son que la contaminación es casi irreversible y los procesos de mitigación de daño son muy costosos [8]. Por lo tanto, es imprescindible incorporar un monitoreo del acuífero

para conocer el desplazamiento, la evolución y presencia de la contaminación, de manera que sea posible determinar fuentes de contaminación y emplear planes de contingencia que permitan reducir el riesgo y la vulnerabilidad del medio.

En Bucaramanga, el sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco, está operando desde el año 1973, recibe los residuos sólidos de los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga, y otros circunvecinos para un total de 11 municipios, y recibe cerca de 743.3 ton/día [9]. Aunque en la actualidad opera como un relleno sanitario, en sus inicios fue operado como un botadero a cielo abierto y se alcanzaron a depositar más de 500 mil toneladas de residuos en forma incontrolada [10] generando impactos sanitarios y ambientales. Los líquidos lixiviados de la descomposición de materia orgánica más vieja, pueden haber contaminado suelos y aguas subterráneas, y aunque en la actualidad se colecta parte de los lixiviados, se pueden continuar presentando infiltraciones al suelo y posteriormente al acuífero profundo de la meseta de Bucaramanga en el área de influencia.

El acuífero profundo de Bucaramanga se encuentra en el miembro órganos y tiene como basamento la formación Girón, es un acuífero libre donde el flujo subterráneo ocurre en dirección Oriente-Occidente y se encuentra en el área de influencia del vertedero El Carrasco. Mapas de amenaza a la contaminación de aguas subterráneas muestran puntos de amenaza alta en la zona del Carrasco, además de pequeños puntos de amenaza alta de lavaderos de carros y cambios de aceite que tienen pozos que permiten el contacto directo con el acuífero, facilitando que el contaminante que genera el peligro de contaminación se traslade o difunda hacia todo el acuífero [11].

Estudios previos reportados por la CDMB muestran valores relativamente altos para parámetros como Arsénico, sulfatos y cloruros en algunos pozos ubicados después del sitio de disposición final según las líneas de flujo del acuífero profundo, valores que sobrepasan los límites establecidos por la normativa Colombiana. Esto muestra la pertinencia en ahondar los estudios ya realizados y evaluar las condiciones actuales de contaminación del agua subterránea de Bucaramanga [12].

El propósito de este estudio es realizar un aporte a la investigación de la contaminación del acuífero profundo de Bucaramanga por lixiviados provenientes del vertedero de residuos sólidos El Carrasco, en los cuerpos subterráneos de agua que existen en la zona de influencia y que representa una amenaza para los elementos del medio ambiente.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS

**1.1.1. Descripción general.** La disposición final de residuos sólidos hace referencia al procedimiento por el cual los materiales considerados como desechos (no cumplen una función con valor económico para la sociedad) son depositados permanentemente en un lugar determinado. La Tabla 1 describe brevemente los tres principales tipos de vertederos para disposición final de residuos sólidos.

Tabla 1 Tipos de vertederos

TIPOS DE VERTEDEROS		
Botadero a cielo abierto	Relleno sanitario	Vertedero controlado
Estos vertederos no tienen ningún tipo de control, están ubicados generalmente en sectores que no representan valores altos para la sociedad, reciben todo tipo de residuos y tienen bastantes inconvenientes con los olores que se producen por la descomposición de los desechos. El botadero a cielo abierto llega a funcionar bien con localidades pequeñas, pero cuando los centros urbanos crecen, tienden a acercarse al vertedero, que al recibir más carga de desechos, genera mayores problemas sanitarios y de contaminación ambiental.	Este vertedero se caracteriza por tener medidas de seguridad o cerramientos, los residuos vertidos en el lugar son confinados con capas de tierra y cuando el volumen del relleno es muy grande se excavan trincheras para depositar los residuos. Una falencia grande que tiene este vertedero, aun teniendo normas operacionales es no se enfoca en los daños que se presentan al ambiente por causa de gases y lixiviados productos de los residuos sólidos.	El vertedero controlado es un sitio de disposición final para residuos sólidos que surge con el fin de proteger las aguas superficiales y subterráneas así como el medio ambiente en general mediante revestimientos, sistemas de recolección y drenaje para lixiviados y controles de gases. En este vertedero no se permite desear residuos industriales peligrosos lo cual controla más los productos tóxicos generados.

**1.1.2. Subproductos.** Los residuos sólidos dispuestos en los vertederos siguen su curso de descomposición, generando como subproductos gases y lixiviados.

Gases. Los principales gases presentes en los vertederos son el metano y el dióxido de carbono, productos de la degradación anaeróbica de residuos orgánicos que se dan de acuerdo a la cantidad de estos residuos en el vertedero y el entorno bioquímico del mismo. Para prevenir explosiones, incendios, daños al ecosistema, malos olores o aumento en los gases de efecto invernadero; existen diferentes procesos y componentes como pozos de gases, motores de turbinas o chimeneas. En algunos vertederos con suficiente tecnología, los gases son usados para recuperar energía [13].

Lixiviados: Según la normativa Colombiana (Decreto 2981 de 2013), el lixiviado es el líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación.

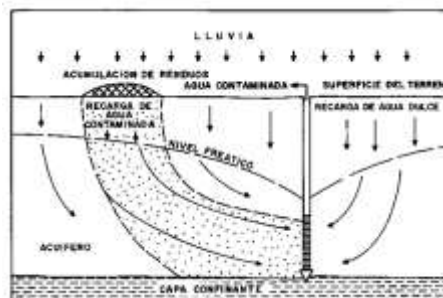
**1.1.3. Impactos asociados a los lixiviados.** Los diferentes procesos de estabilización y descomposición de los residuos sólidos en los sitios destinados a su disposición final, generan alteraciones al entorno en el cual se desarrollan. Dichas alteraciones depende de la cantidad de residuos vertidos, de la configuración geológica e hidrológica del sitio así como la tecnología que el mismo emplee para reducir su impacto.

**1.1.4. Propagación de contaminantes.** Los agentes de contaminación buscan una forma o un mecanismo de propagación en los acuíferos subterráneos. Desde el punto de vista de la forma en que se propaga el contaminante se pueden establecer tres mecanismos que se observan con frecuencia [14].

A través de la superficie del terreno: Los mecanismos de propagación desde la superficie hacen referencia a la contaminación producto de la infiltración y el arrastre de materiales que fueron vertidos sobre un terreno, de agentes químicos usados en la superficie (Fumigos, fertilizantes) y de agua superficial que ha sido contaminada por la acción humana. Uno de los principales mecanismos es la contaminación por el lixiviado producto de la disposición de residuos sobre la superficie (Figura 1), como es el caso de los vertederos controlados, rellenos sanitarios, botadero a cielo abierto, escombreras etc.

El material dispuesto en la superficie, dependiendo de su naturaleza, se transporta por el agua lluvia y según las condiciones del terreno se infiltra hasta la zona saturada sumándose al flujo subterráneo y según sea la conformación del acuífero puede alcanzar cuerpos de agua subterránea.

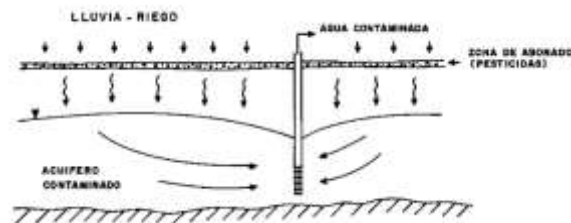
Figura 1 Contaminación de un acuífero por lixiviados de residuos sólidos vertidos en superficie, abatimiento del nivel freático y explotación a la superficie.



**Fuente:** Porras et al. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España, 1985

Cuando se hace uso de algún tipo de agente químico para riego o fumigación como fertilizantes y pesticidas, se presenta una situación en la cual éstos se disuelven con el agua terminando en un proceso de infiltración y originando el riesgo de contaminación en las aguas subterráneas (Figura 2).

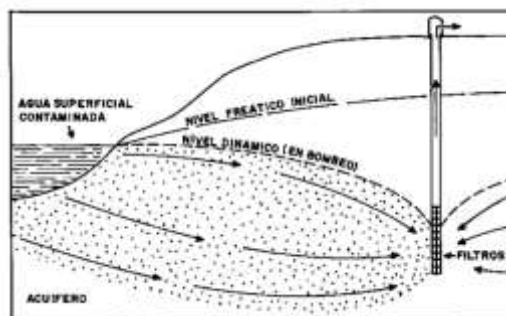
Figura 2 Contaminación de un acuífero por actividades agrícolas.



**Fuente:** Porras et al. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España, 1985

Cuando el nivel freático del acuífero presenta un abatimiento y existe un pozo de extracción, puede darse una inversión de flujo a causa del bombeo que termina captando el recurso de la fuente de agua superficial (río, canal, embalse, etc.); es por esto que si la calidad de la fuente superficial ha sido alterada por acción humana, el agua extraída por el pozo tendrá esa contaminación (Figura 3).

Figura 3 (Según Deutsch, 1963) flujo inducido hacia un pozo de extracción.



**Fuente:** Porras et al. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España, 1985

Desde la zona no saturada: Cuando se usan pozos sépticos o en su defecto las aguas residuales producto de un tratamiento doméstico, las aguas residuales domésticas pueden ser un medio de propagación desde la zona no saturada hasta algún medio saturado que puede ser un acuífero. También se presenta en la industria cuando se tiene lagunas de evaporación o de infiltración en las cuales residuos líquidos son acumulados en excavaciones (artificiales o naturales) o en vertederos (Controlados o no controlados).

Este mecanismo depende primordialmente de factores como la naturaleza del residuo líquido, la geología de la zona, la temperatura, la humedad, la topografía y el sistema subterráneo presente en la zona, que son los que controlan el movimiento de los lixiviados.

Desde la zona saturada: Los pozos de extracción mal diseñados o que no cuentan con un diseño, mal construidos, mal ejecutados o mal controlados; presentan un medio directo de contaminación, además del bombeo excesivo (alteración del comportamiento hidráulico).

## 2. ESTADO DEL ARTE DE CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS POR VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS

El estudio del impacto de los vertederos de residuos en las fuentes de agua subterránea ha sido estudiado en diferentes zonas del mundo.

**Fatta et al. (1999)** [15] estudiaron el impacto del lixiviado en el agua subterránea en el vertedero de Ano Liosia en Grecia. Este vertedero tiene una extensión de 88 Ha y se depositan diariamente 3500 ton de residuos; se encuentra en una zona semiárida con calizas permeables. Se realizaron análisis de muestras de agua incluyendo los parámetros fisicoquímicos pH, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, conductividad eléctrica y de metales pesados. Para el monitoreo se localizaron 3 pozos para monitoreo de aguas obteniendo valores rango para pH de 6.91-7.60, un rango aproximadamente neutro; el rango para conductividad está entre 700 y 4780  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores altos para los 3 sitios; y finalmente las concentraciones de Plomo tienen valores de 0.21-0.39 mg/L, superando el valor límite de 0.05 mg/L.

**Azcuntar (2007)** [16] estudió el impacto del vertedero de residuos sólidos Navarro sobre la calidad de las aguas subterráneas en Colombia (Cali, Valle del Cauca). Es un vertedero ya clausurado que funcionó durante 32 años. Es un vertedero a cielo abierto, los residuos fueron dispuestos indiscriminadamente sin ningún tipo de tecnología durante su vida útil, tiene una extensión de 170000 m<sup>2</sup>, y tiene una altura de 62 m elevándose sobre una topografía relativamente plana. En la zona existen dos sistemas de acuíferos, el primero denominado Unidad A, el más superficial, es un acuífero libre con un espesor de 50 m y tiene alta vulnerabilidad debido a la poca profundidad del nivel freático que está entre 2 y 3 metros, así como la alta

permeabilidad de la zona no saturada. Actualmente se cuenta con una red de monitoreo de 42 pozos. El vertedero tiene un volumen de 15000000 toneladas sobre un suelo semipermeable entre limos y arcillas; la zona saturada es de poco espesor, está constituida de arcilla en una gran zona y de limos y arcillas en otra zona, lo cual hace fácil y rápida la infiltración de lixiviados. Según el estudio la concentración de Plomo es de 0.5-0.15 mg/L, el pH varía entre 8.2-8.8 unidades de pH y la conductividad está entre 7300-13000 S/cm, parámetros elevados, que superan las concentraciones establecidas por el Ministerio de Salud para agua potable.

**Giácoman & Ponce (2008) [6]** evaluaron la contaminación orgánica, bacteriológica y de metales pesados en un vertedero de residuos sólidos a cielo abierto diez años después de su clausura en México (Mérida, Yucatán). Se presenta en la zona suelos de piedra caliza y un acuífero cuyo nivel freático se encuentra a poca profundidad, y debido a esto los lixiviados alcanzan rápidamente las aguas subterráneas. El vertedero, fue un botadero a cielo abierto, sitio que inicialmente fue ilegal y no tuvo en cuenta aspectos tecnológicos para la disposición de residuos sólidos. La vida útil del vertedero fue de 15 años, tenía una extensión de 173619 m<sup>2</sup>. Se localizaron 6 puntos de monitoreo en la extensión del vertedero, con pozos de aproximadamente 40, 45 y 17 m de profundidad. Los parámetros analizados en el laboratorio fueron: Metales Pesados (Hierro, Zinc, Cobre, Mercurio, Arsénico, Plomo, Cromo), Demanda Química de Oxígeno y Coliformes Totales y Fecales. El volumen estimado de residuos fue de 52441000 m<sup>3</sup>. La variación del arsénico estuvo entre 0.214 y 20.03 µg/L, estos resultados muestran que aún hay presencia de arsénico en la zona. La variación de DBO se presentó de 1.65 a 18.61 mg/l, observándose un contenido bajo.

**Reyes et al. (2008) [17]** evaluaron la contaminación en el vertedero Guadalupe Victoria, ubicado en Mexicali mediante el análisis químico de aguas subterráneas,

las descripciones hidrológicas y estudios geofísicos de identificación de una pluma contaminante en un acuífero superficial. El vertedero inicialmente fue un botadero a cielo abierto, tiene una extensión de 40000 m<sup>2</sup>, se presentan suelos de arenas intermedias, limos, lodos arcillas y conglomerados de cantos rodados en la zona. El acuífero tiene un espesor de más de 3 Km, y tiene un nivel freático que varía de 1 a 2 metros. Se localizaron 3 pozos de monitoreo a proximidades del vertedero de residuos sólidos a 6m de profundidad y dos pozos a unos 400 metros con una profundidad de 10 metros. Se analizaron parámetros de conductividad, pH, sólidos disueltos totales y temperatura. Los resultados de conductividad para los pozos cercanos tienen un valor medio de 15.4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y de 4.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los pozos alejados. Los valores de pH están en valores medios de 7.1 para los pozos cercanos, y de 6.9 para los pozos alejados. Los datos geoquímicos corroboran los efectos de los lixiviados de vertedero en las aguas subterráneas, y se identifican dos grupos de aguas subterráneas definidos por la conductividad, la gran diferencia entre 4.24  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 15.4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  está relacionada con la presencia de lixiviados de vertedero.

**Adeolu et al. (2011)** [5] analizaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en las muestras de lixiviados y de aguas subterráneas obtenidas en diferentes puntos adyacentes a un vertedero de residuos sólidos a cielo abierto no diseñado con una extensión de 7.8 Ha. localizado en Lagos, Nigeria. Los estudios se realizaron con el fin de evaluar el impacto de la percolación de lixiviados en la calidad de las aguas subterráneas. Se obtuvieron valores de conductividad eléctrica que superan los límites de tolerancia para el agua potable de la OMS. El lixiviado tiene un impacto mínimo sobre el recurso de agua subterránea y se atribuye a la estratigrafía del suelo existente en el sitio. La geología está compuesta por arcillas que protegen los acuíferos. Se tienen 8 pozos de monitoreo dentro de 500 m de radio del vertedero. Se hicieron análisis de parámetros fisicoquímicos de las muestras incluyendo pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, demanda química de oxígeno,

sodio, sulfato, amonio, hierro, zinc, cadmio, y Plomo. El valor de pH promedio fue de 4.2 estando por debajo de los límites permisibles de la OMS (6.5 a 9.2 para agua potable). No se detectaron Pb ni As en ninguna muestra de agua subterránea, pero sin embargo se observaron niveles altos de esos metales en el lixiviado.

**Abd El-Salam & I. Abu-Zuid (2014)** [18] evaluaron los impactos ambientales asociados con el depósito de residuos sólidos, la lixiviación y la calidad del agua subterránea cerca al vertedero. Los parámetros incluyen conductividad, sólidos totales disueltos, cloruros, sulfatos y metales pesados. Los sitios de disposición de residuos sólidos en la región se le conocen como Borg El-Arab y El-Hammam. Borg El-Arab tiene una extensión de 0.75 Km<sup>2</sup> y El-Hammam tiene una extensión de 1.19 Km<sup>2</sup>. La región de Alejandría tiene una producción de 2700 toneladas/día de residuos y en verano alcanza hasta 3400 ton/día. El muestreo al agua subterránea se hizo mediante dos pozos de monitoreo localizados en el vertedero, perforados alrededor con el fin de controlar el alcance de la contaminación, con una periodicidad de cada dos meses durante un año para un total de 12 muestras de agua subterránea. Se analizaron ocho metales pesados, Níquel, Plomo, Cobre, Manganeso, Cromo, Cadmio, Zinc y Hierro. La conductividad eléctrica estuvo en valores medios de 10354 µS/cm y 12745 µS/cm y un valor máximo de 21500 µS/cm. Los valores de pH mínimos fueron de 7.12 y máximos de 8.1. Se presentó una concentración de Plomo que está en el rango de 0.004 y 0.009 mg/L, con un valor medio de 0.746 mg/L. Las características químicas de los pozos monitoreados muestran que la calidad del agua de los pozos cerca al vertedero sanitario está muy probablemente influenciada por la lixiviación, residuos industriales o la intrusión de agua de mar.

**Hossain et al. (2014)** [4] realizaron análisis físicos, químicos y bacteriológicos de las muestras de lixiviados y de aguas subterráneas en el vertedero en Chittagong,

en Bangladesh para analizar la magnitud de la contaminación del vertedero durante épocas de lluvias. Los parámetros analizados fueron sólidos suspendidos totales, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, análisis del metal arsénico. Se analizaron 3 puntos de monitoreo dentro de un radio de 300 metros, se encontraron concentraciones de OD bajas de 2.45 mg/L, se encontraron concentraciones de 1.7 mg/L de arsénico y concentraciones de 0.007 mg/L de Plomo dando como resultado altos niveles de contaminación por Arsénico y un bajo contenido de Plomo.

En Bucaramanga, mediante la investigación del grupo de investigación GPH UIS, se cuenta con datos de inventarios y localización de pozos de agua subterránea en la zona aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga, pero no se cuenta con estudios sobre la influencia del vertedero de residuos sólidos El Carrasco en la contaminación de los acuíferos presentes en la zona de influencia.

Para evaluar la contaminación de las aguas subterráneas, es importante disponer de pozos de monitoreo que permitan realizar muestreos y análisis de parámetros fisicoquímicos. La información de parámetros fisicoquímicos básicos como pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto sirven como una herramienta para el control de la calidad del agua y son indicadores de contaminación. El incremento de la concentración de metales pesados permite identificar fuentes potenciales de contaminación que generalmente son de origen industrial o lixiviado de vertederos para evaluar la calidad del agua y los riesgos de su uso.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

**3.1.1. Información hidrogeológica de la zona de estudio.** La ciudad de Bucaramanga y su zona metropolitana se encuentra localizada sobre la formación geológica llamada Formación Bucaramanga y un depósito aluvial localizado sobre la formación sedimentaria llamado Formación Girón. En la Tabla 2 se caracterizan los miembros de la Formación Bucaramanga.

Tabla 2 Características Estratigráficas de la Formación Bucaramanga

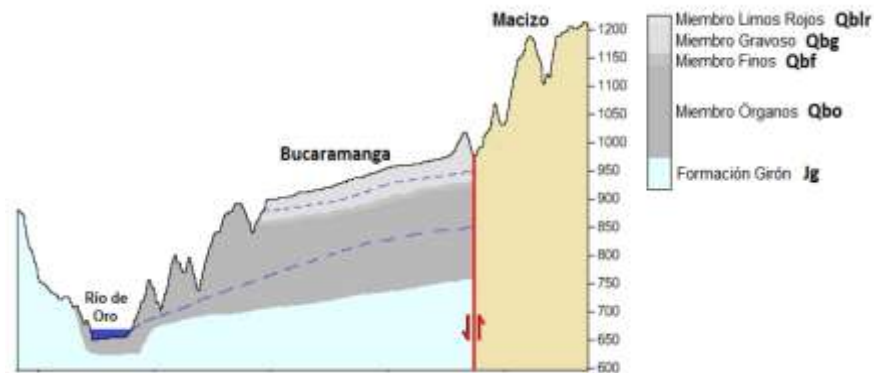
	Miembro	Litología	Espesor Estimado [m]
Formación Bucaramanga	Limos Rojos (Qblr)	Limos y arenas arcillosas y gravosas.	Hasta 5
	Gravoso (Qbg)	Niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos.	8 a 30
	Finos (Qbf)	Alternancia de niveles arcillosos y limosos en la base. Niveles areno-limosos hacia el techo	15
	Órganos (Qbo)	Limos arenosos hacia la base. Gravas, en alternancia con capas y lentes limoarenosos hacia el techo	180

**Fuente:** (Gonzales & Camargo, 2010)

La Formación Girón (Jg) se encuentra constituida por areniscas de grano medio, subangulares a redondeados, mal calibradas y compactas, intercaladas con limolitas violáceas, con baja porosidad primaria; esta formación se considera el basamento de acuíferos en Bucaramanga por las características de baja permeabilidad que tienen sus miembros [19].

En la Figura 4 se ilustra un perfil esquemático con los diferentes miembros y formaciones que componen la geología aledaña a la zona de estudio.

Figura 4 Perfil con dirección Este-Oeste de Estratigrafía



**Fuente:** (Antolinez, 2014)

El acuífero profundo de la Formación Bucaramanga está contenido en el miembro Órganos (Qbo), identificado en esta formación según indagación de sondeos eléctricos verticales, SEV's, distribuidos en la zona, los cuales brindan información aproximada de niveles saturados contenidos en los niveles más gruesos de este miembro.

El miembro Órganos presenta el mayor espesor dentro de la Formación Bucaramanga pudiéndose establecer valores entre los 200 y 300 m. La parte superior de este miembro con resistividades entre los 42 y 533 ohm-m corresponde a los niveles más gruesos y posiblemente saturados. Su espesor varía de 120 a 170 m aproximadamente. La parte inferior del miembro Órganos presenta resistividades entre los 7 y 29 ohm-m que corresponden al material fino poco permeable, con espesor variable entre los 40 y 140 m [19]. El acuífero profundo es un acuífero semi-confinado a confinado, ya que el miembro órganos donde se ubica dicho acuífero,

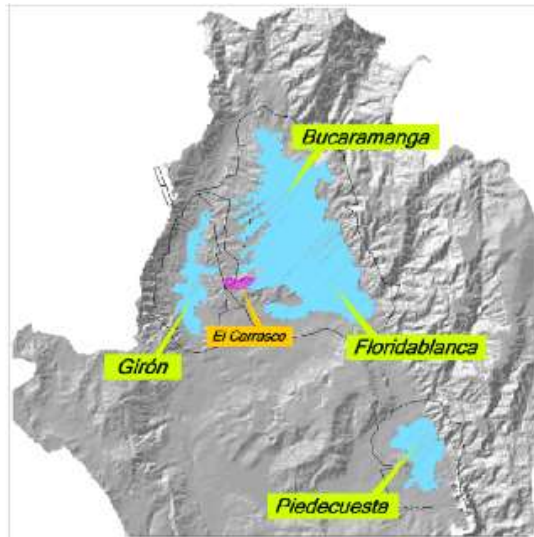
suprayace al miembro finos, siendo éste último con conductividades hidráulicas muy bajas [20].

Basado en el modelo digital de elevaciones de (Antolínez, 2014) [20] se puede identificar que el primer botadero, actualmente conocido como la Cárcava II, se localizó sobre el miembro gravoso donde se encuentra el acuífero superficial y las siguientes cárcavas denominadas I y III se localizan sobre el miembro Finos y Órganos (Anexos B-D).

**3.1.2. Sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco.** En 1973 inició la disposición de residuos sólidos en el botadero a cielo abierto “Malpaso”, mismo sitio que desde 1977 fue denominado como la Cárcava II y que hasta 1985 recibió más de 500 mil toneladas de residuos en forma incontrolada. Después de 1977, bajo la coordinación de Empresas Públicas de Bucaramanga y la CDMB, se realizó el diseño de un relleno sanitario denominado Cárcava I, construida en el año 1985.

Este sitio está ubicado en la parte suroccidental del municipio de Bucaramanga, se encuentra limitado por el barrio El Porvenir hacia el oriente, para llegar al punto es necesario tomar la desviación al oriente en las instalaciones de CENFER. Tiene una extensión de 93.2 hectáreas, en la cual existe una cárcava central y tres cárcavas adicionales (cárcavas I, II, III) así como áreas de administración y mantenimiento, bajo la dirección de la EMAB SA. ESP [10].

Figura 5 Ubicación del sitio de disposición final El Carrasco



Fuente: Grupo Técnico PGIRS AMB

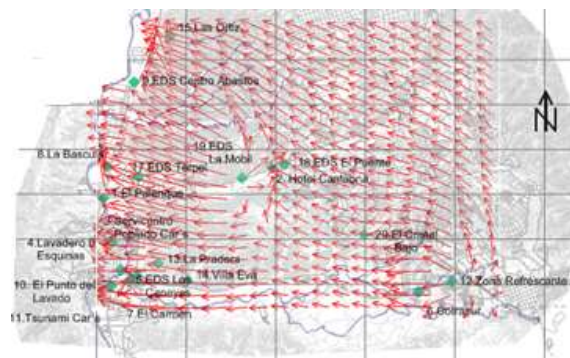
### **3.2. Información preliminar para el estudio de pozos ubicados en área de influencia del vertedero de residuos sólidos El Carrasco**

Se realizó el estudio de los pozos de agua subterránea en el acuífero profundo de Bucaramanga basado en los inventarios de Rodríguez y Torres (2011) [21], Durán (2014) [22] y CDMB (n.d.) [23] los cuales tomaron datos de localización. A partir de esta información se identificó el uso del agua subterránea en cada punto y se consultó si contaban con permiso o concesión de agua ante la entidad gubernamental, además se recopiló la mayor información técnica posible sobre los pozos y parámetros fisicoquímicos básicos obtenidos por el Muestreo De Aguas Subterráneas de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB (2013) [12], los cuales hacen parte de un plan de muestreo cuyo objetivo es el monitoreo de aguas subterráneas por afectación del vertedero El Carrasco. De este análisis se obtuvo una compilación de un listado de pozos de agua los cuales fueron objeto de análisis en el numeral 3.3.

### 3.3. Criterios para la selección de pozos

Tomando como referencia la investigación y caracterización de los pozos del numeral 4.2 se evalúan 3 aspectos: el primero es la ubicación respecto a las líneas de flujo (Figura 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que indican la direccionalidad del flujo del acuífero en sentido Oriente – Occidente, determinándose que tres pozos estarían distribuidos aguas abajo del vertedero El Carrasco y un pozo antes de pasar bajo el área de influencia del vertedero que sería la referencia del estado del agua subterránea. Como segundo aspecto se tiene en cuenta la localización geográfica de los pozos y su cercanía con el vertedero El Carrasco. Finalmente, también se analizan los resultados de parámetros estudiados en un monitoreo por parte de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga [12].

Figura 5 Mapa de direcciones de flujo de oriente a occidente de los puntos de agua subterránea.



**Fuente:** (Durán, 2014)

### 3.4. Salidas de campo

El estudio realizado incluye un reconocimiento físico de los pozos y de mediciones en campo de parámetros indicadores de contaminación de aguas como conductividad eléctrica, pH y Oxígeno Disuelto (OD) en dos salidas de campo. Además de la toma de muestras para el posterior análisis en laboratorio del contenido de Arsénico y Plomo. (El formato de campo utilizado se presenta en el Anexo F).

**3.4.1. Permisos y solicitudes.** Mediante una carta dirigida al Director General de la CDMB, autoridad ambiental que supervisa la utilización de los pozos, se solicita acompañamiento profesional para respaldar los muestreos y se realiza una visita previa a cada pozo para notificar por escrito la visita con dos días de antelación.

**3.4.2. Equipos y materiales.** Los equipos y materiales necesarios para realizar la toma de muestras son los siguientes:

- Recipientes con capacidad de 600mL
- 1 Sonda de Nivel



La sonda eléctrica tipo KLL permite medir el nivel freático en los pozos estudiados. Su rango de medición se extiende hasta los 500 metros y tiene la capacidad de medir el nivel de agua. Su funcionamiento se basa en la emisión de un sonido cuando el tubo metálico en el extremo de la sonda hace contacto con la superficie del agua [24].

- 1 GPS de Mano Trimble® GeoXM™



El GPS empleado para la toma de datos es el Trimble® GeoXM™, de la serie GeoExplorer® 2005, un artefacto con una precisión establecida de 1 a 3 metros según la cantidad de satélites que consiga detectar. Cuenta con una memoria interna de 512 MB expandible mediante memoria externa SD y con software Microsoft® Windows Mobile™ Versión 5.0 [25].

- Oxímetro Portátil con Compensación de Temperatura, Salinidad y Altitud, HI 9146 Con Sonda HI 76407/4F



Este artefacto incluye una dotación de calibración y compensación de temperatura automáticos, es posible medir la concentración de oxígeno disuelto en unidades de [mg/L] (Equivalente a ppm) o en [%]. Para tener una toma confiable es necesario ingresar datos de altitud y compensación de salinidad. La sonda posee un sensor de temperatura así como una membrana impermeable, funciona con un cátodo de platino encapsulado en vidrio [26].

- Medidor de pH y Conductividad HI 991301 con Sonda HI 1288



Con este medidor es posible registrar los valores de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (TDS) y temperatura. La sonda usada tiene una calibración automática y compensación de temperatura que funciona con un LCD de dos niveles [27].

**3.4.3. Procedimiento de campo.** Se realizaron dos salidas de campo para realizar toma de muestras y mediciones de parámetros fisicoquímicos el día 13 de Agosto de 2015 y el día 07 de Octubre de 2015.

El procedimiento seguido en la salida de campo se describe a continuación:



1. Debe encontrarse un punto de captación de agua del pozo que no haya pasado por ningún tipo de filtro o tratamiento.



2. Cada botella es destapada y desocupada, posteriormente se llena en dos ocasiones con agua proveniente del pozo y se sacude para purgarla.
3. Se realiza la captación del agua que va a ser sometida a estudios en el laboratorio y se registra en un archivo la cota y las coordenadas del punto.



4. Adicionalmente, se hace el mismo procedimiento en un vaso con el fin de registrar en campo valores de conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto y temperatura.
5. Los valores de pH, conductividad eléctrica y temperatura se obtienen mediante el Medidor HI 991301, la sonda debe ser purgada previamente con agua destilada, después se introduce en el recipiente que contiene la muestra y se da un tiempo prudente para que los datos se estabilicen.



6. El oxígeno disuelto se obtiene mediante el Oxímetro HI 9146, Antes del procedimiento de análisis, es necesario dar un valor de altitud en el aparato y para este caso, en el que el agua a analizar no tiene un alto contenido de sales, verificar que el valor de salinidad sea cero (0); el aparato se calibra con una exposición total al aire libre para un 100% de oxígeno y posteriormente, se procede a realizar el análisis introduciendo la sonda en la muestra, los valores se registran después de que han sido estabilizados.



7. Una vez finalizado el procedimiento de la toma de muestras, deben mantenerse refrigeradas hasta ser entregadas en laboratorio para su análisis respectivo.

**3.4.4. Laboratorios para análisis de muestras.** El laboratorio que analiza las muestras es el Laboratorio Químico de Consultas Industriales, LQCI, ubicado en la Universidad Industrial de Santander. Para complementar los datos del laboratorio, se realiza el análisis de contramuestras en el laboratorio Servicios Integrados para la Industria del Agro, Minero-Energética y el Medio Ambiente, SIAMA, de las muestras captadas en la Estación de Servicio Caneyes, punto que había registrado el contenido de Arsénico más alto en el estudio realizado por la CDMB en 2013.

## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Estudio de pozos ubicados en el área de influencia del vertedero de residuos sólidos El Carrasco.

Los resultados de la caracterización de los pozos en el área de influencia del vertedero de residuos sólidos El Carrasco se presentan en la tabla del Anexo A. Se identificaron 21 puntos de agua subterránea, 4 pozos están localizados en el municipio de Bucaramanga, 2 en Floridablanca y 15 en Girón; de los cuales se verifica que 10 cuentan con concesión. La localización de los puntos de agua subterránea y de la ubicación del vertedero El Carrasco se realizó mediante el uso del programa ArcGIS, y se muestra en la Figura 7. La captación de 17 puntos se hace mediante bombeo en pozos profundos, 3 puntos mediante cisternas y un solo punto es manantial. El uso más común de los pozos concesionados es para lavado de autos y se confirma que un solo punto es de uso industrial.

Figura 6 Localización de puntos de agua subterránea



Analizando los parámetros fisicoquímicos básicos se observa que la mayoría de los pozos tienen un pH ácido ( $<7.0$ ), excepto el pozo de uso industrial Prevesa S.A que tiene un valor alcalino. El rango mínimo de pH es de 6.27 (EL Cristal bajo) y el máximo es de 7.04 (Prevesa S.A). Los valores de conductividad varían entre 126.2  $\mu\text{S/cm}$  (EDS Zona Refrescante) y 739  $\mu\text{S/cm}$  (El punto del lavado).

#### **4.2. Selección de pozos.**

Las direcciones de flujo o mapa de isopiezas fueron analizados en primera instancia partiendo de la información de niveles estáticos de los pozos inventariados por el grupo GPH [22]. Los datos registrados en los inventarios y muestreos [12] muestran valores considerables en contenido de Arsénico para 4 pozos en particular: EDS Caneyes, Parqueadero Palenque, EDS Insercol y Serviteca Los Coches. El pH de Prevesa S.A tiende a ser alcalino por lo que es un buen indicador de un nivel bajo de contaminación y se selecciona como punto de referencia (Tabla 4). Se seleccionan los pozos EDS Caneyes, Parqueadero Palenque y Serviteca Los Coches porque tienen una posición aguas abajo del vertedero El Carrasco (Anexos B-D) y se encuentran distribuidos uniformemente al Oeste.

El pozo serviteca Los Coches se modifica por el pozo EDS Insercol, porque es una cisterna relativamente superficial que puede interactuar fácilmente con el río de Oro y además se encuentra después del cauce del mismo.

A continuación se presenta la localización general de los pozos de agua subterránea seleccionados (Figura 7) junto con su georeferenciación (Tabla 3).

Figura 7. Planta de localización de pozos seleccionados



Tabla 3 Tabla de coordenadas de los pozos seleccionados

Caso de estudio	Coordenadas		Cota [m]
	Norte	Este	
<b>EDS Insercol - Pozo profundo</b>	1100923	1275383	705
<b>EDS Palenque - Pozo profundo</b>	1274903	1100167	690.7
<b>EDS Caneyes - Pozo profundo</b>	1273320	1100886	700.6
<b>Prevesa SA - Pozo profundo</b>	1273102	1103585	742.5

Tabla 4 Pozos seleccionados con parámetros fisicoquímicos, contenido de arsénico y plomo

Sitio del Pozo →	PREVES A SA.	PARQUEA DERO EL PALENQUE	EDS CANEYE S	SERVITEC A LOS COCHES*	EDS INSE RCO L SA. *
Parámetro ↓					
<b>Temperatura ambiente [°C]</b>	31	34.4	31	31.6	31.7
<b>Temperatura agua [°C]</b>	28	29.7	29.1	28.1	28
<b>pH [Un. De pH]</b>	7.05	6.91	6.93	6.58	6.85
<b>Conductividad [µS/cm]</b>	339	230	208	624	185
<b>Oxígeno disuelto [mgO<sub>2</sub>/L]</b>	5.56	4.73	4.18	1.47	4.29
<b>Contenido de plomo [mgPb/L]</b>	<0,1	<0,1	<0.1	<0,1	<0.1
<b>Contenido de arsénico [µgAs/L]</b>	1.6	1.1	4.2	0.5	0.9

#### 4.3. Evaluación de características y niveles de arsénico y plomo en pozos seleccionados.

Los resultados de laboratorio de metales pesados arsénico y plomo, al igual que los resultados de características fisicoquímicas de pH, conductividad eléctrica,

---

\* La EDS INSERCOL SA. reemplaza para los resultados finales a la SERVITECA LOS COCHES que funciona como una cisterna con un nivel freático de profundidad menor a 4 metros, y no es una muestra representativa de agua subterránea.

temperatura y oxígeno disuelto de las muestras de agua subterránea se muestran en las Tablas 5 y 6.

Los valores de pH del primer muestreo varían entre 6.34 y 6.78 unidades de pH, mientras que en el segundo muestreo varían entre 6.65 y 7.03 unidades de pH; valores un poco más ácidos que los obtenidos en el análisis realizado en el 2013 por la CDMB. Estos resultados muestran un pH ácido que se encuentra dentro de los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), excepto la Serviteca Los Coches que tiene un valor inferior a 6.5; aunque en cuanto a la normativa colombiana todos los pozos se encuentran dentro de los rangos de referencia para la destinación del recurso humano y doméstico, agrícola y pecuario (Decreto 1594). Según Baedecker (1980) [28] y Farquhar (1989) [29] el pH de los lixiviados jóvenes tiende a ser ácido y es variable según el tipo de descomposición que se presenta en el interior de los vertederos [30], y un pH básico reduce la capacidad de disolver sustancias inmovilizando los metales pesados que puedan tener los lixiviados. Estudios anteriores [31] muestran que el agua subterránea es de naturaleza ácida y sus características pueden ser controladas por su entorno geológico. Aunque no es posible afirmar la causa de la acidez presentada en el acuífero profundo de Bucaramanga, se presume que los valores bajos de pH se deben a la generación de lixiviados por parte del vertedero, puesto que aún no ha sido clausurado y parte de los lixiviados jóvenes se infiltra, pudiendo llegar hasta el acuífero y ser así dominante sobre los lixiviados maduros de naturaleza alcalina.

Las concentraciones de Oxígeno Disuelto (OD) en las muestras de agua estudiadas varían desde 2.2 a 4.4 mg/L, con una concentración media de 3.36 mg/L. Estos valores han disminuido respecto a los valores registrados por la CDMB en el año 2013. La EDS Palenque tiene los niveles más bajos de OD, mientras que EDS Insercol presenta los valores más altos (2.26-4.42 mg/L respectivamente). Estos

valores muestran una presencia de  $O_2$  con porcentajes cercanos al 50% de saturación, excepto EDS Palenque que tiene un porcentaje bajo de 32.75% de saturación (2.26 mg/L). Los valores relativamente bajos representan un indicio de contaminación por procesos de oxidación desarrollados por la descomposición de materia orgánica [32] [33]. Sin embargo, no es posible afirmar que el vertedero El Carrasco sea el factor determinante para la alteración presentada. La Organización Mundial de la Salud (OMS) no recomienda ningún valor de referencia basado en efectos de la salud y la normativa colombiana (Decreto 1594) expresa un valor admisible del 70% de concentración de OD para el agua destinada a fines recreativos mediante contacto primario (Inmersión e ingestión accidental).

El comportamiento normal de la conductividad eléctrica en las aguas subterráneas del acuífero profundo de Bucaramanga está en un intervalo entre 200 y 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y tiende a aumentar en la línea de flujo, con el avance en la geología, ya que se presenta la recarga de iones, minerales y sales disueltas presentes en las rocas [34]. Sin embargo; se presentaron valores de conductividad eléctrica cercanos a los 280  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los pozos cercanos al cauce del río de Oro, mientras que se presentaron valores por encima de los 420  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los pozos más cercanos al relleno sanitario El Carrasco. Excepto el valor de la conductividad eléctrica para la Serviteca Los Coches, los valores de la conductividad eléctrica registrados no varían mucho con relación a los valores del muestreo realizado por la CDMB en el 2013, conservando la disminución de este parámetro en zonas aledañas al Río de Oro. Esta variación en la conductividad eléctrica puede ser asociada a la influencia que tiene el río de Oro sobre el acuífero profundo de Bucaramanga, puesto que según la época del año, puede recargar el acuífero, cambiando las propiedades de conductividad y generando un proceso de dilución de contaminantes que estén en el mismo [35].

En este estudio los resultados de Arsénico muestran que para todos los pozos seleccionados y estudiados se tienen concentraciones por debajo del límite de detección del laboratorio de 0.64 µgAs/L (0.00064 mgAs/L). La OMS recomienda un valor de referencia de 0.01 mgAs/L cuya presencia en el agua de consumo puede afectar la salud o hay evidencia de que es peligrosa. La norma colombiana asigna un valor de referencia de 0.05 mgAs/L admisible para destinar el recurso a consumo humano o doméstico, y un valor de 0.2 mg/L para uso pecuario. Los niveles de Arsénico no superan los límites establecidos por la OMS y la norma colombiana.

En este estudio las concentraciones de Plomo están por debajo del límite de detección del laboratorio de 0.21 mgPb/L para todos los pozos objeto de muestreo. La OMS recomienda un valor de referencia de 0.01 mgPb/L y la norma colombiana identifica un valor límite de 0.05 mgPb/L para agua de consumo humano y doméstico, de 5.0 mgPb/L para uso agrícola, y de 0.1 mgPb/L para uso pecuario. Los resultados del contenido de Plomo no son contundentes, pues el rango de detección no permite concluir si hay o no presencia del metal y si se cumple o no con lo estipulado por la OMS ni la norma colombiana. En el estudio realizado por la CDMB durante el año 2013 también se obtuvo un contenido de Plomo inferior al límite de detección que fue 0.1 mgPb/L. Sin embargo se puede observar en los resultados de la contramuestra que el pozo EDS Caneyes tiene concentraciones de Plomo inferiores a 0.05 mgPb/L, es decir que cumple con todos los límites establecidos por la normativa colombiana.

Los resultados del análisis de Arsénico y Plomo para la contramuestra de EDS Caneyes indican un bajo contenido de Arsénico y Plomo (inferior al límite de detección del laboratorio SIAMMA para el Plomo), corroborando la información obtenida en las muestras analizadas.

Tabla 5 Resultados del primer muestreo en campo

Caso de estudio	Toma 1 [13-08-2015]				
	Arsénico [µgAs/L]	Plomo [mgPb/L]	Temperatura [°C]	pH	Conductividad [µS/cm]
<b>Serviteca Los Coches - Cisterna</b>	<0.64	<0.21	29	6.34	747.5
<b>EDS Palenque - Pozo profundo</b>	<0.64	<0.21	29	6.73	259
<b>EDS Caneyes - Pozo profundo</b>	<0.64	<0.21	30	6.5	-
<b>Prevesa SA - Pozo profundo</b>	<0.64	<0.21	28	6.78	581.5

Tabla 6 Resultados del segundo muestreo en campo

Caso de estudio	Toma 2 [07-10-2015]						
	Arsénico [µgAs/L]	Plomo [mgPb/L]	Temperatura [°C]	pH	Conductividad [µS/cm]	Oxígeno disuelto [mg O <sub>2</sub> /L]	Oxígeno Disuelto [%]
<b>EDS Insercol - Pozo profundo</b>	<0.64	<0.21	28.9	7.03	428.5	4.42	52.3
<b>EDS Palenque - Pozo profundo</b>	<0.64	<0.21	29.9	6.82	281	2.265	32.75
<b>EDS Caneyes - Pozo profundo</b>	<0.64	<0.21	30.05	6.65	274	3.34	50.4
<b>Prevesa SA - Pozo profundo</b>	<0.64	<0.21	29.75	6.83	462	3.43	48.9

Tabla 7 Resultados de las contramuestras para EDS Caneyes

Caso de estudio	EDS Caneyes - Pozo profundo	
	Arsénico [ $\mu\text{g As/L}$ ]	Plomo [mg Pb/L]
<b>Toma 1 [13-08-2015]</b>	<1	<0.05
<b>Toma 2 [07-10-2015]</b>	<1	<0.05

## 5. CONCLUSIONES

En el análisis realizado se tuvieron en cuenta parámetros fisicoquímicos que permiten evaluar la calidad del acuífero profundo de Bucaramanga respecto a algunos parámetros en los meses de Agosto y Octubre de 2015. La condición ácida del acuífero determinada por los valores de pH en tres de los 4 pozos muestreados puede ser debida a la presencia de contaminantes provenientes de lixiviados jóvenes del vertedero.

La baja concentración de oxígeno disuelto supone una contaminación a causa de la descomposición de material orgánico, sin embargo, no es posible afirmar que sea en su totalidad causada por lixiviados provenientes del vertedero.

Los valores de conductividad eléctrica aumentan naturalmente en la línea de flujo del acuífero por acción de la recarga de iones, minerales y sales disueltas de las rocas. Sin embargo, este incremento en la zona de estudio se ve alterado en zonas aledañas al río, donde los valores de conductividad eléctrica disminuyen, lo cual evidencia una recarga del río hacia el acuífero, generando posiblemente un proceso de dilución de contaminantes.

El acuífero profundo presenta en los dos periodos analizados bajos contenidos de Arsénico, las concentraciones no superan los límites permitidos por la OMS y la normativa colombiana. El contenido de Plomo es inferior al límite de detección del laboratorio pero no es posible asegurar que también sea inferior al límite establecido por la OMS y la normativa colombiana, por lo cual es probable que exista una baja concentración de este metal.

## 6. RECOMENDACIONES

Estudios previos demuestran que existe un riesgo latente de contaminación para el acuífero profundo de Bucaramanga, razón por la cual se recomienda la planeación y puesta en marcha de un plan de monitoreo que tenga una periodicidad mínima de 4 muestreos anuales en diferentes periodos hidrológicos, que incluyan el análisis de características fisicoquímicas y microbiológicas, contenido de más metales pesados, toma de niveles freáticos, de coordenadas y cotas de los pozos del acuífero profundo de Bucaramanga y nivel de la lámina de agua del Río de Oro para determinar en qué períodos se presenta la recarga del acuífero por parte del río.

Se debe realizar el análisis para la mayor cantidad de pozos posibles en relación con los recursos económicos disponibles. Es necesario tener en cuenta previamente el límite de detección para cada análisis manejado por los laboratorios donde se analicen las muestras, con el fin de obtener valores precisos que permitan comparar los resultados con datos definidos por la normativa existente.[32]

## CITAS

- [1] C. I. Suárez, “Problemática y gestión de residuos sólidos peligrosos en Colombia,” *Innovar Journal, Rev. Ciencias Adm. y Soc.*, no. 15, pp. 41–52, 2000.
- [2] M. Regadío, A. I. Ruiz, M. Rodríguez-Rastrero, and J. Cuevas, “Containment and attenuating layers: An affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution,” *Waste Manag.*, Aug. 2015.
- [3] Friends of the Earth (FOE). (1996). “Citizen’s Guide to Municipal Landfills”, Estados Unidos. GAIA (Global Alliance for Incinerator Alternatives), abril 2004. “Resources up in Flames”, Filipinas. Retrieved from: <http://www.no-burn.org/downloads/Resources%20up%20in%20Flames.pdf>
- [4] M. L. Hossain, S. R. Das, and M. K. Hossain, “Impact of landfill leachate on surface and ground water quality,” *J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 337–346, 2014.
- [5] O. Adeolu, Aderemi, Oriaku Ada, Adewumi Gbeng, “Assessment of groundwater contamination by leachate near a municipal solid waste landfill,” *African J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 5, no. November, pp. 933–940, 2011
- [6] G. Giácoman and M. del C. Ponce, “Contaminación orgánica, bacteriológica y de metales pesados en un vertedero de residuos sólidos a cielo abierto años después de su clausura en Mérida, Yucatán, México,” 2008.
- [7] D. Rapti-Caputo, F. Sdao, and S. Masi, “Pollution risk assessment based on hydrogeological data and management of solid waste landfills,” *Eng. Geol.*, vol. 85, no. 1–2, pp. 122–131, 2006.
- [8] F. Stephen and R. Hirata, Determinacion del riesgo de contaminacion de aguas subterranas, una metodología basada en datos existentes, 2da edició. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, CEPIS, 1991.
- [9] K. M. Noguera and J. T. Olivero, “Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, vol. 34, no. 132, pp. 347–356, 2010.
- [10] UIS and AMB, “Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Área Metropolitana de Bucaramanga.”

- [11] S. Gómez Isidro, F. J. Gutierréz Lozano, and C. M. Torres, "Vulnerabilidad , amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga," no. 1, pp. 51–63, 2011.
- [12] CDMB, "Monitoreo de aguas subterráneas por afectación del Carrasco," Bucaramanga, 2013
- [13] T. Christensen, *Solid Waste Technology & Management*, Volume 2. Blackwell Publishing, 2011.
- [14] J. Porras Martín, P. Nieto López, C. Alvarez Fernández, A. Fernández Uría, and M. Gimeno, *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. Instituto Geológico y Minero de España, 1985.
- [15] D. Fatta, A. Papadopoulos, and M. Loizidou, "a Study on the Landfill Leachate and Its Impact on the," *Environ. Geochem. Health*, vol. 21, no. March, pp. 175–190, 1999.
- [16] O. Azcuntar, "Impacto del basurero de Navarro sobre la calidad de las aguas subterráneas del municipio de Cali, Colombia," *Corporación Reg. del Val. del Cauca*, 2007.
- [17] J. A. Reyes-López, J. Ramírez-Hernández, O. Lázaro-Mancilla, C. Carreón-Diazconti, and M. M.-L. Garrido, "Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in México," *Waste Manag.*, vol. 28, pp. S33–S39, 2008
- [18] M. M. Abd El-Salam and G. I. Abu-Zuid, "Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt," *J. Adv. Res.*, 2014.
- [19] S. Gómez, J. D. Colegial, M. Á. Pulido, and F. Gutiérrez, "Evaluación del peligro a la contaminación del recurso hídrico subterráneo en la cuenca superior del río Lebrija.," 2009.
- [20] W. L. Antolinez Quijano, "Modelo numérico del flujo de agua subterránea en las formaciones acuíferas de Bucaramanga," *Universidad Industrial de Santander*, 2014
- [21] J. C. Rodríguez Uribe and D. C. Torres Jiménez, "Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga," *Universidad Industrial de Santander*, 2011.
- [22] L. M. Durán Gonzales, "Localización y georeferenciación de puntos Bucaramanga y el río de oro," *Universidad Industrial de Santander*, 2014.

- [23] CDMB, "Inventario De Concesiones De Aguas Subterráneas En La Cuenca Superior Del Río Lebrija," Bucaramanga.
- [24] "Indicador de nivel de agua para nivel freático - KLL - Seba Hydrometrie GmbH & Co. KG." [Online]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/seba-hydrometrie-gmbh-co-kg/product-63216-409008.html>.
- [25] "Trimble GeoXM Handheld GPS." [Online]. Available: <http://ascscientific.com/geoxm.html>.
- [26] "Oxímetro portátil con compensación de temperatura, salinidad y altitud." [Online]. Available: <http://www.hannainst.es/catalogo-productos/oxigeno-disuelto/portatil/oximetro-portatil-con-compensacion-de-temperatura-salinidad-y-altitud-hi-9146>.
- [27] "Medidor de pH y conductividad HI 991300 y HI 991301." [Online]. Available: <http://www.hannainst.es/catalogo-productos/medidores-combinados/portatil/medidor-de-ph-y-conductividad-hi-991300-y-hi-991301>.
- [28] Baedeker, M., Back, W. 1980, Hydrogeological Processes and Chemical Reactions at a Landfill, U. S. Geological Survey, National Centre, Reston, Virginia, U. S.
- [29] Farquhar, J. 1989. Leachate: Production and Characterization. Canadian Journal of Civil Engineering. University of Waterloo, Ontario, Canadá.
- [30] Appelo and Postma. (1996). Geochemistry, Groundwater and Pollution. Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands
- [31] Longe, E. O., Malomo, S., & Olorunniwo, M. A. (1987). Hydrogeology of Lagos metropolis. Journal of African Earth Sciences (1983), 6(2), 163–174. [http://doi.org/10.1016/0899-5362\(87\)90058-3](http://doi.org/10.1016/0899-5362(87)90058-3)
- [32] A. Cabrera Sansores, R. Beltrán Chin, J. Pacheco Avila, J. Frías Tuyin, and J. Ramírez Herrera, "Calidad del agua subterránea en un campo experimental hortícola en el estado de Yucatán," Universidad Autónoma de Yucatán, México, 2000.
- [33] J. Montalvo, I. García, S. Loza, S. Esponda, M. César, R. Gonzáles de Zaya, and L. Hernández, "Dissolved oxygen and organic matter in inner water bodies of the Sabana-Camagüey Archipiélago, Cuba.," Ser. Ocean., vol. 4, no. 4, pp. 71–84, 2008.

[34] I. K. López Martínez and J. O. Torrado Carvajal, “Distribución espacial de conductividad eléctrica y pH en el acuífero superior de la meseta de Bucaramanga,” Universidad Industrial de Santander, 2014.

[35] C. I. Rodríguez, C. Duque, M. L. Calvache, and M. López, “Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña , España,” pp. 2003–2006, 2010.

## BIBLIOGRAFIA

ABD EL-SALAM, Magda M. y I. ABU-ZUID, Gaber. Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of Advanced Research*. Julio 2015. Volumen 6, n. 4, p. 579–586 [citado Agosto 2015]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123214000265>

ADEOLU, Aderemi, ORIAKU Ada, ADEWUMI Gbeng y OTITOLOJU Adebayo. Assessment of groundwater contamination by leachate near a municipal solid waste landfill. *African Journal of Environmental Science and Technology*. Noviembre 2011. Volumen 5, n. 11, p. 933-940 [citado Agosto 2015]. Disponible en internet: <http://www.ajol.info/index.php/ajest/article/view/74204>

ANTOLINEZ QUIJANO, Walter Leonard. Modelo numérico del flujo de agua subterránea en las formaciones acuíferas de Bucaramanga. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Civil. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2014.

APPELO C Y POSTMA D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Amsterdam, Ed. A.A. Balkema Publishers, 2005, p. 489-537.

AZCUNTAR ROSALES, Omar. Impacto del basurero de Navarro sobre la calidad de las aguas subterráneas del municipio de Cali, Colombia. CVC: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Disponible en internet: <http://www.elpais.com.co/elpais/archivos/informe-cvc-2001.pdf>

BAEDECKER, Mary Jo y BACK, William. *Hydrogeological Processes and Chemical Reactions at a Landfill*, U. S. Servicio Geológico Centro Nacional de Reston, Virginia. 1980. Disponible en internet: <http://info.ngwa.org/gwol/pdf/792500654.PDF>

CABRERA SANSORES, Armando, BELTRÁN CHIN, Ricardo, PACHECO AVILA, Julia, FRÍAS TUYIN, Javier y RAMÍREZ HERRERA, José. Calidad del agua subterránea en un campo experimental hortícola en el estado de Yucatán. Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán, 2000. Disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/saneab/mexicon/R-0093.pdf>

CHRISTENSEN, Thomas H. Solid Waste Technology & Management. Lyngby, Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2010, p. 63-104.

DURÁN GONZALES, Luis Mario. Localización y georeferenciación de puntos de agua subterránea de los pozos ubicados en la parte occidental de la ciudad de Bucaramanga y el río de oro. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2014.

FARQUHAR, G. J. Leachate: Production and Characterization. Canadian Journal of Civil Engineering. Enero – Junio, 1989. Volumen 16, p. 317-325. Disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org/muwww/fulltext/repind49/lesson10/leachate.html>

FATTA, Despina, PAPADOPOULOS, Achilleas y LOIZIDOU, María. A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area. Environmental Geochemistry and Health. Junio 1999. Volumen 21, n. 2, p. 175-190. Disponible en: <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1006613530137#page-1>

FRIENDS OF HEART (FOE). “Resources up in flames”. Global Alliance for Incinerator Alternatives. Ed. YC Publication Consultants. Abril, 2004, p. 10-62. Disponible en internet: <http://www.no-burn.org/downloads/Resources%20up%20in%20Flames.pdf>

GIÁCOMAN, Germán y PONCE, María del Carmen. Contaminación orgánica, bacteriológica y de metales pesados en un vertedero de residuos sólidos a cielo abierto años después de su clausura en Mérida, Yucatán, México. VI Congreso Interamericano de residuos sólidos de la asociación interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Mayo 2015.

GÓMEZ ISIDRO, Sully, GUTIERRÉZ LOZANO, Feisan José y TORRES, Carlos Mauricio. Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga. Revista UIS ingenierías. 2011. Volumen 10, n. 1, p. 53-64. Disponible en internet: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/2691>

GÓMEZ ISIDRO, Sully, COLEGIAL, Juan Diego, PULIDO, Miguel Ángel y GUTIÉRREZ, Feisan. Evaluación del peligro a la contaminación del recurso hídrico subterráneo en la cuenca superior del río Lebrija. Proyecto de Investigación. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación en Predicción y Modelamiento Hidroclimático, 2009. Disponible en internet: [http://caracoli.cdm.gov.co/cai/rhc/docs/INFORMES/ESTUDIOS/Estudio\\_02.pdf](http://caracoli.cdm.gov.co/cai/rhc/docs/INFORMES/ESTUDIOS/Estudio_02.pdf)

HOSSAIN, Md. Lokman, DAS, Satyajit Roy y HOSSAIN, Mohammed Kamal. Impact of landfill leachate on surface and ground water quality. Journal of Environmental Science and Technology. Septiembre 2014. Volumen 7, p. 337–346. Disponible en internet:

[http://www.researchgate.net/publication/265709304\\_Impact\\_of\\_Landfill\\_Leachate\\_on\\_Surface\\_and\\_Ground\\_Water\\_Quality](http://www.researchgate.net/publication/265709304_Impact_of_Landfill_Leachate_on_Surface_and_Ground_Water_Quality)

LONGE, E. O. y BALOGUN, M. R. Hydrogeology of Lagos metrópolis. Journal of African Earth Sciences. 1983. Volumen 6, n. 2, p. 163-174. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0899536287900583>

LÓPEZ MARTÍNEZ, Ivette Katherine y TORRADO CARVAJAL, Javier Orlando. Distribución espacial de conductividad eléctrica y pH en el acuífero superior de la

meseta de Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2014.

MONTALVO, José, GARCÍA, Ileana, LOZA, Sandra, ESPONDA, Santa, CÉSAR, María, GONZÁLES DE ZAYA, Roberto y HERNÁNDEZ, Lyanis. Oxígeno disuelto y material orgánica en cuerpos de aguas interiores del Archipiélago Sabana-Camagüey, Cuba. Serie Oceanológica. 2008. n.4, p.71-84. Disponible en internet: <http://oceanologia.redciencia.cu/articulos/articulo45.pdf>

NOGUERA, Katia y OLIVERO, Jesús. Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias. 2010. Volumen 34, n. 132, p. 347-356. Disponible en internet: [http://www.accefyn.org.co/revista/Vol\\_34/132/347-356.pdf](http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_34/132/347-356.pdf)

PORRAS MARTÍN, Jorge, NIETO LÓPEZ, Pedro, ALVAREZ FERNÁNDEZ, Ceferino, FERNÁNDEZ URÍA, Antonio y GIMENO, María. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Madrid, Instituto Tecnológico Geominero de España, 1985, p. 43-70. Disponible en internet: <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/lib43.htm>

RAPTI-CAPUTO, Dimitra, SDAO, Francesco y MASI, Salvatore. Pollution risk assessment based on hydrogeological data and management of solid waste landfills. Engineering Geology. 2006. Volumen 85, n. 2, p. 122-131. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795206000743>

REGADÍO, Mercedes, RUIZ, Ana I, RODRÍGUEZ-RASTRERO, Manuel y CUEVAS, Jaime. Containment and attenuating layers: An affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution. Waste Management. Diciembre 2015. Volumen 46, p. 408-419. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15300829>

REYES-LÓPEZ, Jaime A., RAMÍREZ-HERNÁNDEZ, Jorge, LÁZARO-MANCILLA, Octavio, CARREÓN-DIAZCONTI, Concepción y GARRIDO, Miguel Martín-Loeches. Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in México. Waste Management. 2008. Volumen 28, n. 1, p. S33-S39. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08001475>

RODRIGUEZ, Corina Iris, DUQUE, Carlos, CALVACHE, María Luisa y LÓPEZ, Manuel. Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña. Geogaceta. 2010. Volumen 49, p. 107-110. Disponible en internet: <http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/geo49/art27.pdf>

RODRÍGUEZ URIBE, Julio César y TORRES JIMENEZ, Diana Carolina. Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2011.

STEPHEN, Foster y HIRATA, Ricardo. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes. CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, p. 1-75.

SUAREZ GOMEZ, Claudia Inés. Problemática y gestión de residuos sólidos peligrosos en Colombia. INNOVAR: revista de ciencias administrativas y sociales. [en línea] Enero – Junio, 2000. No 15 [citado 4 Febrero 2015] p. 41-52. Disponible en Internet: <http://www.bdigital.unal.edu.co/26556/1/24163-84595-1-PB.pdf>

## ANEXOS

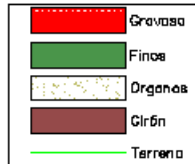
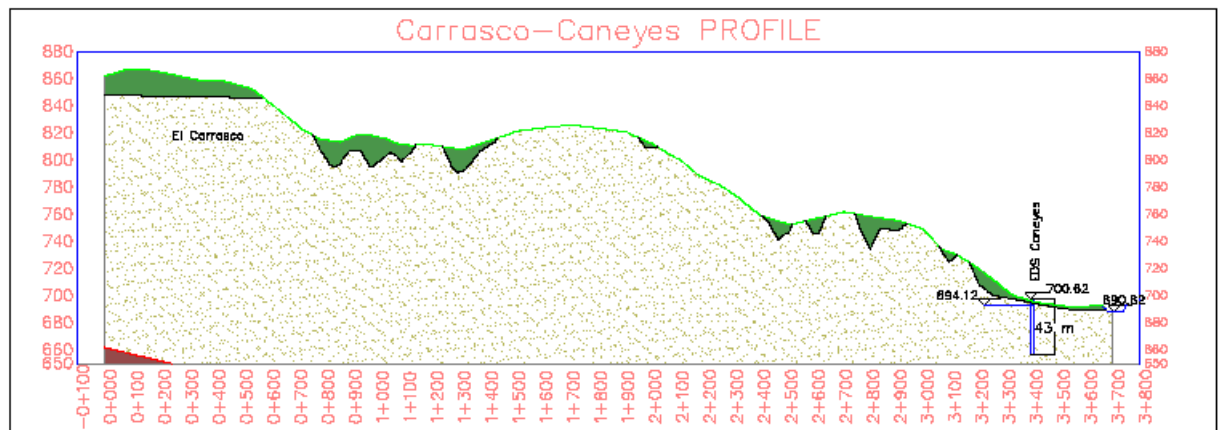
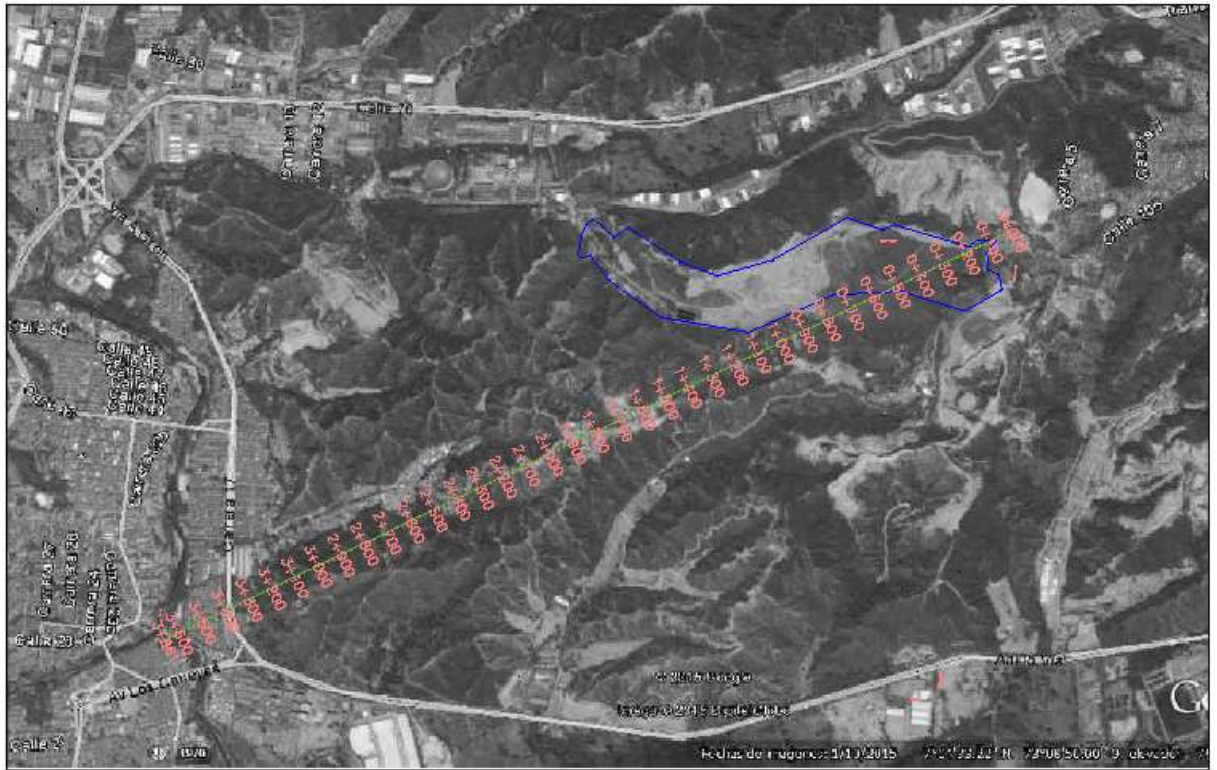
### Anexo A. Inventario de puntos de agua subterránea

N°	Descripción del Lugar	Norte	Este	Cota	N. Freat	Cota N. Freat.	Conduct	pH	Temp	T. de Captación
1	El Palenque	1274910.50	1100162.34	703.65	5.0	698.65	442.10	6.79	29.60	Pozo Profundo
2	Hotel Cantabria Lav. de Carros	1275599.02	1103907.80	780.06	5.8	774.26	340.00	6.60	28.50	Pozo Profundo
3	Servicentro Poblado Car's	1273950.01	1100345.34	695.63	4.1	691.53	550.10	6.84	29.20	Pozo Profundo
4	Lavadero 6 Esquinas	1273944.09	1100326.65	690.00	4.9	685.10	420.80	6.91	28.10	Pozo Profundo
5	EDS los Caneyes	1273191.35	1100924.70	710.39	5.2	705.19	229.00	6.92	28.60	Pozo Profundo
6	Cotrasur	1272838.11	1107194.56	829.55	12.1	817.45	350.70	6.87	29.80	Pozo Profundo
7	EDS El Carmen	1273117.57	1100764.68	702.67	5.9	696.77	413.00	6.85	28.60	Pozo Profundo
8	La Báscula	1275632.38	1100230.54	685.51	4.2	681.31	450.60	6.80	29.50	Pozo Profundo
9	EDS Centro Abastos	1277500.44	1100843.92	694.40	5.9	688.50	647.20	6.89	30.10	Pozo Profundo
10	El Punto del Lavado	1272964.00	1100329.69	693.92	7.5	686.42	739.00	6.86	29.50	Pozo Profundo
11	Tsunami Car's	1272949.39	1100299.59	704.46	8.2	696.26	433.00	6.83	28.90	Pozo Profundo
12	EDS Zona Refrescante	1273059.53	1107910.08	857.29	4.5	852.79	126.20	6.76	28.20	Pozo Profundo
13	Finca La Pradera	1273459.59	1101372.79	730.83	2.4	728.43	520.40	6.53	28.90	Cisterna
14	Villa Eva	1273084.21	1102035.44	758.59	1.6	756.99	321.10	6.75	30.10	Cisterna
15	Las Ortiz	1278547.80	1101641.08	670.73	2.1	668.63	583.40	6.82	29.10	Cisterna
16	EDS El Puente	1275682.46	1104189.77	785.91	5.3	780.61	250.50	6.79	29.50	Pozo Profundo
17	EDS Insercol	1275391.53	1100952.61	705.06	6.5	698.56	410.50	6.85	29.20	Pozo Profundo
18	Parqueadero Lenguerke	1273311.15	1100526.28	711.62	7.8	703.82	580.30	6.90	29.10	Pozo Profundo
19	EDS La Mobil	1275357.37	1103256.31	797.94	8.6	789.34	420.10	6.83	29.00	Pozo Profundo
20	Prevesa S.A	1103749.00	1273493.00	742.00	47.0	694.98	359.00	7.04	30.10	Pozo Profundo
21	El Cristal Bajo	1274096.62	1105955.14	803.99	0.1	803.89	210.00	6.27	26.30	Manantial

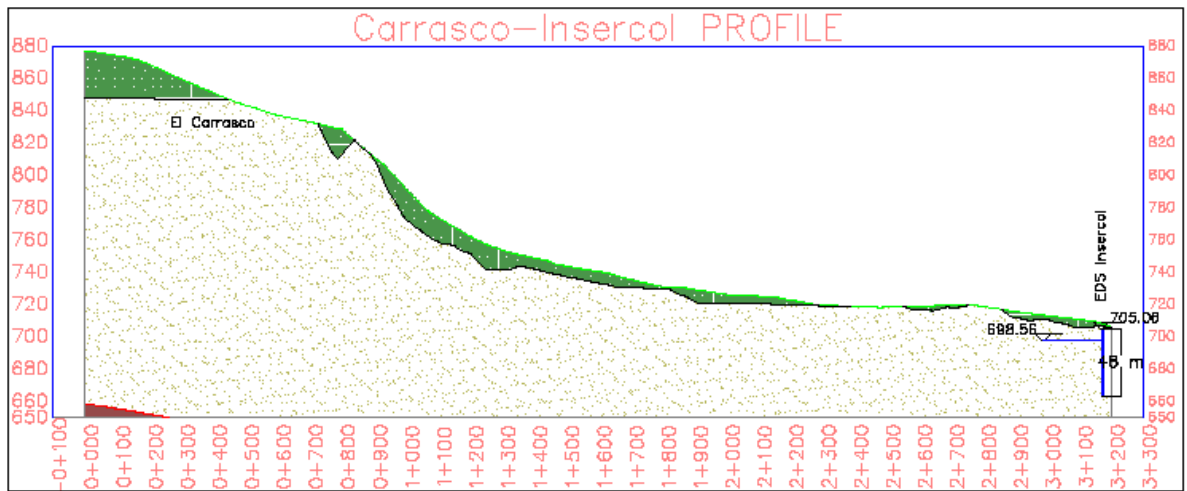
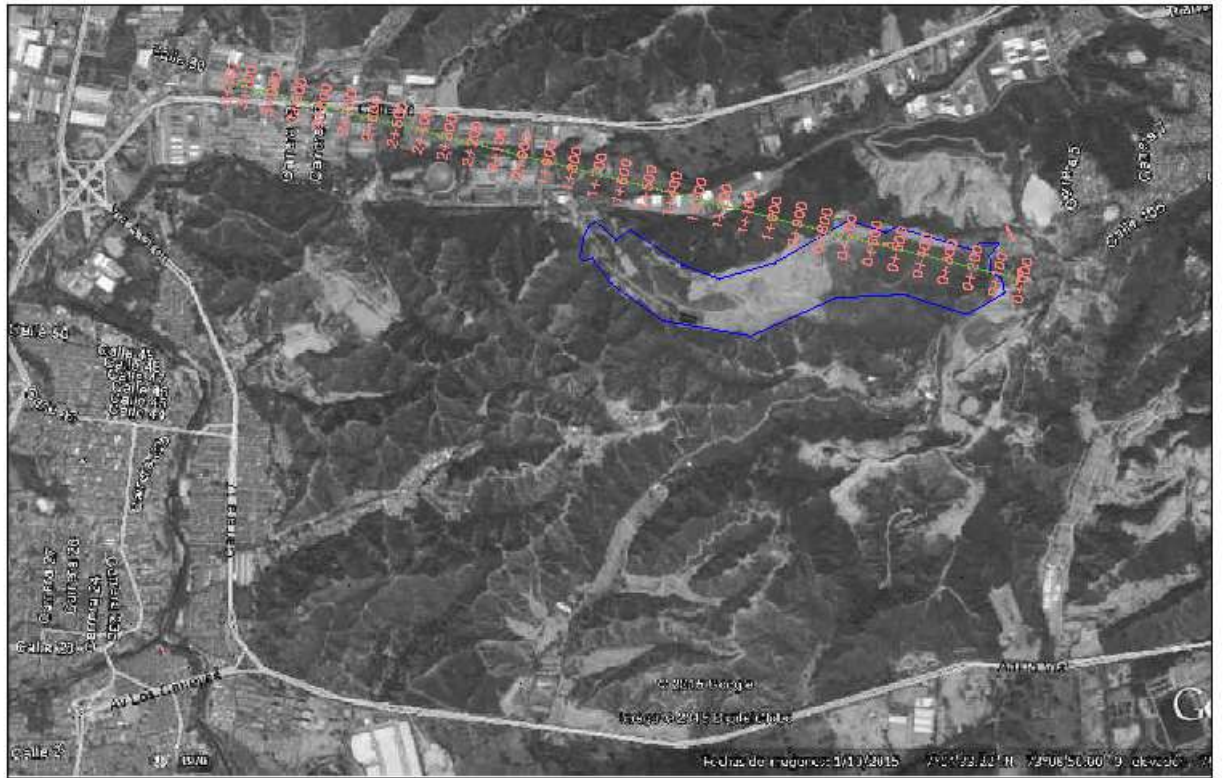
<b>N°</b>	<b>Descripción del Lugar</b>	<b>Uso</b>	<b>Prof. Perf.</b>	<b>Prof. Succión</b>	<b>Diam. Ext.</b>	<b>Tipo de Bomba</b>
1	El Palenque	Lavado de autos	52	-	4	Moto Bomba 1HP
2	Hotel Cantabria Lav. de Carros	Lavado de autos	35	-	4	Bomba Lapicero
3	Servicentro Poblado Car's	Lavado de autos	-	-	-	-
4	Lavadero 6 Esquinas	Lavado de autos	-	-	-	Moto Bomba 0.5HP
5	EDS los Caneyes	Lavado de autos	15	13	4	Bomba Lapicero
6	Cotrasur		-	-	-	
7	EDS El Carmen	Lavado de autos	13	10	4	Bomba Lapicero
8	La Báscula	Lavado de autos	-	-	-	
9	EDS Centro Abastos	Lavado de autos	35	-	4	Bomba Lapicero
10	El Punto del Lavado	Lavado de autos	16	14	4	Bomba Lapicero
11	Tsunami Car's	Lavado de autos	15	11	4	Bomba Lapicero
12	EDS Zona Refrescante		18	15	4	Moto Bomba 1HP
13	Finca La Pradera		2.6	-	2	-
14	Villa Eva		3	-	2	-
15	Las Ortiz		3.5	-	1.8	-
16	EDS El Puente	Lavado de autos	36	-	4	Moto Bomba 1HP
17	EDS Insercol	Lavado de autos	48	-	-	Bomba Lapicero 3/4 HP
18	Parqueadero Lenguerke		16	12	4	Bomba Lapicero
19	EDS La Mobil	Lavado de autos	42	-	4	Bomba Lapicero
20	Prevesa S.A	Industria				
21	El Cristal Bajo		-	-	-	-

<b>N°</b>	<b>Descripción del Lugar</b>	<b>Dirección</b>	<b>Municipio</b>	<b>Concesión</b>
1	El Palenque	Intercambiador el Palenque B/ga-B/ca	Girón	Si
2	Hotel Cantabria Lav. de Carros	Vía B/ga-Girón Terminal Transportes	B/manga	-
3	Servicentro Poblado Car's	Carrera 26 # 39-24	Girón	Si
4	Lavadero 6 Esquinas	El Poblado Carrera 26 # 39-02	Girón	-
5	EDS los Caneyes	Av. Los Caneyes EDS	Girón	Si
6	Cotrasur	Anillo Vial Giron - F/da	F/blanca	Si
7	EDS El Carmen	Av. Los Caneyes	Girón	Si
8	La Báscula	Calle 2 2-04 Km 2 Vía Chimita	Girón	Si
9	EDS Centro Abastos	Vía Girón - Café Madrid	Girón	Si
10	El Punto del Lavado	Av. Los Caneyes Salida Zapatoca	Girón	-
11	Tsunami Car's	Av. Los Caneyes Salida Zapatoca	Girón	Si
12	EDS Zona Refrescante	Anillo Vial F/da-Giron	Florida	-
13	Finca La Pradera	Anillo Vial Giron - F/da	Girón	-
14	Villa Eva	Anillo Vial Giron - F/da	Girón	-
15	Las Ortiz	Vía Palenque Café Madrid	Girón	-
16	EDS El Puente	Vía B/ga-Girón Terminal Transportes	B/manga	-
17	EDS Insercol	Vía B/ga-Girón al Lado de Coordinadora	Girón	Si
18	Parqueadero Lenguerke	El Poblado	Girón	-
19	EDS La Mobil	Vía B/ga-Girón	B/manga	-
20	Prevesa S.A	Vía Girón/ Floridablanca	Girón	Si
21	El Cristal Bajo	Cristal Bajo	B/manga	-

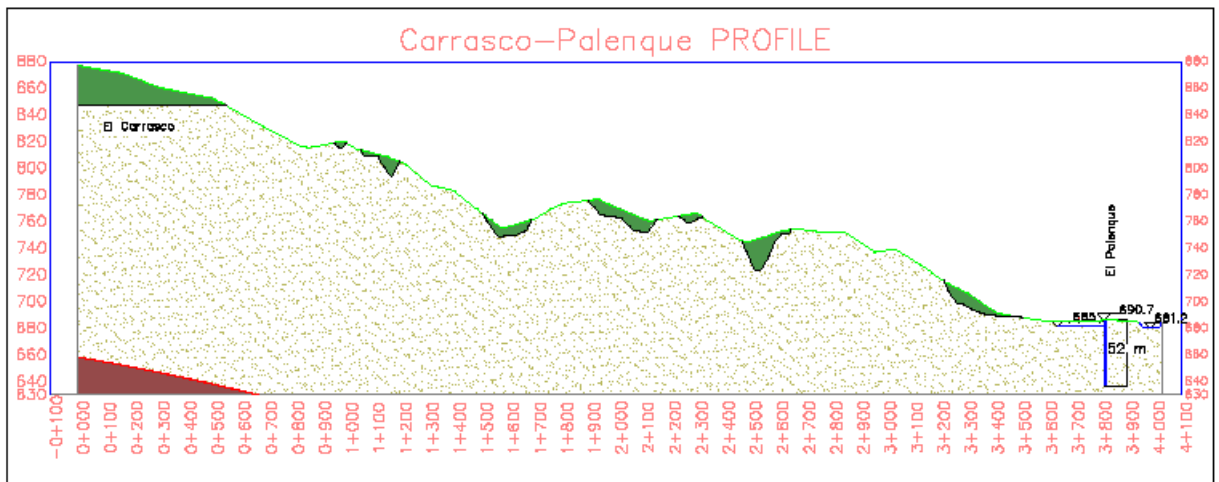
## Anexo B. Planta-Perfil, El Carrasco-EDS Caneyes



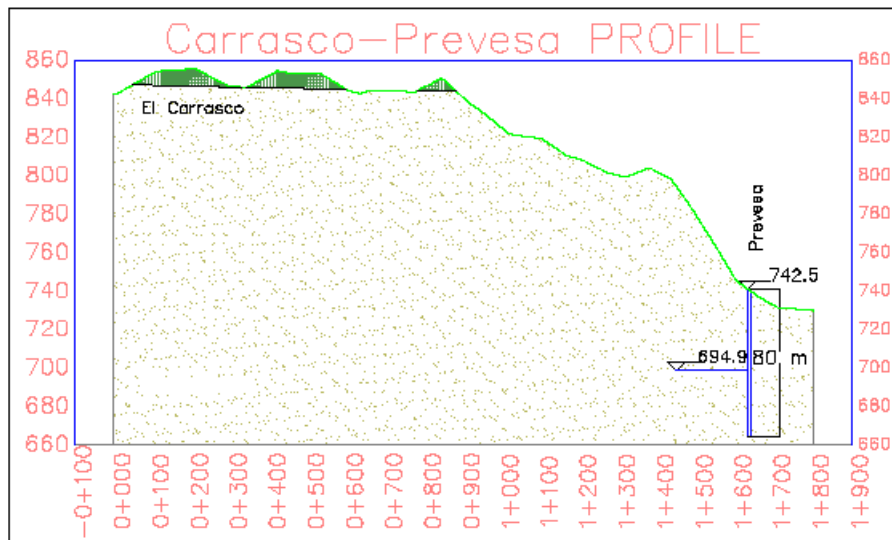
### Anexo C. Planta-Perfil, El Carrasco-EDS Insercol




## Anexo D. Planta-Perfil, El Carrasco-Parqueadero El Palenque



## Anexo E. Planta-Perfil El Carrasco- Prevesa S.A.



## Anexo F. Formato de Campo

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL										
<b>DATOS DE CAMPO</b>		Muestra No. _____										
<b>FECHA:</b>		<b>RESPONSABLE DEL MUESTREO:</b>					<b>ACOMPANAMIENTO COME:</b>					
No.	Sitio de Muestra	Punto o Código Estación	Hora	Coordenadas		Cota (m)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	pH (Unid. pH)	Conductividad (µS)	Oxígeno Disuelto (g a m)	Observaciones*
1				Norte	Este							
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

\* Incluir observaciones del día (Solado, Nublado, Lluvioso). Incluir información sobre parámetros organolépticos del agua (Color, Olor, Sabor). Punto donde se tomó la muestra (Llave, pozos).