

Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea

Héctor de León-Gómez^{1,*}, Carlos R. Cruz-Vega², René Alberto Dávila-Pórcel¹,
Fernando Velasco-Tapia² y José R. Chapa-Guerrero²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Ave. Pedro de Alba s/n, Cd. Universitaria, C.P. 66455, San Nicolás de los Garza, N.L. México.

² Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Carr. a Cerro Prieto km. 8, Ex-Hacienda de Guadalupe, C.P. 67700, Linares, N.L. México.

*hector.deleongm@uanl.edu.mx

RESUMEN

La presente investigación trata sobre la calidad de las aguas naturales afectadas por la contaminación de los lixiviados originados en el relleno sanitario municipal (RSM) de la ciudad de Linares, Nuevo León., en el NE de México. El RSM cuenta con más de 17 años de servicio y recibe más de 50 ton/día de desechos sólidos urbanos. Se aplicaron métodos geológicos (perfiles geológico-estructurales), hidrogeológicos (cartas piezométricas) e hidrogeoquímicos (clasificación de calidad de agua y determinación de contaminantes) para identificar agentes externos al medio natural. Se identificó un impacto negativo en la calidad del agua superficial (presa El Cinco) y del agua subterránea (pozos de agua) de acuerdo con normas ambientales nacionales e internacionales (NOM, WHO, US EPA). Los resultados revelan deficiencias en el manejo y depósito final de los residuos sólidos municipales (geomembrana desgarrada) y nula gestión de lixiviados (sobresaturación del RSM). En particular, se han identificado altas concentraciones de NO₃, Pb, Mn y Fe en el agua subterránea y en escurrimientos superficiales que generan una importante contaminación del suelo y del agua, aspecto muy relevante si las personas de la región consumen agua contaminada procedente de pozos que puede ocasionar efectos nocivos en su salud.

Palabras clave: lixiviados; residuos sólidos municipales; relleno sanitario; agua subterránea; Linares; México.

ABSTRACT

This research deals with the quality of natural waters affected by pollution from leachate generated in the Municipal Landfill of Linares, Nuevo Leon, Mexico. The Municipal Landfill of Linares has more than 17 years of service and receives more than 50 ton/day of municipal solid waste. Geological (geological structural profiles), hydrogeological (piezometric cards) and hydrogeochemical (water quality classification and determination of pollutants) methods were applied to identify external agents to the environment. A negative impact on the quality of surface water (dam El Cinco) and groundwater (wells) in accordance with na-

tional and international environmental standards (NOM, WHO, US EPA) were identified. The results reveal deficiencies in the management and final disposal of municipal solid waste (torn geomembrane) and null leachate management (oversaturation of the landfill). In particular, high concentrations of NO₃, Pb, Mn and Fe in groundwater and surface runoff were identifying, which generate a significant contamination of soil and water; aspect very important if people in the region consume contaminated water from groundwater wells, that can cause harmful health effects.

Key words: Leachat; municipal solid waste; landfill; groundwater, Linares; Mexico.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de los centros urbanos, a nivel mundial, es el confinamiento y manejo de los residuos domésticos municipales (Sumathi *et al.*, 2008). Su volumen y composición dependen del grado de desarrollo económico de la región (Kaoser *et al.*, 2000). En los países industrializados los desechos domésticos por persona por día (DD/P/D) alcanzan ~2 kg y están compuestos por papel, residuos orgánicos, vidrio, metales, plástico y otros desechos. En contraste, en los países en desarrollo, en los cuales se han reportado DD/P/D < 1 kg, predominan la madera, papel, residuos orgánicos y metales.

La población en México, con una economía en desarrollo, se incrementó en el periodo 1975-2010 de 30 a más de 112 millones de habitantes, de los cuales, aproximadamente, el 75% se concentra en áreas urbanas. Según Ojeda-Benítez *et al.*, (2000) y Ojeda y Beraud (2003) a nivel nacional, los DD/P/D se triplicaron entre 1975 y 1999, siendo el Distrito Federal la zona con mayor generación de residuos (DD/P/D = 1.314 kg en promedio). Para Nuevo León, con excepción de su zona fronteriza con los Estados Unidos de América, se ha reportado un valor promedio de DD/P/D = 0.935 kg. La composición y cantidad de los desechos sólidos no es homogénea, ya que varía en cada región de acuerdo a los hábitos de consumo de la población. Se puede señalar que en México se distribuyen en: 52.0% de residuos orgánicos, 14.0% de

papel y cartón, 5.9% de vidrio, 4.4% de plástico, 1.5% de textiles, 2.9% de metales y 18.9% de otros residuos como madera, desechos sanitarios, restos de construcción, entre otros. Existen muy pocos trabajos sobre la generación y manejo de residuos domésticos en centros urbanos de México (por ejemplo: Mexicali, Ojeda-Benítez *et al.*, 2000; Guadalajara, Bernache, 2003; Chihuahua, Gómez *et al.*, 2008; Ciudad de México; Muñoz-Cadena *et al.*, 2009).

Un RSM se define como el espacio destinado para la disposición final de desechos o basura urbana. En la construcción de un RSM se consideran diversos aspectos: (a) sistema de barreras laterales y de fondo, consistente de combinaciones de capas de arcillas y geomembranas de polietileno de alta densidad y que se caracterizan por mostrar bajas conductividades hidráulicas de $\sim 1 \times 10^{-9}$ m/s (Daniel y Wu, 1993; Cunningham *et al.*, 2005); (b) sistema de muestreo y eliminación de lixiviados (Robinson, 1984); (c) sistema de muestreo y control de gases como CH_4 y CO_2 (Carman y Vincent, 1998); y (d) sistema de monitoreo de agua subterránea (Bocanegra *et al.*, 2001).

Actualmente, las condiciones hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas que deben reunir las zonas destinadas a la operación y deposición final de los residuos sólidos municipales, así como el diseño de un RSM en México, están regulados por la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Estas disposiciones son complementadas por dos normas NOM adicionales: (a) NOM-052-SEMARNAT-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, y (b) NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. En el año 2005 se reportaron 95 RSM en todo México, de los cuales 5 se ubican en el estado de Nuevo León. Sin embargo, cerca del 50% de los residuos sólidos generados en el país, se depositan en tiraderos a cielo abierto y/o en RSM que no cumplen con los requisitos técnicos especificados en la NOM-083-SEMARNAT-2003, que aseguran su adecuado funcionamiento.

Un manejo deficiente de los residuos domésticos municipales es una causa potencial de contaminación ambiental, especialmente de la atmósfera, por adición de biogás, y de agua superficial y/o subterránea, como consecuencia de la dispersión de lixiviados (Oeltzschner y Mutz, 1996).

En este contexto, el presente trabajo tiene por objetivo evaluar el impacto del lixiviado generado en el RSM de Linares, Nuevo León sobre la calidad del agua superficial y subterránea, tomando como base la NOM-083- SEMARNAT-2003.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Linares, N.L. representa, después de la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), el centro urbano de mayor importancia en el estado. Cuenta con una población de 78,669 habitantes y constituye un importante polo de desarrollo debido a su producción agrícola-ganadera y su creciente industrialización. En la Figura 1 se muestra la localización del área de estudio y la ubicación del RSM de Linares, N.L.

A partir de 1980 y durante veinte años, los residuos sólidos generados en el municipio de Linares se depositaron en un tiradero a cielo abierto, el cual fue clausurado en febrero del año 2000 (Lizárraga-Mendiola, 2003; Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2005). En 1998 inició operaciones el RSM de Linares, N.L., en donde actualmente se confinan en promedio 50 ton/día de residuos sólidos municipales, generando un volumen de lixiviados de 3,240 m³ por año.

Esta investigación presenta los resultados del estudio de: (1) fisiografía, clima, geología e hidrogeología; (2) descripción del RSM y su evaluación en relación a la normativa vigente; y (3) análisis del impacto del RSM en las aguas superficiales y subterráneas de la zona de estudio. Además es la primera en su género que se realiza en el área del RSM.

MARCO GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

Fisiografía

La ciudad de Linares, N.L. se ubica dentro de la Planicie Costera del Golfo de México (PCGM) (Ruiz-Martínez y Werner, 1997), una provincia fisiográfica que se extiende ~ 700 km desde el río Bravo hasta el centro del estado de Veracruz y que es delimitada en su parte oeste por la Sierra Madre Oriental (SMO) y al este por el Golfo de México. La PCGM se caracteriza por mostrar un relieve ondulado formado

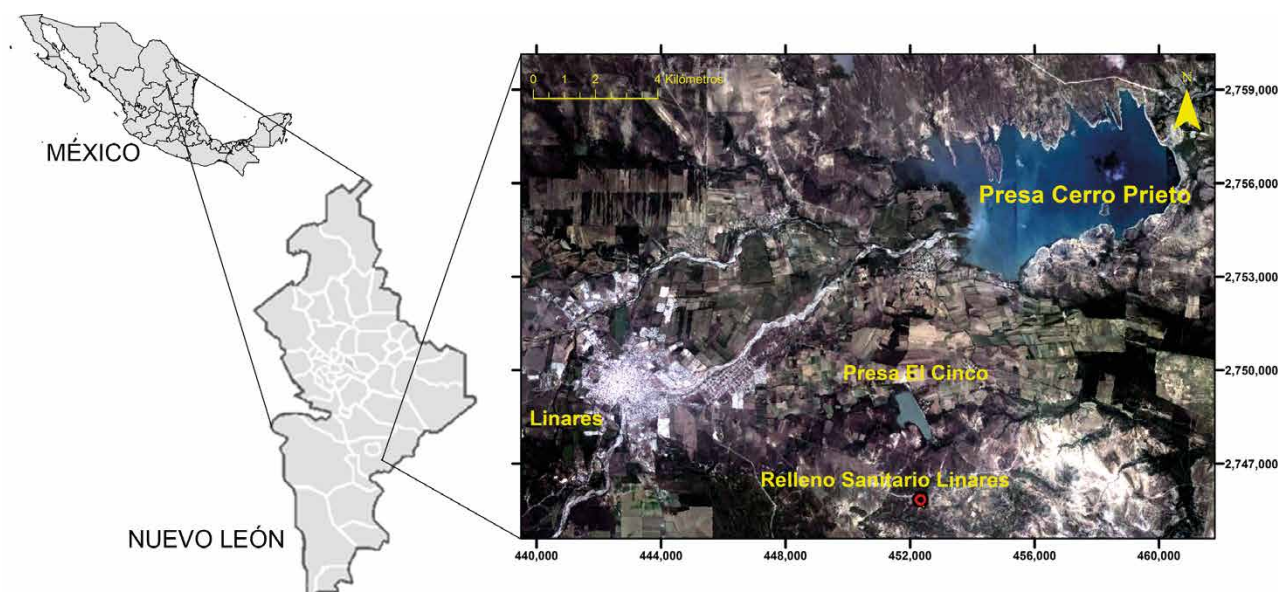


Figura 1. Localización del área de estudio y ubicación del relleno sanitario municipal (RSM) de Linares, N.L.

por lomas y lomeríos suaves con elevaciones de hasta 380 m s.n.m., constituidos por rocas sedimentarias del Cretácico Superior, que se alternan con planicies aluviales y sedimentos de piedemonte, las cuales alcanzan hasta 280 m s.n.m., con buzamientos generales hacia el SE.

Climatología

De acuerdo con la clasificación de Köppen (McKnight y Hess, 2000), el clima que predomina en el área de estudio es subtropical húmedo (Cfa). La precipitación media anual es de 650 mm, distribuyéndose principalmente en dos períodos (mayo-junio y septiembre-octubre). La mayor precipitación mensual se observa en septiembre (160-170 mm), mientras que la menor ocurre en enero (10-15 mm). La temperatura promedio anual es de 22 °C, observándose las temperaturas más bajas en diciembre-febrero (promedio 14 a 15 °C, con mínimos de -12 °C) y las más altas en julio-agosto (promedio 28 a 29 °C, con máximos de 49 °C), según la Comisión Nacional del Agua. La evaporación potencial anual es de 1,180 mm (Woerner, 1991). Sin embargo, en ocasiones, se observan eventos de precipitación extraordinaria de 267 mm en 72 horas, debido a los siguientes fenómenos: (a) el efecto del fenómeno “El Niño” o la entrada de corrientes húmedas denominadas “Nortes” durante el invierno (Cavazos, 1999); (b) el impacto de huracanes generados en el Océano Atlántico entre julio y octubre (Jáuregui, 2003), ciclones de gran intensidad (categoría >2 en la escala de Saffir- Simpson) han mostrado periodos de recurrencia de ~20 años (agosto 1909-Huracán 6; agosto 1938-Huracán 3; septiembre 1967-Beulah; septiembre 1988-Gilberto; julio 2005-Emily; julio 2010-Alex), también en la última década se han presentado extensas “sequías”, especialmente en los años 2011 y 2012. Las condiciones climatológicas anteriores, con comportamientos extremos, impactan en la hidrología e hidrogeología del área del RSM especialmente en la generación de lixiviados y su infiltración hacia las aguas subterráneas.

Geología y geología estructural

La región geológica, donde se ubica Linares, N.L. está delimitada al oeste por la SMO y al este por la sierra de San Carlos (SSC). La SMO es una cadena montañosa constituida por una secuencia de rocas sedimentarias carbonatadas, siliciclásticas y evaporíticas del Jurásico Superior al Cretácico Superior, las cuales fueron fuertemente plegadas y con fallas de cabalgadura durante el evento compresivo de la Orogenia Laramide (Padilla y Sánchez, 1982; Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer, 1999; Chávez-Cabello *et al.*, 2011). La SSC es un complejo magmático de 60 km de diámetro y que cubre una superficie de 3,600 km². La parte central del complejo se compone de plutones de gabro, monzonita y sienita, que intrusieron durante el Terciario temprano a las calizas de la Formación Tamaulipas Superior del Cretácico temprano. La periferia de la SSC está constituida por flujos de lava y cuellos volcánicos de composición básica (Treviso-Cázares *et al.*, 2005), (Figura 2a). Galván-Mancilla, 1996 describe de manera general la estratigrafía de la región de Linares considerando como base las lutitas y lutitas intemperizadas de la Formación Méndez del Cretácico superior y sobre ellas afloran de manera discordante una secuencia litológica compuesta de sedimentos cuaternarios de gravas altamente cementadas de 5 m de espesor, gravas-arenas-limos medianamente cementados de 37 m de espesor y sedimentos aluviales recientes (Figura 2b).

La estratigrafía local en el área de estudio cercana a Linares, se compone de rocas sedimentarias del Cretácico Superior, las cuales son cubiertas por depósitos de conglomerados y aluviones del Terciario y del Cuaternario. A partir de un estudio sísmico, se establece que los primeros 30 m del subsuelo en Linares pueden dividirse en cuatro horizontes de arriba hacia abajo: (a) 3 m de limo, (b) 12-15 m de aluvión, (c) 3 m de conglomerado, (d) rocas lutíticas (Montalvo-Arrieta *et al.*,

2005). La unidad más antigua en el área de estudio corresponde a la Formación San Felipe (Coniaciano-Santoniano), la cual aflora hacia la parte Este, especialmente en los alrededores de la presa Cerro Prieto. Esta unidad está constituida de una alternancia heterogénea de calizas, lutitas, margas, calizas silicificadas y cenizas volcánicas, todas ellas con intemperismo de grado alto, sobre 115 m de espesor de una secuencia rítmica depositada en una cuenca marina profunda (Seibert, 1986; De León-Gómez, 1993; Goldhammer, 1999). A esta unidad le sobreyace la Formación Méndez (Campaniano-Maastrichtiano), constituida por una secuencia de lutitas calcáreas de color gris oscuro y areniscas que fue depositada en una cuenca somera sometida a regresión marina (Padilla y Sánchez, 1982). Esta unidad, que cubre gran parte del área de estudio, aflora localmente en los flancos de la loma La Rinconada, en algunos cerros aislados, en donde puede alcanzar un espesor de hasta 80 m, y en los cauces de los arroyos, como el denominado La Castaña. Las rocas se encuentran altamente fracturadas, intemperizadas y suavemente plegadas, generando en algunos casos pequeños nódulos o sigmoides, lo que provoca una pérdida de la estratificación original. La unidad muestra evidencia de fracturamiento alto, con fracturas de hasta 2 cm de espesor, en ocasiones rellenas de calcita. El RSM de Linares, N.L. se encuentra instalado sobre esta unidad (Figura 3a).

En la zona de estudio se localizaron fallas inversas y lutitas con alto grado de fracturamiento, que podrían influir en la infiltración y la movilidad de lixiviados en el acuífero bajo el RSM, si es que éstas no se encuentran rellenas por calcita. Se consideraron tres estaciones para inventario estructural en los alrededores del relleno sanitario, las cuales se ubicaron en las zonas donde existían afloramientos. Los planos de estratificación (n=17) presentan una orientación predominante de convención Clar de 250°/39° y 100°/15°, formando un eje β de proyección espacial 167°/06° (Figura 3a).

La foliación se presenta casi paralela a la estratificación con una orientación 115°/20°, formando abundantes estructuras en forma de “lápiz”, lo cual dificulta la observación de la estratificación. Un aspecto masivo y el intenso intemperismo de las rocas en algunos sitios, contribuyen a esta problemática, condicionando la reconstrucción de estructuras plegadas suavemente. Sin embargo, se identificaron seis estructuras plegadas, considerando algunos planos de estratificación en capas de areniscas y lutitas, así como horizontes de calcita como relleno de falla. Estas estructuras tienen una continuidad muy limitada puesto que se encuentran cubiertas por depósitos de sedimentos aluviales. Una de ellas se localiza muy cerca del RSM, otras tres a unos 500 m al Este de la zona y las restantes sobre el arroyo. En La Castaña y la loma La Luz, la dirección preferencial de los ejes de estas estructuras es NW20°SE; su forma es de pliegues abiertos con un diámetro de curvatura de pequeñas dimensiones (Figuras 3a y 3b).

La importancia del estudio estructural radica en que el macizo rocoso, sobre el cual se ubica el RSM, se encuentra altamente fracturado debido a los esfuerzos principales que dieron origen a la SMO y la PCGM. El fracturamiento local que se detectó es de dos tipos: *ac*, el cual se origina en primera instancia durante los procesos de deformación compresionales de las rocas y se presenta en forma perpendicular al eje de las estructuras tectónicas (pliegues); y el *bc*, las cuales se forman en un estado de relajamiento después de la deformación tensional, siendo paralelas al eje de las mismas estructuras tectónicas. Este sistema podría representar una vía de transporte de especies inorgánicas u orgánicas que pudieran generar bulbos de contaminación. Se determinaron dos familias de fracturas: (1) tipo *ac*: con una orientación 147°/89° y (2) tipo *bc*: con una orientación 67°/72°, expresadas en sistema Clar. Las fracturas más abundantes son las de tipo *ac*, siendo las que controlan la dirección preferencial del flujo del agua subterránea, como se muestra en la configuración obtenida de la carta piezométrica del área de estudio (Figura 4).

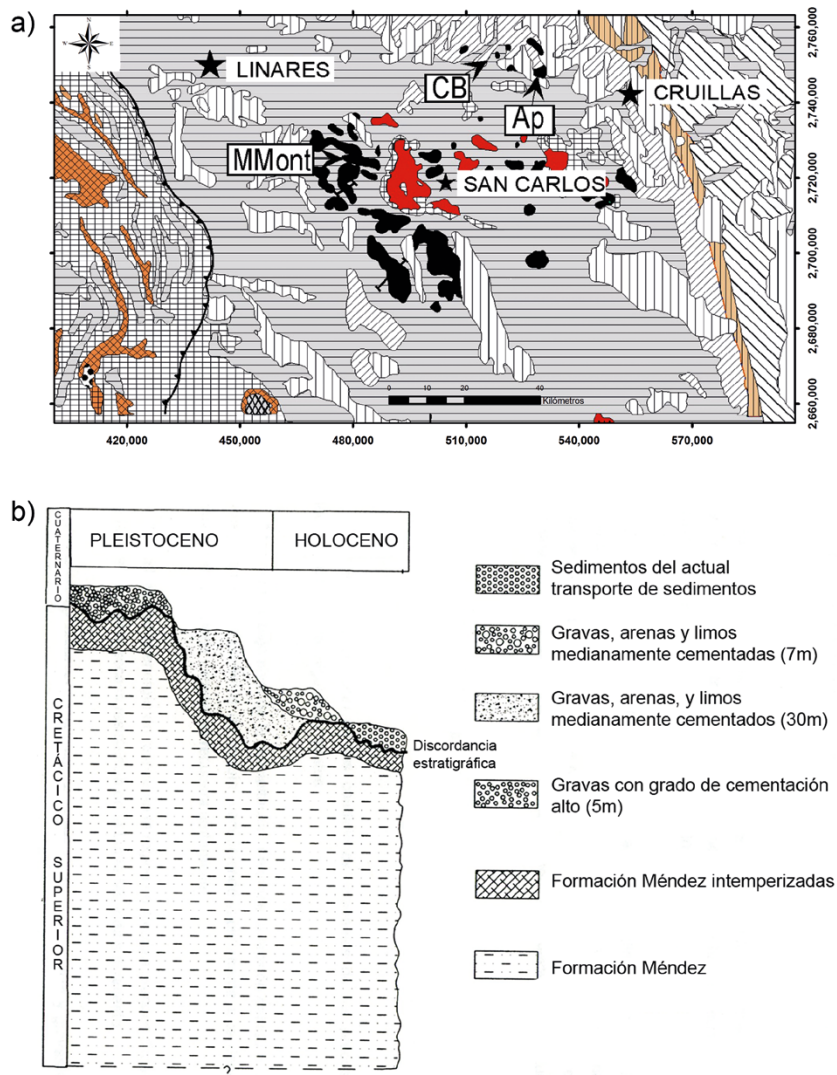


Figura 2. Geología y estratigrafía general del área de estudio. (a) Mapa geológico regional del área de estudio de la Sierra de San Carlos-Cruillas (SCC, modificado de Ramírez-Fernández, 1989). Localidades de Xenolitos del Manto: CB, Cerro Burgos; Ap, Cerro Apóstol; y MMont, Mesa Monteros (Treviño et al., 2005). (b) Columna estratigráfica general de Linares y de las cercanías del RSM, modificado de Galván (1996).

Las unidades cretácicas son cubiertas por terrazas aluviales y sedimentos no consolidados originadas en diferentes edades desde el Plioceno al reciente (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2005). Este material fue transportado desde los cañones de la SMO, aunque también incluye fragmentos de la SSC. Ruiz-Martínez y Werner (1997) realizaron la descripción y clasificación de estos depósitos, proponiendo la existencia de cinco niveles de terrazas en la región de estudio, que van desde el nivel más alto y antiguo (T5) hasta las gravas del lecho o terrazas de inundación reciente (T1). Estos autores sugirieron que estos depósitos fluviales son producto de cambios rítmicos de acumulación y erosión inducidos climáticamente durante un levantamiento tectónico. En el RSM se han identificado terrazas del nivel T3, (Ruiz-Martínez y Werner, 1997). La terraza T3 (Figura 3b) está constituida por depósitos de conglomerados de hasta 3 m de espesor, que coronan las partes más elevadas de las lomas existentes. El conglomerado está formado por fragmentos (2-400 mm), subredondeados a redondeados, compuestos de calizas, pedernales y calcita incluidos en una matriz fina arenosa. Es común encontrar algunas capas de caliche de hasta 40 cm de espesor que los cubren de manera local. La mayor parte del

área de estudio se encuentra cubierta por depósitos de suelo arcillo-limoso de espesores entre 2–3 m, transportados por acción del agua y el viento.

El depósito más reciente de tipo aluvial se localiza en la porción SW del RSM y forma una franja orientada NW-SE, que es paralela al arroyo principal. Este depósito consiste en fragmentos de calizas, pedernales, lutitas y calcita de hasta 25 cm de espesor, de forma redondeada y mal clasificados.

Hidrología e hidrogeología

Hidrológicamente, el área de estudio se ubica en el borde NW dentro de la Subcuenca del Arroyo Camacho (SAC), con una superficie de 1,529 km², que pertenece a la Región Hidrológica No. 25, denominada San Fernando-Soto La Marina. Para la SAC se ha reportado un promedio anual de escurrimiento de ~70 Mm³. Las principales corrientes superficiales dentro de la SAC son el arroyo El Bagre, con una dirección aproximada W-E y el arroyo El Anegado, con una dirección SW-NE. En las cercanías del RSM existe una corriente intermitente denominada arroyo La Castaña, con una dirección W-E.

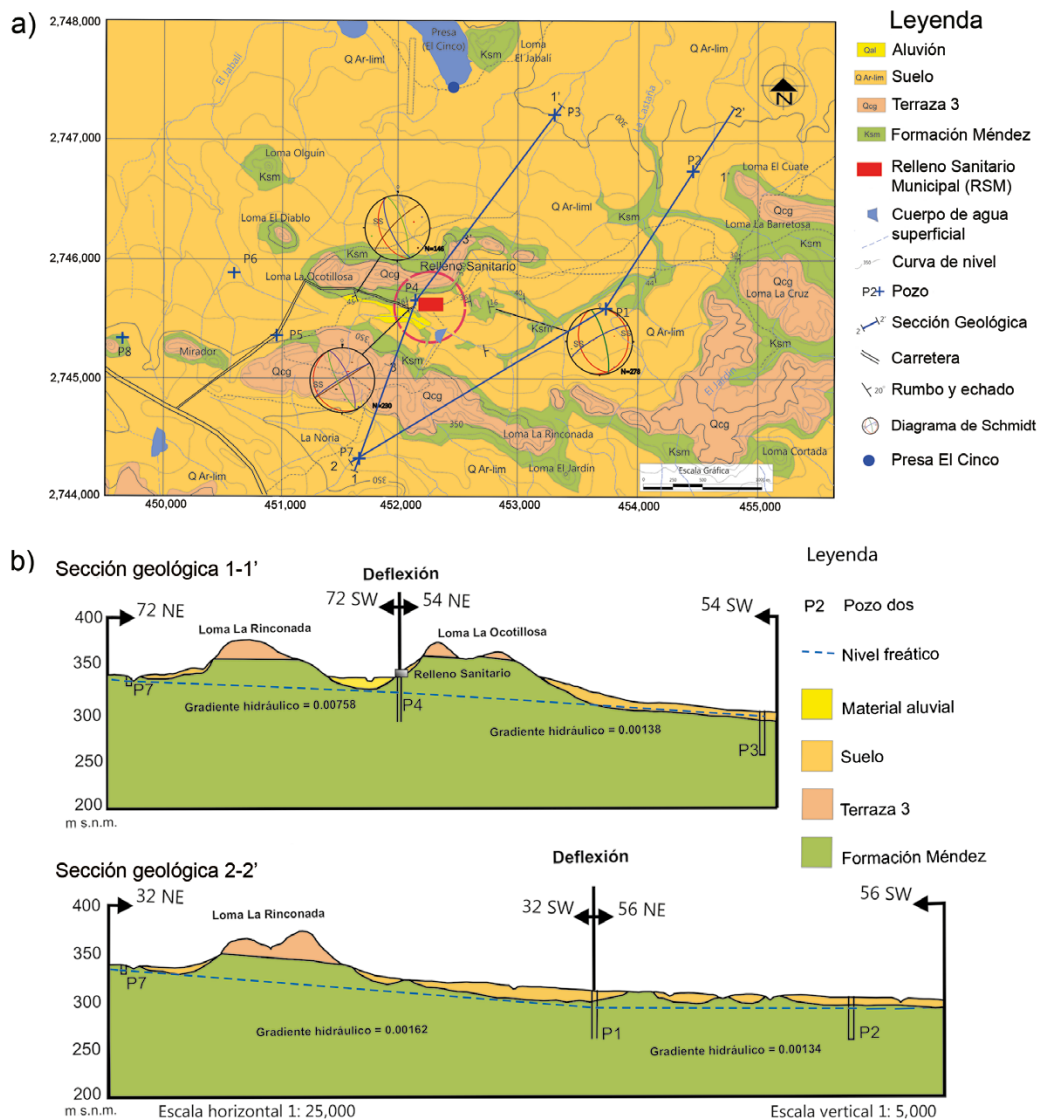


Figura 3. Geología y secciones geológicas del relleno sanitario municipal (RSM). (a) Carta geológico-estructural del área de estudio del RSM. (b) Secciones geológicas 1-1' y 2-2' del RSM.

Otra corriente superficial importante en la región, es el río Pablillo, que le da nombre a la subcuenca, perteneciente a la Región Hidrológica No. 24, que colinda al Oeste de la SAC y que se encuentra a menos de 15 km del RSM de Linares, N.L. (Figura 5).

El río Pablillo nace a unos 60 km al SW de Linares entre las localidades de Pablillo y El Infiernillo (3,167 m s.n.m.) en la SMO. Este río fluye en una dirección SW-NE, pasando por Linares, donde se le unen los ríos Hualahuises y Camachito. El río Pablillo presenta conductividades de 455–800 $\mu\text{mhos/cm}$, un pH = 7.1–7.4 y una química de tipo cálcico-sulfatada-bicarbonatada (Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo, 1993). Actualmente, Serna de la Cruz (2011) reporta conductividades del río Pablillo entre 1,546 y 1,592 $\mu\text{mhos/cm}$, un pH = 6.85–8.22 y una clasificación química de aguas de la familia cálcico-mixtas (bicarbonatadas-sulfatadas).

Existen dos sistemas hidrogeológicos que acumulan y movilizan el agua subterránea en la SAC (Figura 6): (a) acuífero de grietas, constituido de lutitas y calizas Cretácicas con apertura entre fracturas de 5-50 mm y una orientación preferencial SW-NE, y (b)

acuífero de poros, conformado por gravas, arenas, limos y arcillas del Terciario y Cuaternario (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2006). Sin embargo, la Formación Méndez representa al acuífero principal en el área de estudio, ya que el nivel freático en la región del RSM y región de Linares, N.L., tiene profundidades del nivel estático con variaciones de 2.5 hasta 20 m y direcciones generales del flujo del agua subterránea SW-NE (Anderson y Aguilera, 1986; Rojas-Ruiz y Méndez-Delgado, 1986; Rangel Rodríguez, 1989; Drescher, 1995; De la Garza-González, 2000; Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2005; Montalvo-Arrieta *et al.*, 2005; Quintanilla-López, 2005; Moreno-Esparza, 2009; Dávila-Pórcel, 2011).

La carta piezométrica elaborada durante esta investigación, indica una dirección preferencial SWS-NEE para el flujo del agua subterránea hacia el arroyo La Castaña y las lomas El Cuate, La Barretosa y La Cruz (Figura 7). Esto coincide con el sistema principal de fracturamiento *ac* de la zona. Por otra parte, en el Oeste del área, el flujo subterráneo tiende a moverse en dirección Norte a través de la loma La Ocotillo hacia la presa El Cinco.



Figura 4. Lutitas altamente fracturadas de la Formación Méndez, localizadas a 1 km al Este del RSM. Coordenadas UTM: 452,100E, 2'745,550N.

CARACTERÍSTICAS DEL RSM Y CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA OFICIAL MEXICANA

Investigaciones hidrogeoquímicas de rellenos sanitarios (RS) realizadas por Van den Brink y Zaadnoordijk (1995), Howard *et al.*, (1996), Langmuir (1997), Soliman *et al.*, (1998), Abu-Rukah y Al-Kofahi (2001) y Böhlke, (2002) demostraron que los rellenos sanitarios y tiraderos no controlados que contienen desechos sólidos, contaminan las aguas superficiales y subterráneas. Adicionalmente,

surge el problema asociado con la saturación y sobresaturación de los volúmenes máximos de deposición según diseño, aunado a la rápida urbanización de los alrededores de los rellenos sanitarios. La principal amenaza son los materiales químicamente peligrosos contenidos en los residuos sólidos y líquidos depositados sin ninguna restricción, ya que éstos pueden ser movilizados a través de procesos de infiltración en forma de lixiviados; sin olvidar, en este sentido, que la actividad de la agricultura genera efectos negativos como la disolución y el transporte de fertilizantes y pesticidas. El principal y más común de los contaminantes que se generan durante las actividades agrícolas y ganaderas es el ion nitrato.

El RSM de Linares, N.L., se ubica a 8 km al SE de la ciudad de Linares, junto a un lomerío denominado La Ocotillosa, y ocupa una superficie de ~20,000 m² (Figura 8). Por la cantidad de residuos que recibe (~50 ton/día) es clasificado como un RSM de categoría B (NOM-083-SEMARNAT-2003); por su diseño, se clasifica como RSM de tipo pendiente, el cual se desarrolla a partir de una pendiente natural y que va ganando altura. Desde el año de 1998 entró en operación y considerando los parámetros de estimación del lixiviado generado en el RSM según la WHO (2000), las condiciones de precipitación (800 mm/año), los cinco meses de lluvia consecutiva, el área (20,000 m²) y grado de compactación de la basura (k: 0,50), se obtuvo un volumen de lixiviado de 3,240 m³ en el año.

El RSM cuenta con una geomembrana preparada a base de polímeros de alta resistencia con 2 mm de espesor. De acuerdo con observaciones en el sitio, el RSM cumple con las consideraciones generales que marca la Norma Oficial Mexicana (NOM-083-SEMARNAT-2003):

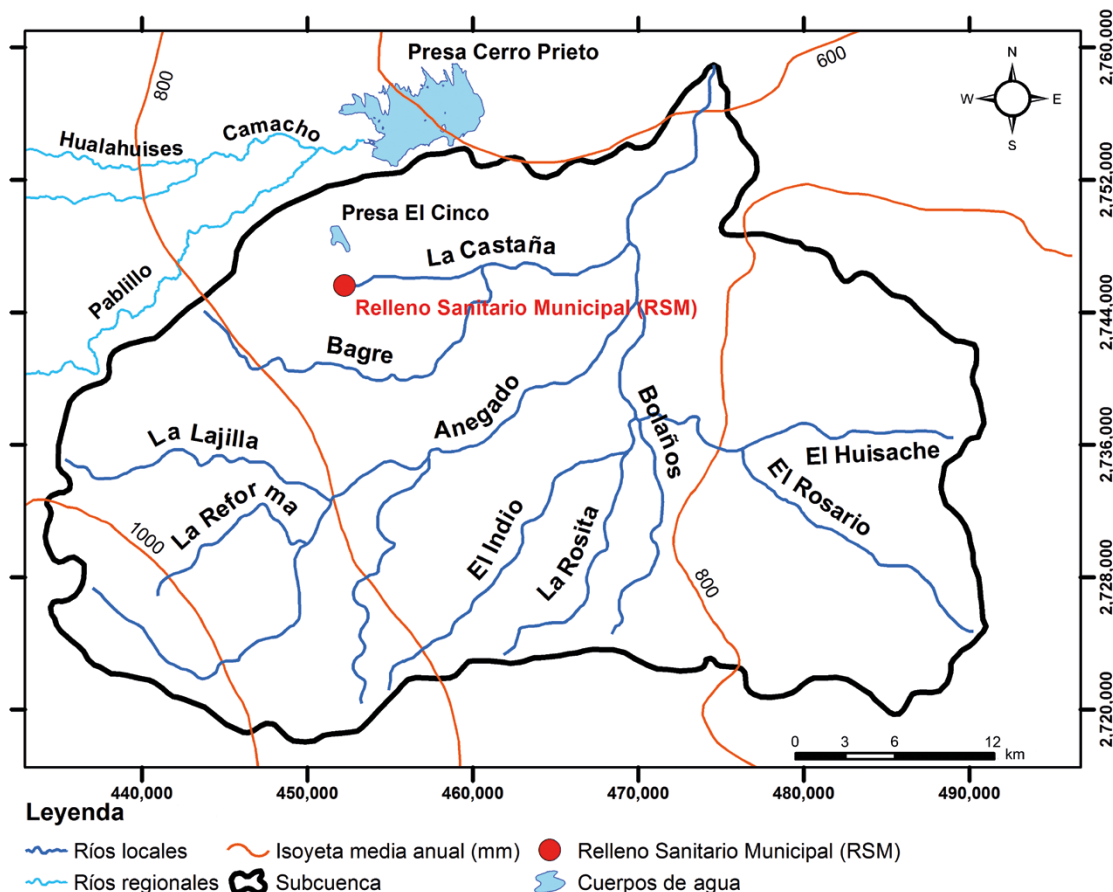


Figura 5. Carta hidrológica de la subcuenca Arroyo Camacho. (Carta de Hidrología de Aguas Superficiales G14-11, INEGI, 1983).

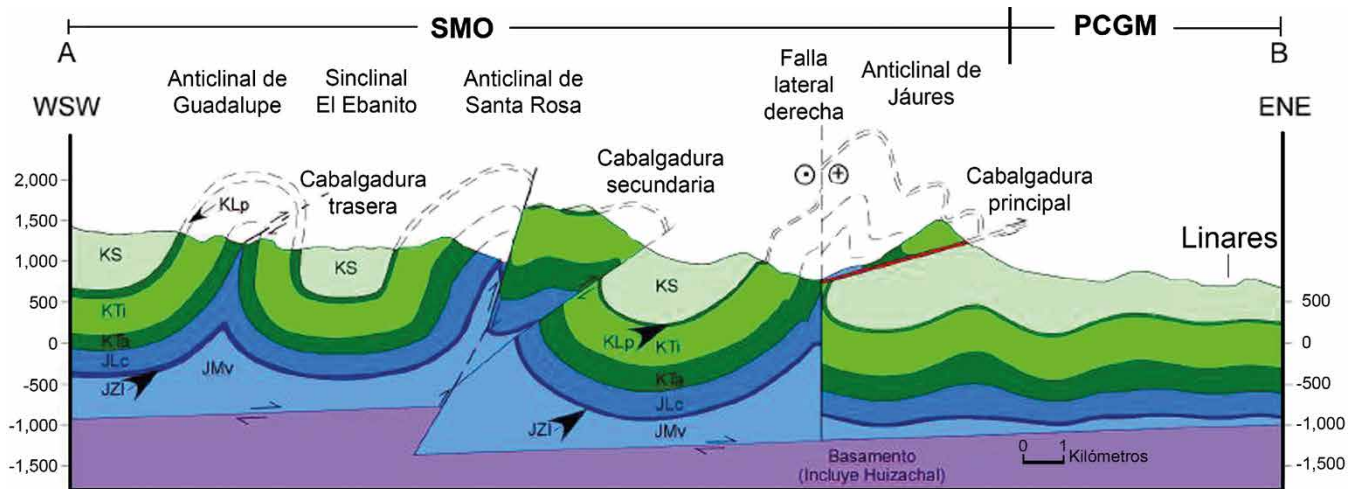


Figura 6. Sección geológica de la región del Cañón Linares-Santa Rosa, N.L. (modificado de Chávez-Cabello *et al.*, 2011). Clave: JMv: Jurásico, Fm. Minas Viejas; JZi: Jurásico, Fm. Zuloaga; JLv: Jurásico, Fm. La Casita; KTa: Cretácico, Fm. Tamaulipas Superior; KTi: Cretácico, Fm. Tamaulipas Inferior; KLP: Cretácico, Fm. La Peña; KS: Cretácico Superior, Fm. Tamaulipas Superior, Fm. Cuesta del Cura, Fm. Agua Nueva, Fm. San Felipe y Fm. Méndez. SMO: Sierra Madre Oriental, PCGM: Planicie Costera del Golfo de México.

(a) no existen aeródromos en sus alrededores, (b) la zona donde se encuentra no pertenece a un área natural protegida, (c) se ubica a una distancia mayor a 500 m del límite de la traza urbana, (d) se encuentra a una distancia mayor a 500 m de cuerpos de agua superficiales, y (e) se ubica en un área que no está expuesta a inundaciones.

Sin embargo, el RSM de Linares, N.L. presenta importantes deficiencias en relación a la normativa vigente, ya que: (a) dada su definición sólo debería recibir residuos domésticos, sin embargo actualmente recibe todo tipo de desechos, incluyendo baterías, solventes

orgánicos, pinturas y otro tipo de residuos considerados peligrosos; (b) carece de un sistema de drenaje que evite los escurrimientos superficiales provenientes de los sitios más elevados de la loma La Ocotillosa, lo que provoca que se incremente el volumen de lixiviados, principalmente en periodos de lluvia; (c) no cuenta con pozos de monitoreo de agua subterránea, a fin de evaluar el pH, sólidos totales disueltos (STD), conductividad eléctrica, temperatura, fenoles, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y de metales (Al, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg, Cd, As, Ag y Cu); (d) no presenta un

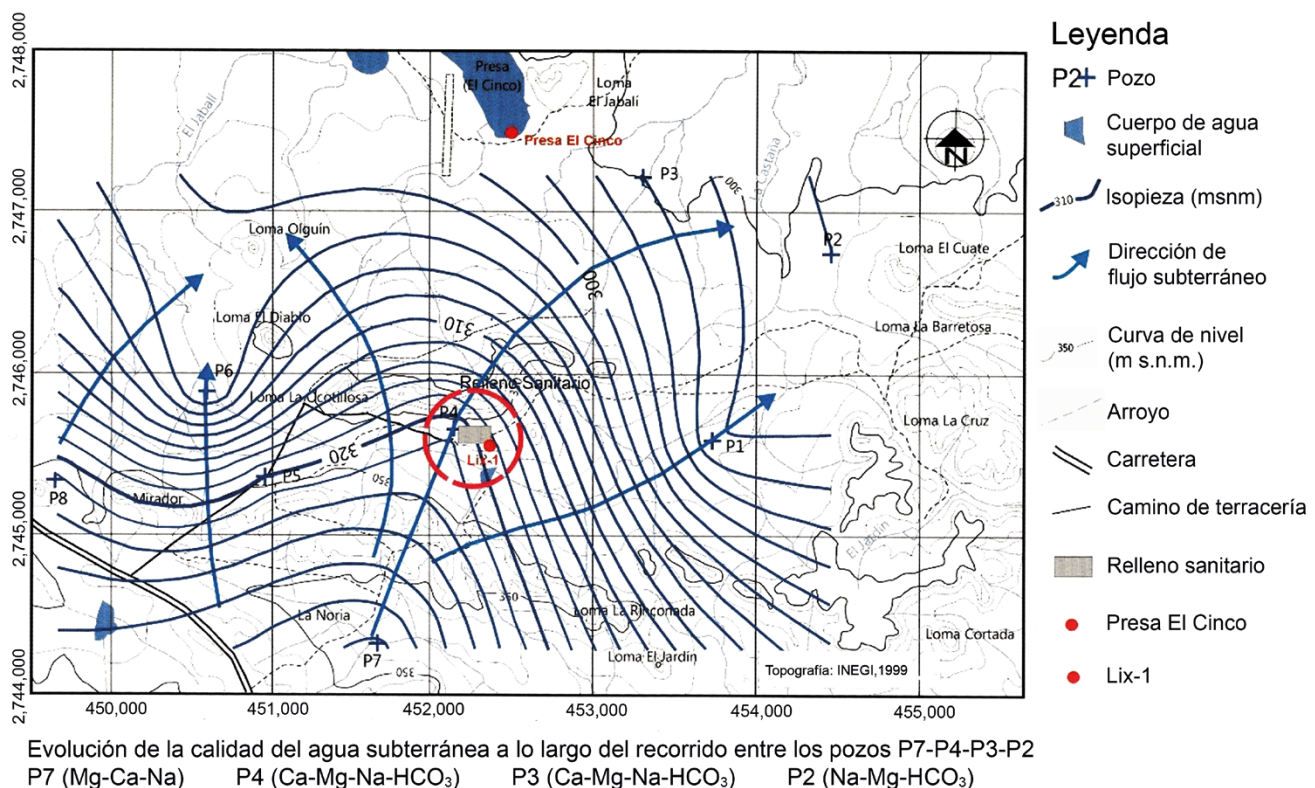


Figura 7. Carta piezométrica del área del relleno sanitario municipal (RSM) y su evolución en la química del agua subterránea en los pozos P7-P4-P3-P2.



Figura 8. Sobrevista del relleno sanitario municipal, Linares, N.L.

sistema de medición de las emisiones de gases, particularmente N_2 , CH_4 y H_2S ; (e) la geomembrana instalada en el RSM presenta rupturas por la operación de la maquinaria Bulldozer destinada al acomodo y compactación de los residuos (Figura 9); (f) se depositan y acumulan residuos en sitios que no cuentan con la geomembrana de protección, lo cual sobrepasa el volumen máximo del RSM; (g) no incluye un sistema eficiente de tratamiento de lixiviados, los cuales son desechados directamente en una corriente que forma un lago, que a su vez alimenta al arroyo La Castaña (Figura 10). Es común que en época de lluvias el lago de lixiviados se desborde.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al no cumplir con todos los lineamientos especificados en la NOM-083-SEMARNAT- 2003, el RSM de Linares, N.L. afecta a los recursos hídricos de la región, especialmente al agua subterránea cercana al RSM y a la presa El Cinco. El abastecimiento de agua de la ciudad de Linares es cubierto por un sistema de pozos que se localizan al Oeste del RSM. Por tal motivo, se muestrearon y realizaron análisis fisicoquímico-bacteriológico del agua subterránea de los pozos (P1, P2, P3, P4, P7 y P8), de la presa El Cinco y del lixiviado (Lix-1) procedente del RSM, en diciembre del 2004 y junio del 2005, obteniéndose 2 muestras por cada aprovechamiento hidráulico existente. Cabe aclarar que los pozos P5 y P6 no fueron muestreados por problemas técnicos y de acceso. Las profundidades del muestreo de los pozos variaron desde los 43 hasta los 50 m.

En cada punto de muestreo se realizaron mediciones in-situ de temperatura ($^{\circ}C$), conductividad eléctrica ($\mu mhos/cm$), pH y potencial redox (mV). Adicionalmente, se determinó la alcalinidad ($mgCaCO_3/l$) por volumetría ácido-base con HCl 0.02 N. Posteriormente, se colectaron muestras para ser analizadas en laboratorio aplicando los métodos estándares de la normativa de SEDUE (1992), las Normas Oficiales Mexicanas (NOM-AA-20-1980, NOM-AA-34-1981, NOM-AA-36-1980, NOM-AA-73-1981, NOM-AA-74-1981, NOM-AA-72-1981), y los métodos normalizados de la APHA, AWWA y WPFC (1992), orientadas a determinar (1) especies mayoritarias que incluyen cationes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} y K^{+}) y aniones (HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , Cl^{-} , SO_4^{2-} y NO_3^{-}); (2) iones metálicos (Al^{+3} , Cr^{+2} , Mn^{+2} , Fe^{+2} , Zn^{+2} , As^{+3} , Ba^{+2} y Pb^{+2} en $\mu g/l$); y (3) bacteriología.

En la Tabla 1 se presenta la composición química de especies mayoritarias y de iones metálicos y la Tabla 2 contiene los parámetros fisicoquímico-bacteriológicos para las muestras colectadas en la periferia del RSM. En general, las muestras presentan un balance iónico con signo negativo, que implica un exceso de aniones en relación a especies catiónicas (Hem, 1985; Deutsch, 1997).



Figura 9. Geomembrana del RSM, nótese la ruptura generada por la operación de maquinaria pesada. Coordenadas UTM: 452,300E, 2'745,700N.

El diagrama de Piper (Figura 11), permite identificar un patrón general de evolución desde aguas de tipo $Ca-HCO_3$ a un dominio de $Ca-HCO_3-SO_4$. Este comportamiento puede interpretarse como resultado de la disolución de rocas carbonatadas y en menor medida, evaporíticas (yeso) que dominan la litología de la región. Se evidenció que existe una evolución en la composición química del agua subterránea a los largo de los pozos P7-P4-P3 y P2 y que es paralela a las direcciones de flujo del agua subterránea en los pozos indicados.

El bajo contenido de cloruros se debe a la presencia de rocas lutíticas presentes en la parte superficial del área de estudio y a la recarga por infiltración de la precipitación que no contiene cloruros. No obstante el cloruro es un elemento conservativo, es decir que no es atenuado por el suelo, pero si es afectado por dilución; proceso por el cual se aumenta la concentración de cloruro, derivado de los constituyentes del lixiviado Lix-1. En este contexto la difusión (fenómeno físico-químico) y dispersión (fenómeno mecánico) son mecanismos por los cuales el lixiviado es diluido por el acuífero, observándose así que en el pozo P4, que se localiza dentro del RSM, existen concentraciones altas del Cl^{-} (102 mg/L) y altas concentraciones de especies disueltas acorde a



Figura 10. Lixiviados provenientes del relleno sanitario municipal (RSM), fluyendo hacia el arroyo La Castaña. Coordenadas UTM: 452,500E, 2'745,500N.

Tabla 1. Parámetros químicos y metales pesados de muestras de agua del relleno sanitario municipal de Linares, N.L., y comparación con normas nacionales e internacionales para calidad del agua (intervalos o niveles máximos).

Muestra	NO ₃ ⁻ (*)	SO ₄ ²⁻ (*)	Cl ⁻ (*)	DT (**)	DP (**)	Na ⁺ (*)	K ⁺ (*)	Al (***)	Si (***)	Cr (***)	Mn (***)	Fe (***)	Zn (***)	As (***)	Ba (***)	Pb (***)
P1-A	1.10	34.60	42.00	78.00	50.40	197.00	2.10	-	13,900.00	-	-	270.00	50.00	4.90	114.00	1.40
P1-B	0.00	37.40	39.80	93.00	48.90	203.00	2.90	-	16,000.00	12.00	25.00	-	23.00	1.20	174.00	-
P2-A	2.50	90.50	55.60	116.00	62.20	223.50	3.10	-	14,500.00	-	17.00	154.00	-	1.00	64.00	-
P2-B	14.90	52.70	40.20	310.00	173.90	96.00	2.90	-	17,000.00	9.00	-	-	5.00	0.70	108.00	-
P3-A	23.00	112.40	40.10	392.00	278.60	45.50	2.20	-	13,600.00	-	3.00	323.00	47.00	0.40	70.00	-
P3-B	4.40	129.20	39.80	368.00	249.00	45.20	2.30	-	13,000.00	-	28.00	-	15.00	0.50	65.00	70.40
P4-A	12.60	47.30	82.00	488.00	312.20	76.40	2.90	-	16,200.00	-	1,850.00	329.00	>2500	0.40	169.00	-
P4-B	6.20	52.30	102.50	508.00	324.10	98.00	3.40	-	18,000.00	6.00	1,730.00	200.00	1,180.00	0.90	178.00	0.10
P7-A	7.80	34.60	39.10	314.00	187.70	51.60	2.30	-	16,200.00	-	1.00	272.00	-	1.00	84.00	-
P7-B	2.10	38.70	38.80	262.00	158.10	68.00	5.50	-	15,000.00	-	2.00	-	-	1.90	67.00	-
P8-A	156.80	116.90	179.60	616.00	387.30	90.20	2.40	-	13,100.00	6.00	2.00	640.00	165.00	1.20	83.00	0.50
P8-B	95.20	30.00	84.20	288.00	132.40	95.00	3.60	-	13,000.00	-	1.00	-	15.00	-	69.00	0.20
El Cinco-A	1.70	105.80	18.90	212.00	176.80	12.20	3.60	167.00	6,350.00	-	2.00	246.00	-	1.10	83.00	1.40
El Cinco-B	0.00	158.00	51.70	276.00	235.10	25.00	5.20	340.00	7,000.00	-	7.00	200.00	-	1.00	120.00	0.20
Lix-1-A	274.60	132.70	1,117.40	820.00	415.00	1,605.30	651.00	3,830.00	41,300.00	1,600.00	262.00	20,700.00	395.00	40.00	768.00	19.00
Lix-1-B	699.00	82.30	1,286.80	800.00	379.40	737.10	469.00	1,600.00	469,000.00	590.00	420.00	9,000.00	160.00	27.00	690.00	42.00
NOM-127-SSA-1994	10.00	400.00	250.00	500.00		200.00		200.00		50.00	150.00	300.00	5,000.00	25.00	700.00	10.00
WHO, 2000	50.00	500.00				200.00		50-200		50.00	500.00		3,000.00	10.00	300.00	10.00
US EPA, 2001	10.00	250.00	250.00							100.00	50.00	300.00	5,000.00	50.00	2,000.00	15.00

Unidades: * mg/l, ** mgCaCO₃/L, *** µg/l; claves: En la columna de Muestra: A=Campaña de muestreo en diciembre 2004; B=Campaña de muestreo en junio 2005. DT=Dureza Total, DP=Dureza Parcial.

sus conductividades hidráulicas de 1,229 µmhos/cm, en comparación con el resto de los pozos del área de estudio.

Las muestras P1 y P2, situadas en el sitio de lomeríos en donde aflora la Formación Méndez al Este del RSM, se desvían del patrón ya descrito y están caracterizadas por un dominio de tipo Na-HCO₃ (Figura 11). Este comportamiento puede interpretarse como resultado de la interacción de agua tipo Ca-HCO₃ con los minerales arcillosos (montmorillonita-illita, X), con altos contenidos de Na⁺, que constituyen las lutitas de la Formación Méndez. La interacción va acompañada de la reacción de intercambio iónico: X-Na⁺ + ½Ca²⁺ + Na⁺ + ½X₂-Ca²⁺, como resultado de una mayor afinidad de Ca²⁺ que Na⁺ en el intercambiador sólido (Deutsch, 1997).

Desde el punto de vista ambiental, se observan valores importantes en las muestras de aguas superficiales y subterráneas con respecto a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA-1994), de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2000) y de la Agencia de Protección al Ambiente de los EEUU (US EPA, 2001) para aguas destinadas a consumo humano (Tabla 1). En este sentido, es necesario destacar la presencia de altos contenidos de NO₃⁻ (>10 mg/l) en los pozos P2, P3 y P8, de los cuales, P2 y P3 se encuentran influenciados por los lixiviados del RSM, hecho que se justifica por las direcciones particulares de flujo del agua subterránea, las cuales son en dirección al NE; finalmente, el último pozo, P8, se encuentra impactado de manera puntual por una serie de hatos ganaderos, que son los que proveen los altos nitratos. Además en el pozo P3 se detectó un alto contenido de Pb (70 µg/l). El pH de esta muestra es casi neutro (6.8), pero un desplazamiento a condiciones ácidas podría dar lugar al predominio de plomo disuelto (Pb²⁺) sobre complejos órgano-metálicos, el cual es más tóxico. Se ha documentado que si este ion metálico excede la NOM, puede tener efectos nocivos en los sistemas nervioso y reproductor, así como

provocar alta presión, anemia y varios tipos de cánceres en seres humanos (Putnam, 1986).

La muestra Lix-1 se caracteriza por una alta conductividad eléctrica (6,820 y 11,950 µmhos/cm), un pH ~8 y una química de tipo Na-HCO₃ (Tabla 2; Figura 11). Es evidente una falta de balance iónico (BI < -7.0%), lo que indica un fuerte exceso de aniones. Esto podría explicarse como resultado de reacciones de sílice soluble/insoluble con el sistema carbonato-bicarbonato bajo condiciones de pH básico, efecto que no puede ser detectado durante la medición de alcalinidad o la determinación de sílice disuelto (Johnson *et al.*, 1979).

Según los criterios propuestos por Ehrig (1989), la composición del lixiviado (Tabla 2) indica un estado de fermentación metanogénica vinculada con los cambios climatológicos, especialmente a las temperaturas altas prevalecientes por largos periodos en el RSM, proponiendo una curva global teórica de conductividad (CE) – sólidos totales disueltos (STD) para México (CE = 1.40*STD + 18), que representaría valores de un umbral para CE a partir de los cuales un lixiviado podría ser considerado potencialmente peligroso. Este modelo fue aplicado en el RSM de Puebla, México (Marín *et al.*, 2001), de acuerdo a esta propuesta, los lixiviados que se generan en el RSM de Linares muestran valores de CE comparables o superiores al valor de umbral de potencial de peligrosidad. De manera particular, el lixiviado Lix-1 ha mostrado concentraciones de NO₃⁻ (~700 mg/l) que rebasan el límite de la legislación mexicana para aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-1996). La presencia de este ion en agua para consumo humano puede provocar el defecto respiratorio denominado metahemoglobinemia o “síndrome del niño azul”, que se presenta especialmente en infantes durante el primer año de vida y en adultos de la tercera edad (Socias-Viciano *et al.*, 2008). El NO₃⁻ es reducido por bacterias anaerobias del sistema digestivo (por ejemplo, E. coli)

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de campo y laboratorio para muestras de agua recolectadas en el relleno sanitario municipal de Linares, N.L., y sus alrededores.

Muestra	Coordenadas	Profundidad NE		Mesofilicos ²	Coliformes ²	Coliformes ²	DBO5	T	pH	Eh	Conduct.	STD	STS	Alcalinidad
	UTM	(m)		aerobios	totales	fecales								
	Este/Norte	Dic.-2004	Jun.-2004	UFC/100 ml	UFC/100ml	UFC/100ml	mg/l	°C		mV	µmhos/cm	mg/l	mg/l	mgCaCO ₃ /l
P1-A	453,739 /	15.70	17.70	530	5	0	<2.0	24.1	7.8	0.261	993	655	37	470.2
P1-B	2'745,594			450	18	4	6.4	31.6	7.8		1,104	628	2	505.3
P2-A	454,470 /	15.80	16.90	984	20	0	5.6	24	7.2	0.342	1,608	881	971	486.1
P2-B	2'746,746			520	12	2	<2.0	28.6	7.1		1,018	649	39	447.9
P3-A	453,301 /	2.80	4.10	599	5	0	4.9	26	6.9	0.344	984	635	21	352.4
P3-B	2'747,215			610	10	4	4.2	29	7.3		840	649	2,325	324.8
P4-A	452,132 /	15.80	17.80	1,600	42	4	4.1	24.9	6.8	0.216	1,149	755	10	514.4
P4-B	2'745,664			506	12	4	4.7	31.8	6.8		1,229	733	45	498.9
P7-A	451,660 /	1.00	1.40	678	8	0	6.3	19.3	7.8	0.352	845	532	45	378.4
P7-B	2'744,335			596	15	5	6.2	31	8		700	423	13	312.1
P8-A	449,652 /	40.70	44.40	610	6	0	<2.0	17.6	7.8	0.346	1,661	1,155	221	307.0
P8-B	2'745,338			459	20	0	4.6	42.5	7.8		938	488	148	248.4
El Cinco-A	452,500 /			459	6	0	3.9	17	8.1	0.362	449	318	83	131.4
El Cinco-B	2'747,475			896	15	5	2.5	30.7	8.1		612	407	104	108.3
Lix-1-A	452,375 /			10,650	65	35	15.6	18	8.1	0.064	11,950	10,178	425	4,078.8
Lix-1 B	2'745,575			3,250	120	25	424	38.3	7.8		6,820	4,706	131	2,144.2

Claves: En la columna de Muestra: A = Campaña de muestreo en diciembre 2004; B = Campaña de muestreo en junio 2005. ²Cuenta en placa estándar.

a NO_3^- , quien oxida el Fe^{+2} de la hemoglobina a Fe^{+3} , impidiendo la unión reversible de aquel al O_2 evitando su transporte en el flujo sanguíneo. Recientemente, se ha reportado que existe un aumento del riesgo de adquirir el linfoma de anti-Hodgkin, un tipo de cáncer linfático, en personas que consumen agua con elevados niveles de nitratos (Hamilton *et al.*, 2007).

Por otra parte, en el lixiviado Lix-1 es evidente que hasta el momento la movilización de metales (Cr, Ni, Zn, As, Ba y Pb) ha sido muy limitada en condiciones aeróbicas ($\text{Eh} = 0.06$) y de $\text{pH} \sim 8$. Las configuraciones de los metales pesados Mn (P4), Zn (P4), Fe (P3, P4 y P8) y Pb (P3) muestran una contaminación muy puntual en el acuífero, con origen en el relleno sanitario, y que rebasa la legislación de la NOM y la US EPA. Sin embargo, una variación hacia condiciones ácidas podría provocar su transferencia a fase acuosa (Xiaoli *et al.*, 2007), afectando los aprovechamientos hidráulicos de suministro de agua de la zona de estudio.

CONCLUSIONES

A los cinco años posteriores al inicio de la deposición de los desechos sólidos en el RSM (1998) y al incremento repentino en el volumen de residuos sólidos municipales, aunado al cierre del "Tiradero Municipal de Linares" en el año 2000, los habitantes de las rancherías aledañas reportaron anomalías y olores en la superficie de sus terrenos y en sus pozos de agua.

Aunque el RSM de Linares, N.L. cumple en términos generales con los lineamientos que marca la normativa actual, presenta importantes deficiencias como geomembrana rota y nula gestión de lixiviados que pueden afectar a los aprovechamientos hidráulicos de aguas superficiales (presas El Cinco y Cerro Prieto), localizadas la primera a 2 km al Norte y la segunda a casi 8 km al NE del RSM, y a los aprovechamientos subterráneos (sistema de pozos) ubicados en las cercanías del RSM. El análisis químico de aguas superficiales (Presa El Cinco y arroyo

de lixiviados) y subterráneas (pozos) aledaños al RSM, ha revelado altas concentraciones de NO_3^- (>10 mg/l) en los pozos P2, P3, P4 y P8; concentraciones de Pb (>10 µg/l) en el pozo P3; concentraciones de Mn (>150 µg/l) en el pozo P4 y finalmente concentraciones de Fe (>300 µg/l) en los pozos P3, P4 y P8; cuyos valores exceden la Norma Oficial Mexicana (NOM) y la legislación de la Agencia de Protección Ambiental (US EPA) y que son potencialmente peligrosas para la salud humana de los habitantes de localidades Las Barretas, Los Rincón y la presa El Cinco. De igual forma, el lixiviado muestra un exceso de NO_3^- y existe el riesgo potencial de una movilización de metales, por lo que es necesario implementar un programa de monitoreo y seguimiento de la

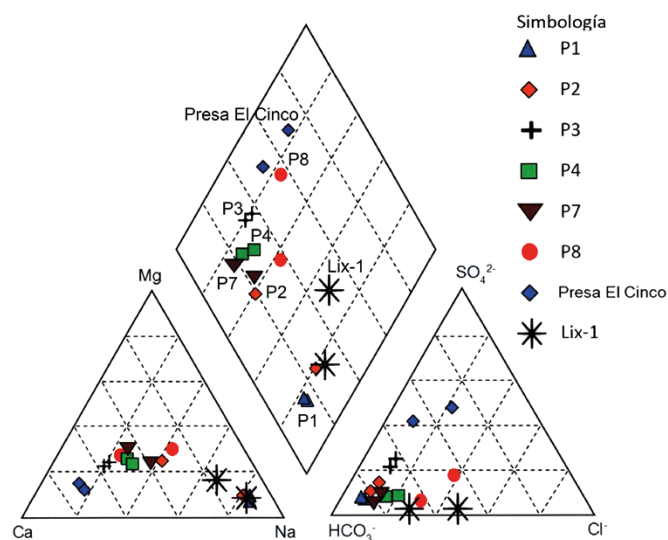


Figura 11. Diagrama de Piper (meq/L) donde se muestra los aprovechamientos de agua del área del relleno sanitario municipal (RSM) y sus alrededores.

operación del RSM, así como del tratamiento de los lixiviados aplicando métodos como: (a) coagulación- floculación (Amokrane *et al.*, 1997), (b) el método Fenton (Gau y Chang, 1996), o (c) métodos anaerobios (Gülsen y Turan, 2004). Finalmente se recomienda elaborar a futuro el modelado hidrogeoquímico de las aguas del RSM, para observar el comportamiento químico de los contaminantes, su interacción con el medio físico (suelos y rocas) y los procesos hidroquímicos que se desarrollan con las aguas superficiales y subterráneas, para conocer adecuadamente el sistema acuífero y determinar los mejores mecanismos de atenuación y mitigación del impacto negativo sobre las fuentes de agua.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ayuntamiento Municipal de Linares, N.L. (Administración 2003-2006) por el apoyo financiero y logístico. Se agradece el apoyo del personal del laboratorio de Geoquímica de la FCT-UANL durante el muestreo y el análisis hidrogeoquímico. El segundo autor agradece al CONACYT por la beca recibida para desarrollar estudios de Maestría en Ciencias Geológicas. La investigación recibió fondos del Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT)/ CT1202-05 de la UANL (Responsable: Dr. Héctor de León Gómez).

REFERENCIAS

- Abdu-Rukah., Al-Kofahi, O., 2001, The assessment of the effect of landfill leachate on groundwater quality -a case study-, El-Akader landfill site-north Jordan: *Journal of Arid Environments*, 49, 615-630.
- Amokrane, A., Comel, C., Veron, J., 1997, Landfill leachates pretreatment by coagulation- flocculation: *Water Research*, 31, 2775-2782.
- Anderson, B.B., Aguilera, V.M., 1986, Push faults, a conceptual model for groundwater exploration in the Sierra Madre Oriental foreland: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 9/10, 1149-1160.
- APHA-AWWA-WPFC (American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation), 1992, Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales: España, Ed. Díaz de Santos, 1816 pp.
- Bernache, G., 2003, The environmental impact of municipal waste management: the case of Guadalajara metro area: *Resources, Conservation and Recycling*, 39, 223-237.
- Bocanegra, E., Massone, H., Martínez, D., Civit, E., Farenga, M., 2001, Groundwater contamination: risk management and assessment for landfills in Mar del Plata, Argentina: *Environmental Geology*, 40, 732-741.
- Böhlke, J.K., 2002, Groundwater recharge and agricultural contamination: *Hydrogeology Journal*, 10, 153-179.
- Chávez-Cabello, G., Torres-Ramos, J.A., Porras-Vázquez, N.D., Cossío-Torres, T., Aranda-Gómez, J.J., 2011, Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León (Structural evolution of the tectonic front of the Sierra Madre Oriental at the Santa Rosa Canyon, Linares, N.L.): *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, No. 2, 253-270.
- Carman, R.E., Vincent, R.K., 1998, Measurements of soil gas and atmospheric methane content on one active and two inactive landfills in Wood County, Ohio: *Environmental and Engineering Geoscience*, 4, 317-329.
- Cavazos, T., 1999, Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in Northeastern Mexico and Southeastern Texas: *Journal of Climate*, 12, 1506-1523.
- Cunningham, W.P., Cunningham, M.A., Saigo, B.W., 2005, *Environmental Science: A Global Concern*: New York, NY, McGraw – Hill Science, 620 pp.
- Daniel, D.E., Wu, Y.-K., 1993, Compacted clay liners and covers for arid sites: *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, 223-237.
- Dávila-Pórcel, R. A., 2011, Desarrollo sostenible de usos de suelo en ciudades en crecimiento, aplicando hidrogeología urbana como parámetro de planificación territorial: caso de estudio Linares, N. L., México: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, tesis de doctorado, 263 pp.
- De La Garza-González, S.I., 2000, Estudio geológico/hidrogeológico de la región citrícola Linares-Hualahuises, Nuevo León, NE-México: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, tesis de licenciatura, 151 pp.
- De León-Gómez, H., 1993, Die Unterläufigkeit der Talsperre José López Portillo/Cerro Prieto auf einer Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge bei Linares, Nuevo Leon/Mexiko: *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie/RWTH Aachen*, 53, 1-181.
- Deutsch, W.J., 1997, *Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination*: Boca Raton, Lewis Publishers, 221 pp.
- Drescher, H., 1995, *Geologische und Hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, Nuevo Leon, Mexiko*: Christian Albrechts-Kiel Universität, tesis de maestría, 80 pp.
- Ehrig, H.-J., 1989, Leachate quality, *en* Christesen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R. (eds.), *Sanitary Landfilling: Process, Technology, and Environmental Impact*: Londres, Inglaterra: Academic Press, 213-229.
- Galván-Mancilla, S. M., 1996, Cartografía hidrogeológica de la terraza baja entre Hualahuises y Linares, N.L.: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, tesis de licenciatura, 63pp.
- Gau, S.H., Chang, F.S., 1996, Improved Fenton Method to remove recalcitrant organics in landfill leachate: *Water Science Technology*, 34, 455-462.
- Goldhammer, R.K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico: *Geological Society of America Special Paper*, 340, 1-58.
- Gómez, G., Meneses, M., Ballinas, L., Castells, F., 2008, Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico: *Waste Management*, 28, 2465-2471.
- Gülsen, H., Turan, M., 2004, Anaerobic treatability of sanitary landfill leachate in a fluidized bed reactor: *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 28, 297-305.
- Hamilton, A.J., Stagnitti, F., Xiong, X., Kreidl, S.L., Benke, K.K., Maher, P., 2007, Wastewater irrigation: the state of play: *Vadose Zone Journal*, 6, 823-840.
- Hem, J.D., 1985, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2254, 1-263.
- Howard, F.K., Eyles, N., Livingstone, S., 1996, Municipal landfilling practice and its impact on groundwater resources in and around urban Toronto, Canada: *Journal of Hydrogeology*, 4(1), 64-79.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 1983, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Linares G14-11: Escala 1:250000*; 1 mapa.
- Jáuregui, 2003, E. Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico: *Atmósfera*, 1, 193-204.
- Johnson, W.D., Cole, T.J., Johnson, M., Mcpherson; W.P., Muir, G.L., Szcpanski, R., 1979, Ion balance in water analyses – The effect of added silica on the carbonate- bicarbonate titration: *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 30, 315-323.
- Kaoser, S., Barrington, S., Elektorowicz, M., 2000, Compartments for the management of municipal solid waste: *Soil and Sediment Contamination*, 9, 503-522.
- Langmuir, D., 1997, *Aqueous environmental geochemistry*: Prentice Hall, 600 pp.
- Lizárraga-Mendiola, L.G., 2003, *Análisis y Evaluación del Agua Subterránea del Área del Tiradero Municipal y La Petaca, Linares, N.L., México*: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, tesis de maestría, 89 pp.
- Lizárraga-Mendiola, L.G., De León-Gómez, H., Medina-Barrera, F., Nívar, J., 2005, Evaluation of the aquifer impacted by the landfill of Linares, Mexico: *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen*, 236, 225-244.
- Lizárraga-Mendiola, L.G., De León-Gómez, H., Medina-Barrera, F., Nívar, J., 2006, Calidad del agua subterránea en Linares, Nuevo León, México: *Revista Ciencia UANL*, 9, 426-430.
- Marín, L.E., Leal-Bautista, R.M., Rubio, R., Prieto, E., 2001, Geochemistry of the Chiltepec sanitary landfill, Puebla, Mexico: *Geofísica Internacional*, 40, 301-307.
- McKnight, T.L., Hess, D., 2000, *Physical geography: a landscape appreciation*:

- Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 223-226.
- Michalzik, D., Schumann, D., 1994, Lithofacies relations and palaeogeology of a Late Jurassic to Early Cretaceous fan delta to shelf depositional system in the Sierra Madre Oriental of north-east Mexico: *Sedimentology*, 41, 463-477.
- Montalvo-Arrieta, J.C., Quintanilla, Y., Tamez, A., Meneses, M., Ramos, L., Masuch, D., 2005, Microzonation of the Linares, Northeast Mexico area, based on geology and shear-wave velocity measurements: *Geofísica Internacional*, 44, 331-340.
- Moreno-Esparza, L., 2009, Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en la región de Linares mediante el método Drastic: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, tesis de licenciatura, 85 pp.
- Muñoz-Cadena, C.E., Arenas-Huetero, F.J., Ramón-Gallegos, E., 2009, Comparative analysis of the street generation of inorganic urban solid waste (IUSW) in two neighborhoods of Mexico City: *Waste Management*, 29 pp.
- Oeltzschner, H., Mutz, D., 1996, Guidelines for an appropriate management of sanitary landfill sites, Segunda edición: Munich, Alemania, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), GmbH, 79 pp.
- Ojeda, S., Beraud, J.L., 2003, The municipal solid waste cycle in Mexico: final disposal: *Resources Conservation and Recycling*, 39, 239-250.
- Ojeda-Benítez, S., Armijo De Vega, C., Ramírez-Barreto, M.E., 2000, The potential for recycling household waste: a case study from Mexicali, Mexico: *Environment & Urbanization*, 12, 163-173.
- Padilla y Sánchez, R.J., 1982, Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, Mexico: Austin, TX, University of Texas at Austin, tesis de doctorado, 217 pp.
- Putnam, R.D., 1986, Review of toxicology of inorganic lead: *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47, 700-703.
- Quintanilla-López, Y., 2005, Microzonación de la región de Linares, N.L., basada en la geología y velocidades de propagación de ondas sísmicas: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, tesis de licenciatura, 181 pp.
- Rangel-Rodríguez, M. M., 1989, Hydrogeologie des Universitäts-Campus der Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Mexiko: TH Darmstadt, tesis de maestría, 108 pp.
- Robinson, H., 1984, On-site treatment of leachate using aerobic biological techniques: *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 17, 31-37.
- Rodríguez de Barbarín, C.O., Barbarín-Castillo, J.M., 1993, Influencia de la geología regional, los ciclos estacionales y los asentamientos humanos en la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca de Linares-Cerro Prieto, N.L., México: *Geofísica Internacional*, 32, 221-235.
- Rojas-Ruiz, G., Méndez-Delgado, S., 1986, Consideraciones sobre el comportamiento de pozos hidrológicos en terrenos impermeables en la planicie frente a la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, México: *Actas Facultad Ciencias de la Tierra*, 1, 88-101.
- Ruiz-Martínez, M.A., Werner, J., 1997, Research into Quaternary sediments and climatic variations in NE Mexico: *Quaternary Research*, 43/44, 141-151.
- Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, 1981, Norma Oficial Mexicana NOM-AA-34-1981, Análisis de Agua.- Determinación de Sólidos: México, SEGOB. Serie Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Muestreo de Aguas, recurso electrónico < http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo:4667621/1981>, consultada en abril 2015.
- Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, Norma Oficial Mexicana NOM-AA-72-1981, Análisis de Agua.- Determinación de Dureza-Método del E.D.T.A.: México, SEGOB. Serie Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Muestreo de Aguas, recurso electrónico < http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo:4726347/1981>, consultada en abril 2015.
- Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, 1981, Norma Oficial Mexicana NOM-AA-73-1981, Análisis de Agua.- Determinación de Cloruros-Método Argentométrico: México, SEGOB. Serie Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Muestreo de Aguas, recurso electrónico < http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo:4696077/1981>, consultada en abril 2015.
- Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, 1981, Norma Oficial Mexicana NOM-AA-74-1981, Análisis de Agua.- Determinación del Ion Sulfato: México, CONAGUA. Serie Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Muestreo de Aguas, recurso electrónico < <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-074-1981.pdf>>, consultada en abril 2015.
- Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, 1980, Norma Oficial Mexicana NOM-AA-20-1980, Aguas.- Determinación de Sólidos Disueltos Totales: México, SEGOB. Serie Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Muestreo de Aguas, recurso electrónico < http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo:4859564/1980>, consultada en abril 2015.
- Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, 1980, Norma Oficial Mexicana NOM-AA-36-1980, Agua.- Determinación de Acidez Total y Alcalinidad Total: México, SEGOB. Serie Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Muestreo de Aguas, recurso electrónico < http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo:4860455/1980>, consultada en abril 2015.
- SSA (Secretaría de Salud), 1994, Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización: México, Secretaría de Salud. Serie Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios de Agua, recurso electrónico < <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>>, consultada en mayo 2015.
- SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología), 1992, Norma Técnica No. 360, que establece los procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento públicos y privados: México, SEDUE, Serie Normas Técnicas en Materia de Control de Residuos Sólidos y Contaminación del Suelo, recurso electrónico < <http://www.resol.com.br/textos/especifici.htm>>, consultada en mayo 2015.
- Seibert, E., 1986, Paleogeography of the San Felipe Formation (Mid-Cretaceous, NE Mexico) and facial effects upon the Inoceramids of the Turonian/Coniacian transition: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 9/10, 1171-1181.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2004, Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial: México, SEGOB, SEMARNAT, Serie Normas Oficiales en Materia de Residuos, recurso electrónico < <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/nom-083.pdf>>, consultada en abril 2015.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 1996, Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales: México, SEGOB, SEMARNAT, Serie Normas Oficiales en Materia de Aguas Residuales, recurso electrónico < <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO2470.pdf>>, consultada en abril 2015.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 1993, Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente: México, SEGOB, SEMARNAT, Serie Normas Oficiales en Materia de Residuos, recurso electrónico < <http://www.bordercenter.org/pdfs/MexicanOfficialStandardNOM-052-SEMARNAT-1993.pdf>>, consultada en abril 2015.
- Serna de la Cruz, A., 2011, Implicaciones litológicas sobre la composición química de las aguas subterráneas en la ciudad de Linares, Nuevo León, México: Cuenca del río Pablillo: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Tesina de Licenciatura, 66 pp.
- Socias-Vician, M.M., Ureña-Amate, M.D., González-Pradas, E., García-Cortés, M.J., López-Teruel, C., 2008, Nitrate removal by calcined hydrotalcite-type compounds: *Clay and Clay Minerals*, 56, 2-9.
- Soliman, M.M., LaMoreaux, P.E., Memon, B.A., 1998, *Environmental Hydrogeology*: Lewis Publishers, 386 pp.
- Sumathi, V.R., Natesan, U., Sarkar, C., 2008, GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill: *Waste Management*, 28, 2146-2160.
- Treviño-Cázares, A., Ramírez-Fernández, J.A., Velasco-Tapia, F., Rodríguez-Saavedra, P., 2005, Mantle xenoliths and their host magmas in the Eastern Alkaline Province (NE Mexico): *International Geology Review*, 47(12), 1260-1286.

- US EPA-2001 (US Environmental Protection Agency), 2001, Guidelines for drinking water quality, recurso electrónico <<http://www.usepa.gov>>, consultada en abril de 2015.
- Van den Brink, C., Zaadnoordijk, W.J., 1995, Evaluation of ground water contamination from nonpoint sources: a case of study: Ground Water, 33(3), 356-365.
- WHO-2000 (World Health Organization), 2000, Guidelines for drinking water quality, recurso electrónico <http://www.who.int./water_sanitation_health/dwq/gdwq3/en/index.html>, consultada en abril de 2015.
- Woerner, M., 1991, Los suelos bajo vegetación de matorral del Noreste de México, descritos a través de ejemplos en el Campus Universitario de la UANL, Linares, N.L. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, reporte científico, 22, 1-115.
- Xiaoli, C., Shimaoka, T., Xianyan, C., Qiang, G., Youcai, Z., 2007, Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: Implications in risk assessment and reclamation: Journal of Hazardous Materials, 144, 485-491.
- Manuscrito recibido: Mayo 7, 2015
Manuscrito corregido recibido: Octubre 7, 2015
Manuscrito aceptado: Octubre 10, 2015