



# Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga\*

Lisette Ximena Niño Carvajal\*\*, Jacipr Alexander Ramón Valencia\*\*\*, Jairo Lenin Ramón Valencia\*\*\*\*

*Physiochemical contamination of aquifers due to leachates from the El Carrasco, Bucaramanga, landfill*

*Contaminação físico-química dos aquíferos pelos lixiviados gerados do aterro sanitário El Carrasco, de Bucaramanga*

## RESUMEN

**Introducción.** El deficiente manejo de los lixiviados generados en el sitio de disposición final de residuos sólidos de El Carrasco de Bucaramanga (Colombia) despertó, desde hace algunos años, preocupación por parte de las autoridades ambientales, debido

al riesgo de contaminación de los recursos suelo y agua, en áreas de disposición y clausuradas. **Objetivo.** Establecer la ruta de migración de los contaminantes presentes en los lixiviados generados en el relleno El Carrasco de Bucaramanga y en el área de influencia directa e indirecta del sitio de disposición, a través del análisis y la interpretación de datos obtenidos con

---

\* Artículo original derivado de la tesis de maestría en Ingeniería ambiental titulada "Grado de afectación ambiental de los acuíferos por la infiltración de lixiviados provenientes de la disposición final de los residuos sólidos urbanos en el Carrasco, Bucaramanga Santander". Financiado por la CDMB Vigencia. Enero 2011 a Enero 2014. \*\* Ingeniera ambiental, magíster en Ingeniería Ambiental de la Subdirección de Evaluación y Control Ambiental (SEICA). Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB). \*\*\* Ingeniero químico, doctor en Ingeniería Química, docente e investigador del Programa de maestría en Ingeniería Ambiental Grupo de Investigaciones GIAAS Universidad de Pamplona. \*\*\*\* Ingeniero biomédico, doctor en Ingenierías Tecnológicas Industriales, docente e investigador del Programa de Bioingeniería Grupo de Investigaciones OSIRIS Universidad del Bosque.

unidades geoeléctricas. **Materiales y métodos.** Se emplearon herramientas informáticas que incluyen el uso de los sistemas de información geográfica, el programa Modelmouse, métodos de sondeos eléctricos verticales con profundidad de 180 m, en el cual se estableció un modelo de malla conformada por 45 filas y 35 columnas 10x10 m y 6 capas que se encontraban con las unidades identificadas en el área directa de disposición mediante un perfil estratigráfico. **Resultados.** Los resultados de la modelación desarrolladas en el entorno MODFLOW muestran un flujo en dirección este-oeste en casi

todas las capas; asimismo, el flujo establecido por la recarga proveniente del macizo de Santander, donde los niveles de resistividad son muy bajos. **Conclusión.** Se identificaron para la zona de estudio, a través de metodologías combinadas de geofísica, geología, hidrogeología y geoquímica, zonas con resistividades bajas asociadas, generadas por los lixiviados, y zonas totalmente saturadas que no fueron manejadas de manera adecuada en el sitio de disposición.

**Palabras clave:** vertedero, lixiviados, acuífero, unidades geo-eléctricas.

## ABSTRACT

**Introduction.** The poor management of the leachates generated at the solid waste final disposal site in El Carrasco, Bucaramanga, Colombia, has been worrying environmental authorities for some years because its risk of contamination for the soil and the water in the disposal and closed areas. **Objective.** To establish the migration route for the leachates generated in El Carrasco landfill, in Bucaramanga, and in the direct and indirect areas of influence of the disposal site, by means of the analysis and the interpretation of the data obtained by the use of geoelectric units. **Materials and methods.** IT tools were used, including geographic information systems, the Modelmouse software, 180 meters deep vertical electrical soundings with a mesh modeling model

comprised of 45 lines and 35 columns -10x10m- and six layers that met the units identified in the direct disposal area by means of a stratigraphic profile. **Results.** The results of the modeling developed within the MODFLOW environment show an East-West flow in most of the layers. The same happens with the flow established by the load coming from the Santander mountain range, where the resistivity rates are very low. **Conclusion.** Low resistivity zones associated, generated by the leachates, and fully saturated zones that were poorly managed in the disposal site, were identified for the area studied, by means of methodologies that combine geophysics, geology, hydrogeology and geochemistry.

**Key words:** landfill, leachates, aquifer, geoelectric units.

## RESUMO

**Introdução.** O deficiente manejo dos lixiviados gerados no local de disposição final de resíduos sólidos de El Carrasco de Bucaramanga (Colômbia) despertou, desde há alguns anos, preocupação por parte das autoridades ambientais, devido ao risco de contaminação dos recursos do solo e água, em áreas de disposição e clausuradas. **Objetivo.** Estabelecer a rota de migração dos contaminantes presentes nos lixiviados gerados no aterro El Carrasco de Bucaramanga e na área de influência direta e indireta do local de disposição, através da análise e a interpretação de dados obtidos com unidades geo-eléctricas. **Materiais e métodos.** Se utilizaram ferramentas informáticas que incluem o uso dos sistemas de informação geográfica, o programa Modelmouse, métodos de sondagens eléctricas verticais com profundidade de 180 m, no qual se estabeleceu

um modelo de malha conformada por 45 filas e 35 colunas 10x10 m e 6 capas que se encontravam com as unidades identificadas na área direta de disposição mediante um perfil estratigráfico. **Resultados.** Os resultados da modelação desenvolvidas no entorno MODFLOW mostram um fluxo em direção Leste-Oeste em quase todas as capas; assim mesmo, o fluxo estabelecido pela recarga proveniente do maciço de Santander, onde os níveis de resistividade são muito baixos. **Conclusão.** Se identificaram para a zona de estudo, através de metodologias combinadas de geofísica, geologia, hidrogeologia e geoquímica, zonas com resistividades baixas associadas, geradas pelos lixiviados, e zonas totalmente saturadas que não foram manejadas de maneira adequada no local de disposição.

**Palavras chave:** aterro, lixiviados, aquífero, unidades geo-eléctricas.

## INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana de Bucaramanga, en el departamento de Santander, enfrenta actualmente una problemática con la disposición de los residuos sólidos debido a que el sitio actual de disposición ya cumplió su vida útil, y para el momento del cierre programado para el 30 de septiembre de 2015, no existe un sitio adecuado para este fin. El deficiente manejo de los lixiviados generados en el sitio de disposición final de residuos sólidos de El Carrasco, ubicado en el municipio de Bucaramanga, despertó desde hace algunos años, la preocupación de autoridades ambientales, debido al riesgo de contaminación de los recursos suelo y agua por los lixiviados generados en la descomposición de los residuos sólidos en áreas de disposición y en áreas clausuradas. Los flujos de aguas subterráneas juegan un papel importante como medio de transporte para los lixiviados (Hans-Jürgen, s. f.) tanto de forma vertical como de forma horizontal; por tal motivo son importantes para percibir los riesgos asociados a este flujo (McDonal, 1988).

Las trayectorias del flujo de aguas subterráneas en un acuífero se ven afectadas por la distribución espacial de las propiedades hidráulicas y las discontinuidades estructurales de las unidades geológicas.

*Modflow* es un modelo de flujo de aguas subterráneas en diferencias finitas que realiza simulaciones en tres dimensiones (McDonal, 1988); por ello se constituye como una valiosa herramienta informática utilizada en estudios de modelación de acuíferos contaminados. En el 2007 se realizó una investigación en la ciudad de Mérida, para revelar el impacto de los lixiviados generados en el vertedero municipal de la zona; aun cuando la pluma contaminante no se evidenció más allá de los 1500 m del sitio (González, Camargo, 2010; Bahaa-Eldin y Rahim, 2010), se menciona la necesidad de caracterizar el agua subterránea que potencialmente puede ser contaminada con los lixiviados provenientes del sitio de disposición final de residuos. En este trabajo investigativo, se utilizaron herramientas

informáticas que incluyen el uso de los sistemas de información geográfica, el programa *Modelmouse* (Gonzalez y Camargo, 2010) al igual que el método de sondeos eléctricos verticales con profundidad de 180 m. El objetivo del proyecto propone establecer la ruta de migración de los contaminantes presentes en los lixiviados generados en dicho vertedero, en el área de influencia directa e indirecta del sitio de disposición.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la investigación, inicialmente se realizó un estudio detallado del vertedero durante un período de cuatro años entre 2011 y 2014; se identificó que el sitio no cuenta con la red de monitorización de aguas subterráneas (EMAB, 2011), totalmente indispensable para la protección del recurso y es requerimiento de la normativa ambiental; el perfil estratigráfico de la zona se obtuvo a partir de la realización de tres sondeos eléctricos verticales con una profundidad de 180 m (Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia), en puntos estratégicos como son la zona clausurada, celdas de disposición y punto neutro.

Se utilizó una malla de modelación discretizada espacialmente en 45 filas, 35 columnas y 6 capas; 100 celdas de esta malla corresponden a celdas de potencial constante (carga hidráulica conocida) y 1280 celdas, de potencial variable, cada una asociada a una ecuación que sigue la Ley de Darcy. El sistema de ecuaciones se resolvió simultáneamente para el paso de tiempo (5 años) utilizando el programa *Modelmouse*. El modelo corresponde a un área pequeña localizada en el límite de los municipios de Bucaramanga y Girón, por lo que no fue posible incorporar al modelo los límites del acuífero de la región; sin embargo, se tomaron como referencia las recomendaciones dadas por la Autoridad Ambiental CDMB, para la modelación de regiones a pequeña escala, ya que el sitio de disposición es considerado fuente puntual de contaminación. Actualmente se encuentra en operación recibiendo un promedio de 950 t/

día de RSU; asimismo, se tomó el muestreo de calidad fisicoquímica y microbiológica sobre 10 pozos de extracción de agua subterránea, que poseen concesión de aguas aprobados por la Autoridad Ambiental, con los que se establecieron los indicadores fisicoquímicos y microbiológicos tales como: temperatura, pH, conductividad eléctrica, DBO<sub>5</sub>, DQO, SDT, SST y STV, metales pesados, Cr, N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N total, P total, aceites y grasas, alcalinidad, turbidez, empleando métodos estandarizados.

## RESULTADOS

### Zona de estudio

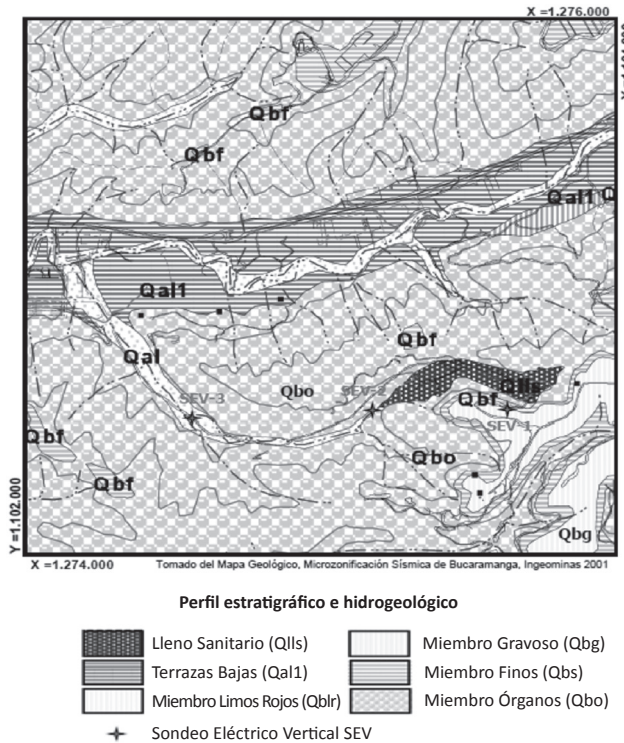
El sitio de disposición de residuos sólidos del AMB no cuenta con las características de un relleno sanitario como se establece en la Resolución 1096 del 2000, la cual adopta el reglamento técnico para el sector del agua potable y el saneamiento básico.

El sitio inició operación a partir del año 1977, como botadero a cielo abierto, donde los vehículos ingresaban por la vía Provenza-Malpaso y dejaban caer los residuos en la parte baja de la cañada de la quebrada El Carrasco (Proactiva, Chicamocha, 2013), hoy desaparecida por la disposición de residuos y modificación del terreno. Por orden judicial, El Carrasco debió ser clausurado desde el año 2011, pero los alcaldes del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) decretaron emergencia sanitaria por 6 meses, debido a que no se contaba con un sitio alternativo para la disposición de residuos. Una vez cumplido el plazo de la emergencia, nuevamente, por no contar con un espacio, se decretó emergencia sanitaria por un año más; una vez culminado este tiempo, se decretó una alerta de emergencia sanitaria por un lapso de 18 meses, los cuales se cumplieron el 30 de septiembre del 2013. Desde el inicio de las emergencias sanitarias, se han depositado en diferentes celdas, aproximadamente 504.000 toneladas de residuos, que cubren un área de 130.000 m<sup>2</sup>, teniendo en cuenta que la población del Área Metropolitana del Bucaramanga (AMB),

aporta el 90 % de residuos dispuestos en el sitio, con una producción per cápita de 0.917 kg/hab./día. También fueron localizados 10 pozos aguas abajo del sitio que contarán con concesión de aguas, aprobada por la autoridad ambiental, los cuales funcionan de manera continua para uso industrial.

El incumplimiento histórico de coberturas diarias y finales aporta un alto nivel de infiltración en los períodos de lluvia, hecho que genera un aumento en la producción de lixiviados y un funcionamiento inadecuado. El actual Sistema de Tratamiento de Agua Residual, STAR, fue diseñado para tratar 3 L/s, y según los datos del anterior operador del sitio, el caudal es de 4.92 L/s, para el año 2015 (Proactiva, Chicamocha, 2013).

En la figura 1 se ubican los puntos establecidos para el desarrollo de los “sondeos eléctricos verticales”, SEV, en donde se localizan tres puntos estratégicos que involucran todo el componente geológico del sitio: el primer punto fue localizado en la zona clausurada, en donde a partir del año 1985 se inició el proceso de posclausura; en el perfil estratigráfico se observa el predominio intercalado por capas de material areno-arcilloso y gravas, con capas de residuos sólidos (capas III, IV, V); se evidencia que la unidad geoeléctrica VI está constituida por capas entre gruesas y muy gruesas de variable espesor; texturalmente se trata de una grava de matriz grano, con esfericidad baja a media, y mal calibrada. Presenta feldespatos alterados, en los niveles medios, y arcillas compactas arenosas ligeramente micáceas con trazas de materia orgánica (Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia). Además de las capas de residuos sólidos, se encontraron estratos alternados con material areno-arcilloso, a partir de una profundidad de 3.10 m en el SEV 2, en donde se disminuye notoriamente la resistividad, lo cual indica la función original de las arenas arcillosas que se constituyen como una barrera del paso de los lixiviados.



**Figura 1. Mapa geográfico y microzonificación sísmica de Bucaramanga sondeos eléctricos verticales en el sector de El Carrasco**

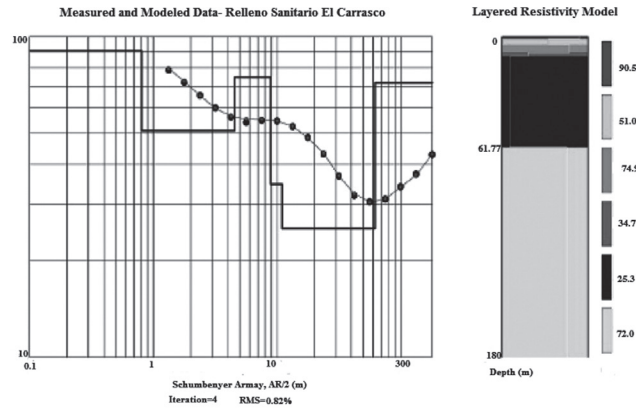
Fuente: Ingeominas

El SEV I fue hecho en la parte superior del sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco, punto estratégico ubicado por la importancia de la zona clausurada; en esta unidad geoelectrica, la resistividad es de 91 Ohm-m, y teniendo en cuenta que la resistividad general para arcillas mezcladas con arena y/o grava es de 100 a 1000 Ohm-m, se puede concluir que el valor generado de 91 Ohm-m es acorde con la etapa de clausura de la celda que fue utilizada para la disposición de residuos (a cielo abierto) entre 1977 y 1985 (EMAB, 2011), concordante, asimismo, con los niveles de compactación del terreno; al igual, se puede observar claramente que los niveles de humedad en esta unidad son casi nulos, teniendo en cuenta que para la fecha de realización del SEV se presentaba una temporada seca, tal como se puede ver en la figura 2.

En el área establecida para el SEV 2, se ubica en el centro de la celda que el día 11 de agosto,

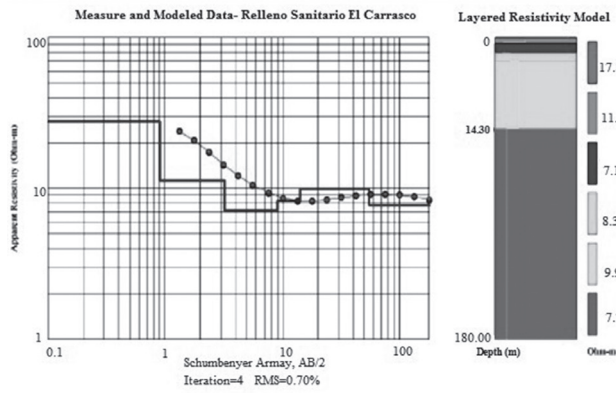
fecha que se realizó el sondeo, se encontraba en proceso de clausura; la cobertura final de esta celda presentó problemas bastante notables debido al incumplimiento de los requerimientos técnicos establecidos por las buenas prácticas de ingeniería para rellenos sanitarios, debido a que la cobertura final presentaba fallas técnicas importantes, las cuales permitieron altos niveles de percolación de aguas lluvias, especialmente en los meses de marzo, abril y mayo así como en septiembre y octubre, y parte de noviembre, resistividades descritas en la figura 3.

La figura 4 presenta niveles de resistividad superiores a los dos SEV anteriores, los cuales concuerdan exactamente, ya que en esta área no existe celda de disposición; esta área cuenta con las condiciones propias del suelo, en las unidades geoelectricas III, IV y VI.



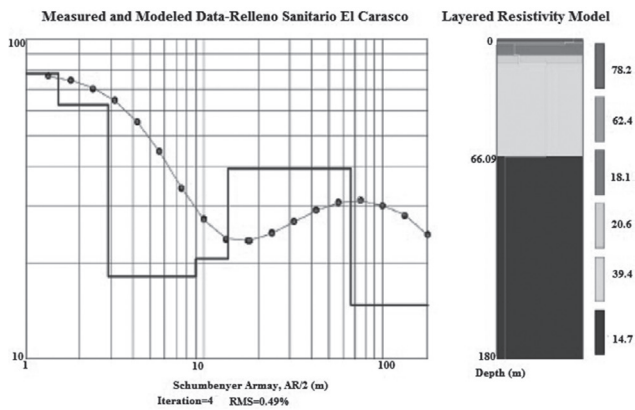
**Figura 2. Curva sondeo eléctrico vertical SEV-1**

Fuente: elaborado por los autores



**Figura 3. Curva sondeo eléctrico vertical SEV-2**

Fuente: elaborado por los autores



**Figura 4. Curva sondeo eléctrico vertical SEV-3**

Fuente: elaborado por los autores

### Resultados del modelo numérico

Los resultados de la modelación, desarrollada en el entorno *model modflow*, muestran un flujo en dirección este-oeste, en casi todas las capas; así como el flujo establecido por la recarga proveniente del macizo de Santander, donde los niveles de resistividad son muy bajos, lo que evidencia los siguientes miembros Órganos

(Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr) (Bahaa-eldin E.A. R., 2010).

En la tabla I se muestran los resultados obtenidos de los análisis realizados a los 10 pozos de extracción de aguas subterráneas y se encuentran comparados con la normativa ambiental vigente.

**Tabla I. Parámetros evaluados, pozos concesión aguas subterráneas**

	Punto de muestreo	Cromo Cr+6 mg/L	Cadmio Cd mg/L	Arsénico As mg/L
<b>No</b>	Carga máxima admisible	0.5	0.02	0.1
<b>P1</b>	EDS Caneyes	<0.10	<0.05	4.2
<b>P2</b>	EDS el Carmen	<0.10	<0.05	3.4
<b>P3</b>	Preveas S.A.	<0.10	<0.05	1.0
<b>P4</b>	Serviteca los Coches	<0.10	<0.05	0.5
<b>P5</b>	EDS Centroabastos	<0.10	<0.05	<0.5
<b>P6</b>	Freskaleche S.A.	<0.10	<0.05	<0.5
<b>P7</b>	EDS la Báscula	<0.10	<0.05	<0.5
<b>P8</b>	Parque Palenque	<0.10	<0.05	1.1
<b>P9</b>	Lavadero Tsunami Car	<0.10	<0.05	1.8
<b>P10</b>	EDS Insercol S.A.	<0.10	<0.05	0.9

Fuente: CDMB

Teniendo en cuenta los valores obtenidos de la monitorización de los 10 pozos, se establece la existencia de contaminación químico-física en el acuífero profundo de Bucaramanga en el área de influencia del parque automotor; básicamente por los valores altos de arsénico (0.04 mg/L); no existe presencia significativa de nitratos, sólidos disueltos, que son característicos de afectación industrial, tal como se describe anteriormente en el análisis de las muestras tomadas en cada pozo, sin cerrar la posibilidad de que esta importante fuente hídrica subterránea sea influenciada por los lixiviados generados en El Carrasco, aguas abajo del área de influencia del vertedero.

La influencia de los lixiviados en el área de El Carrasco se muestra en la figura 5, se observa la relación de los lixiviados y la dinámica en el área de influencia a diferentes colores llevados desde rojo, donde se evidencia directamente la carga contaminante de lixiviados generados en las celdas de disposición de residuos sólidos, contaminación que actúa a una profundidad de 54.50 m, (SEV 2), en donde se identifica una unidad geológica saturada, con presencia de aguas subterráneas. El color rojo evidencia una contaminación extrema; pasando por diferentes niveles hasta llegar al color azul donde la pluma contaminante es baja.

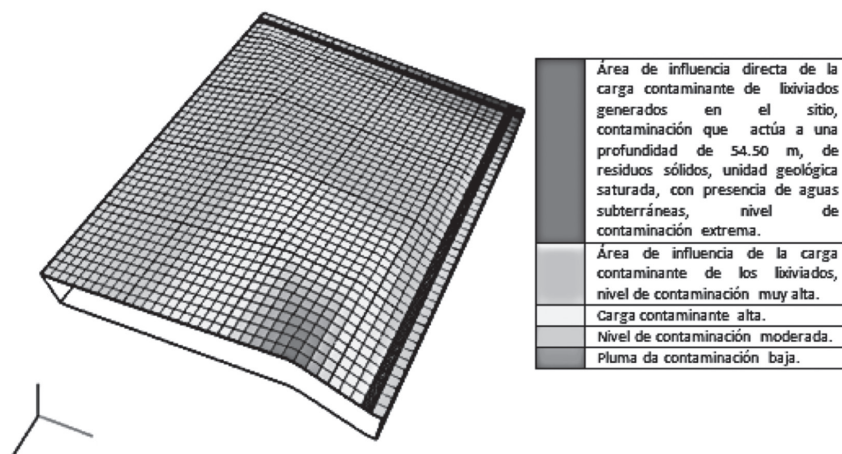


Figura 5. Influencia de los lixiviados en el área de El Carrasco

Fuente: elaborado por los autores

## DISCUSIONES

- La concentración de cada parámetro físico-químico y metal pesado analizado en los lixiviados se puede comparar con la encontrada en estudios realizados en rellenos sanitarios de Latinoamérica; sin embargo, El Carrasco tiende a concentrar los contaminantes en el medio hidrogeológico por acumulación de residuos sólidos a lo largo de los años, específicamente 38 años de ineficiente manejo de los lixiviados, los cuales son incorporados al agua subterránea, situación evidenciada por medio del SEV 2, localizado en la zona de la cárcava I, celda actual de disposición (Robles-Martínez, 2011).
- El volumen estimado de lixiviados generados en el vertedero de residuos es de 129.996 m<sup>3</sup>/año los cuales representan una fuente puntual de contaminación al acuífero subyacente a la zona de estudio. El empleo de metodologías combinadas como geofísica, geología, hidrogeología y geoquímica aplicadas en el estudio permitió identificar dos zonas en el área de influencia directa e indirecta de El Carrasco: una de ellas, con resistividades bajas y la otra con altos valores. La primera se encuentra asociada a la anomalía generada por los

lixiviados, observada especialmente en la celda actual de disposición, en donde se evidencian zonas totalmente saturadas por los lixiviados que no fueron manejados de manera adecuada en el sitio de disposición; esto sucede porque desde el inicio de operación, el sitio no contó con las condiciones técnicas, que minimizaran las afectación al recurso hídrico subterráneo por la alta carga contaminante presente en los lixiviados, flujo que se mueve verticalmente en dirección al acuífero profundo de Bucaramanga, situación tolerada por las condiciones de permeabilidad presentes en el miembro Órganos (Gómez, 2008), el cual se encuentra a una profundidad de 54.50 m, que es contenedor del acuífero en mención.

## CONCLUSIONES

- El perfil estratigráfico de la zona muestra capas alternadas de suelo areno-arcilloso con materia orgánica, con depósitos intercalados por material areno-arcilloso y gravas con capas de relleno sanitario, que reflejan la baja retención de agua en los estratos que conforman los perfiles.
- Los contaminantes contenidos en los lixiviados son conducidos por los estratos



con mayor conductividad hidráulica correspondientes a las unidades geoeléctricas IV, V y VI del SEV-2, ubicadas por debajo de los 14.0 m de profundidad a los cuales se localiza posiblemente el nivel freático, altamente intervenido por lixiviados debido a las condiciones de saturación, lo cual indica afectación ambiental por carga contaminante en las unidades geológicas localizadas en la celda actual de disposición.

- En las concentraciones de los parámetros físico-químicos analizados en el agua subterránea de los pozos se evidencia que algunos parámetros se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma; sin embargo, para el arsénico generan especial preocupación, ya que este puede generar intoxicación gradual en un lapso de 5 a 20 años que resulta en cánceres de la piel, la vejiga y los riñones, entre otras enfermedades.
- Aunque la clausura y remediación del sitio serían las acciones más convenientes, el Área Metropolitana de Bucaramanga no cuenta con terrenos que sustituyan el actual vertedero, por lo que se seguirá utilizando para disponer los residuos que genera la población. Por lo anterior, es recomendable establecer etapas de cierre y la ejecución de tomografías eléctricas en todo el sector del vertedero, con el fin de tomar medidas que prevengan que los contaminantes contenidos en los lixiviados alcancen el agua subterránea disponible para los usuarios.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Corporación Autónoma para la defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo del presente trabajo, enmarcado en el proyecto de investigación “Grado de afectación ambiental de los acuíferos por la infiltración de lixiviados provenientes de la disposición final de los residuos sólidos urbanos en El Carrasco”.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bahaa-eldin E., (2010). Deterioration of groundwater quality in the vicinity of an active open tipping site in West Malaysia. *Hydrogeology Journal*, 18(5), 997-1006.
- EMAB. (2011). *Estudio de impacto ambiental, para la ampliación de la disposición final de residuos sólidos en El Carrasco*. Empresa Municipal de Residuos Sólidos, Bucaramanga.
- Gomez y Duran, G. (2013). *Localización y georreferenciación de puntos de aguas subterráneas, en los pozos ubicados en la parte occidental de la ciudad de Bucaramanga y el Rio de Oro*. (UIS, Ed.) Bucaramanga.
- Gómez, S. (2008). *Interacción entre los sistemas hidrogeológicos en el macizo de Santander para el estudio de la recarga e identificación de acuíferos*. Proyecto COLCIENCIAS.
- Gonzalez J y Camargo, B L. (2010). González, J. y Camargo B L. *Vulnerabilidad a la Contaminación del Agua Subterránea en la Zona Aluvial de Bucaramanga*. Bucaramanga: Proyecto de Grado. Bucaramanga: UIS.
- Hans-Jürgen, E. (s.f.). *Cantidad y Contenidos de Lixiviados de Rellenos de Desechos Domésticos*. Recuperado el 12 de enero de 2015, de cepis.org.pe: <http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/curso/cantidad/cantidad.html>
- McDonald, M. (1988). 3. McDONALD, M. y H (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Model*. U.S Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations.
- Proactiva, chicamocha. (2013). *Producción de lixiviados en El Carrasco, municipio de Bucaramanga*. Bucaramanga.
- Relleno sanitario (Landfill). *El Carrasco, Bucaramanga, Colombia*. (s.f.). Recuperado el 15 de enero de 2015, de Environmental Justice Atlas: <https://ejatlas.org/conflict/relleno-sanitario-landfill-el-carrasco-bucaramanga-colombia>
- Robles-Martínez, F. (2011). Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la ciudad de México. *Universidad y ciencia*, 27(2), 121-132.