

Artículo:

Estudio Geohidrológico aplicado a un predio contaminado por Hidrocarburo

Geohydrological study applied to a property contaminated by hydrocarbon

Diana-Guadalupe López-Torres¹, Reinaldo-David Martínez-Orozco¹, Oscar-Alberto Izaguirre-Ávila¹, Samuel Mar-Barón¹, Alfredo Chimely-Ortega¹

**Revista Interdisciplinaria de
Ingeniería Sustentable y Desarrollo
Social (RIISDS)**

Recibido: 16 de octubre de 2024

Aceptado: 25 de noviembre de 2024

Publicado: 20 de diciembre de 2024

Publicación anual editada por el
**Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca**

Desv. Lindero Tametate, S/N
Col. La Morita
C.P. 92100
Tantoyuca, Veracruz, México.
Teléfono: 789 8931680, Ext.196.

Correo electrónico:
revistadigital@itsta.edu.mx

Sitio WEB
<https://itsta.edu.mx/revistadigital>

ISSN 2448-8003

Editor responsable:
Dr. Horacio Bautista Santos

Copyright: Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

¹ Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas, México.

* Autor corresponsal: diana.lt@cdmadero.tecnm.mx

Resumen: El presente trabajo se concentró en describir la contaminación por hidrocarburo en un predio industrial ubicado en el puerto de Altamira, Tamaulipas. Las actividades realizadas fueron alineadas con las normativas vigentes e incluyeron investigaciones geofísicas con resistividad eléctrica, muestreo de compuestos volátiles del contaminante y muestreo de suelos, entre otros aspectos. El predio estudiado forma parte de una zona cercana al litoral, caracterizada por un ambiente sedimentario, dentro del cual se evaluó el comportamiento de los hidrocarburos en las rocas y sedimentos que componen dicho predio, con el objetivo de proponer un esquema de remediación efectivo. Dicho esquema busca eliminar la contaminación por hidrocarburos, restableciendo la calidad del suelo y permitiendo su liberación para usos futuros

Palabras clave: caracterización, resistividad eléctrica, contaminación, ambiente sedimentario.

Resumen

El presente trabajo se concentró en describir la contaminación por hidrocarburo en un predio industrial ubicado en el puerto de Altamira, Tamps. Las actividades realizadas fueron alineadas con las normativas vigentes e incluyeron investigaciones geofísicas con resistividad eléctrica, muestreo de compuestos volátiles del contaminante y muestreo de suelos, entre otros aspectos.

El predio estudiado forma parte de una zona cercana al litoral, caracterizada por un ambiente sedimentario, dentro del cual se evaluó el comportamiento de los hidrocarburos en las rocas y sedimentos que componen dicho predio, con el objetivo de proponer un esquema de remediación efectivo. Dicho esquema busca eliminar la contaminación por hidrocarburos, restableciendo la calidad del suelo y permitiendo su liberación para usos futuros.

Palabras clave: caracterización, resistividad eléctrica, contaminación, medio sedimentario

Abstract

The present work focused on the characterization of hydrocarbon contamination in an industrial property in the port of Altamira, Tamps. Within which the work marked by regulations was carried out, including geophysics with electrical resistivity, sampling of volatile elements of the contaminant and soil sampling, among others.

The property belongs to the area near the coast which presents characteristics very typical of said sedimentary environment within which the behavior of the contaminant in the rocks and sediments that make up said property was known in order to propose a remediation scheme and free it from all contamination by hydrocarbons that are affecting the soil.

Keywords: characterization, electrical resistivity, contamination, sedimentary environment

Introducción

La contaminación por hidrocarburos es uno de los principales problemas ambientales asociados con las actividades industriales y de extracción del petróleo y gas (Martínez et al. 2011). Este tipo de contaminación afecta de forma significativa los ecosistemas terrestres y acuáticos, alterando la calidad de los suelos, los recursos hídricos y en consecuencia, los procesos biológicos que dependen de estos medios. (Abirriga 2020)

El presente estudio se centra en la caracterización geohidrológica de un predio industrial afectado por contaminación de hidrocarburos, localizado en la planicie costera del Golfo de México. El objetivo principal es identificar las condiciones del subsuelo, evaluar la interacción entre los contaminantes y las unidades geológicas del área, y proporcionar datos clave para diseñar estrategias efectivas de remediación.

El suelo del área de estudio está compuesto principalmente por arcillas y arenas con bajos niveles de humedad en la superficie, característico de un ambiente lagunar y litoral, donde confluyen diversas corrientes provenientes de las partes más elevadas del continente hacia el Golfo de México. (Izaguirre 2013)

El análisis geohidrológico aplicado combina técnica como la tomografía eléctrica y los sondeos eléctricos verticales, con un enfoque integral para comprender el comportamiento de los contaminantes en un medio litoral. Estos enfoques no solo permiten localizar el nivel freático y las características del acuífero subyacente, sino que también revelan la dinámica de los sedimentos y su capacidad para almacenar y transferir contaminantes.

La finalidad del trabajo es contribuir a ampliar el conocimiento sobre la gestión ambiental de terrenos impactados por hidrocarburos y destacar la importancia de integrar estudios geohidrológicos en el diseño de soluciones sostenibles, para mitigar los efectos de la contaminación de suelos mediante técnicas no invasivas que complementen a la identificación de las zonas contaminadas. (Comisión Nacional Del Agua 2020).

Ubicación topográfica

El área de estudio se encuentra en el municipio de Altamira, Tamaulipas. La zona afectada dentro del predio evaluado se localiza en las siguientes coordenadas:

22° 28' 56.1" Norte

97° 54' 08.0" Oeste

El área de estudio se encuentra dentro de los terrenos pertenecientes al puerto industrial de Altamira, Tamaulipas, a una distancia aproximada de 1,400 metros al oeste de la margen occidental de la dársena de ciaboga de dicho puerto. Asimismo, a 4.5 kilómetros al este del punto contaminado, se localiza la línea de costa del Golfo de México, que constituye la entrada a las terminales marítimas situadas a lo largo de las márgenes del canal de navegación del puerto (Ver Figura 1).

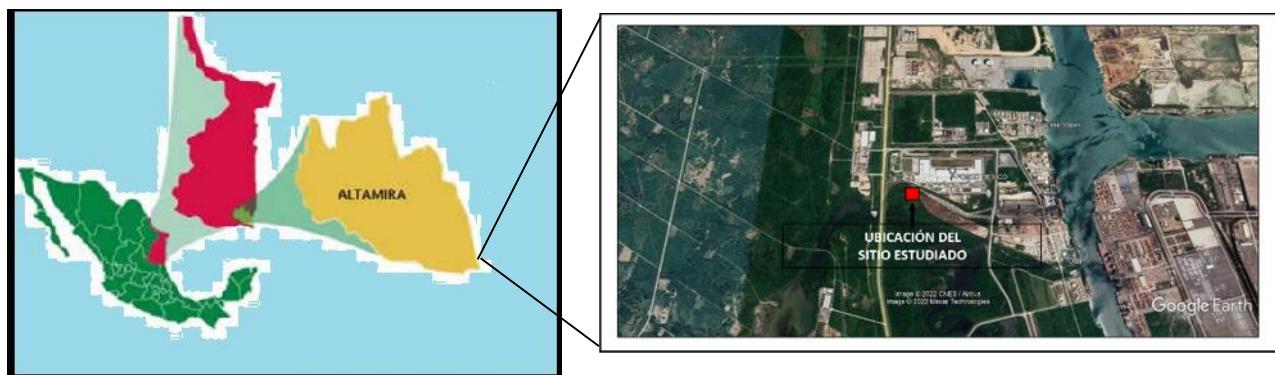


Figura 1. Ubicación del sitio estudiado ubicado en la proximidad del puerto industrial de Altamira, Tamaulipas, México. Fuente: autores

El sitio contaminado parece haber funcionado como una presa de desechos provenientes de la perforación de un pozo petrolero. Esta hipótesis se sustenta en el hallazgo de tuberías antiguas en las proximidades, las cuales podrían haber formado parte de la infraestructura de dicho pozo. Estas presas, construidas hace más de 50 años, generalmente carecían de controles y medidas de mitigación ambiental. Al finalizar las operaciones de perforación, eran abandonadas sin tratamiento alguno para remediar los efectos contaminantes, dejando un impacto ambiental significativo en el área. (SGM. 2004).

Materiales y métodos

El Sondeo Eléctrico Vertical es una herramienta ampliamente utilizada por su sencillez y la relativa economía del equipo necesario. Los materiales utilizados incluyen equipos convencionales como voltímetro digital, un miliamperímetro digital, cuatro electrodos metálicos, una pila de baterías y cables con longitudes suficientes. Los instrumentos digitales utilizados fueron de diferentes escalas de lectura acorde a los valores obtenidos. Las pilas se pueden conectar en serie y obtener una tensión de trabajo suficiente, sobre todo para separaciones grandes de los electrodos metálicos. La Figura 4 muestra un ejemplo de los arreglos utilizados para los sondeos eléctricos verticales (Loke, 1996, Busquest 1995).

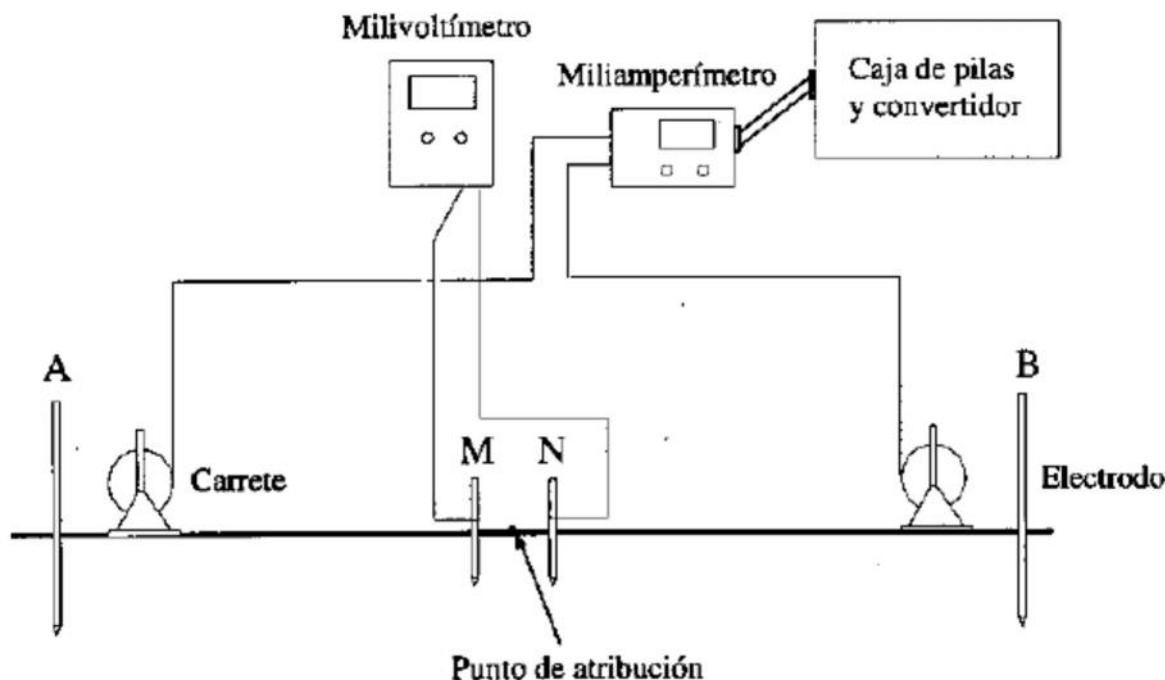


Figura 2. Esquema del tendido experimental de los sondeos eléctricos verticales utilizados.

Fuente: Elaboración propia adaptada de las referencias.

Esta técnica consiste en enviar una corriente directa al suelo a través de un par de electrodos de corriente, mientras que la caída de voltaje se registra a través de otro par de

electrodos de potencial, para muestrear la variación de anomalías de resistividad de las propiedades del subsuelo.

Después de adquirir los datos de resistividad aparente sobre los perfiles de interés, la variación en los valores de resistividad se analiza con ayuda del software de procesamiento Res2Dinv para obtener la tomografía de resistividad eléctrica (ERT). La tomografía de resistividad eléctrica es una técnica geofísica que ayuda a visualizar las variaciones de resistividad del subsuelo, que pueden ser indicativas de la presencia de contaminantes o estructuras geológicas. (Zhan 2019, Mainoo 2019)

Resultados y discusión

El municipio de Altamira presenta una gran cantidad de cuerpos de agua en la cercanía del sitio estudiado. La hidrografía está representada por lagunas marginales y arroyos intermitentes.

Los depósitos sedimentarios identificados en las cercanías del terreno de estudio y sus alrededores corresponden al periodo Cuaternario y forman parte de los sedimentos de la planicie costera del Golfo de México. Estos materiales fueron acumulados por agentes de erosión y transporte en la zona más oriental de la planicie costera, en los límites del litoral.

En el área de estudio se reconocen diversos tipos de sedimentos característicos de ambientes litorales. Dado que el análisis se realizó en un terreno relativamente pequeño, las unidades rocosas observadas en la superficie corresponden a depósitos litorales, que evidencian los efectos del intemperismo y la alteración mineral.

Los sondeos realizados para el análisis de mecánica de suelos confirman que el terreno está compuesto principalmente por sedimentos eólicos de granulometría fina a media, lo que ratifica su origen en un medio litoral. Durante el Cuaternario, la zona del terreno en estudio se encontraba entre lagunas marginales y dunas, con la línea de costa localizada en la misma área. Los sedimentos en esta región se caracterizan por contener materiales clásticos de tamaños que van desde grava hasta arena, mezclados con restos calcáreos de organismos, como conchas, y algunas variedades de rocas evaporíticas, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Rocas del tipo litoral en las cercanías del sitio estudiado. La mezcla de gravas y conchillas en la matriz arenosa incluye residuos calcáreos que presentan alteración de tamaño reducido y efectos de disolución por intemperismo.

Fuentes: autores.

La figura 4 muestra los resultados de la tomografía eléctrica realizada, en donde es posible identificar la ubicación del nivel freático, el cual varía entre los 7 y 10 metros de profundidad. Este nivel está asociado a un acuífero alojado en sedimentos de arena fina, lo cual se corroboró mediante los valores de resistividad obtenidos.

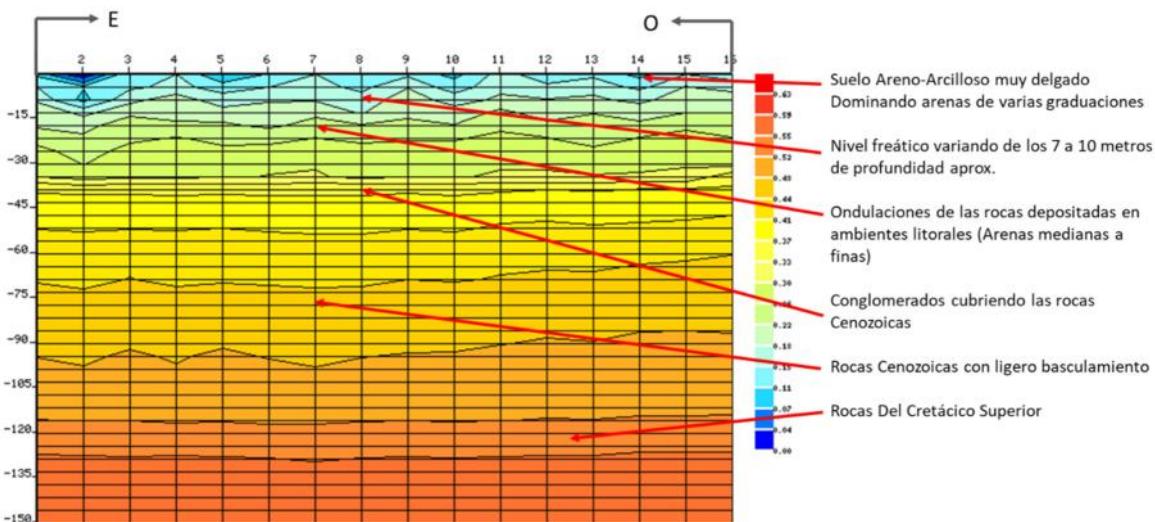


Figura 4. Sección geo-eléctrica por tomografía del área de estudio que muestra las características del subsuelo descrito en el terreno estudiado. Fuente: elaboración propia de los autores mediante software.

La tomografía de resistividad eléctrica efectuada en el sitio contaminado (Hasan et al 2021, Zhan. et al.2019). Permitió también inferir en las ondulaciones características de los sedimentos litorales, el basculamiento de las formaciones cenozoicas y la circulación del agua subterránea. A partir de estos resultados se propone el siguiente modelo de elevación del sitio que indica el flujo de aguas de escurrimiento predominante en el terreno estudiado en concordancia con la tomografía de resistividad, que se presentan en la Figura 5.

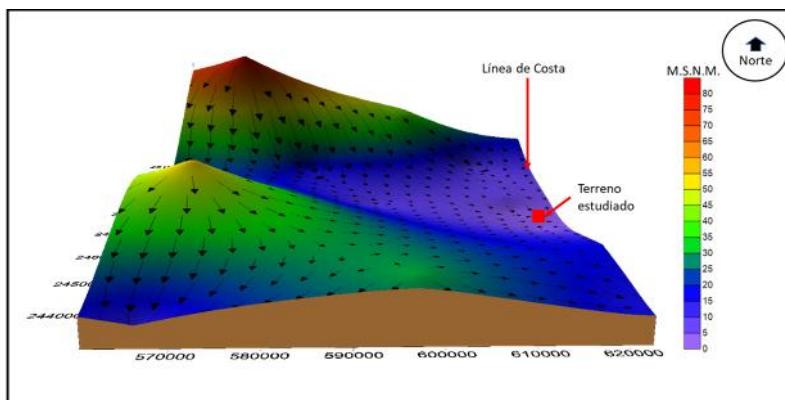


Figura 5. Modelo digital de elevación propuesto que muestra el flujo de aguas de escurrimiento dominante en el terreno estudiado. Fuente: Elaboración propia de los autores mediante software.

A partir de los estudios de mecánica de suelos realizados en el sitio, se propone y representa en la Figura 6, el perfil estratigráfico del sitio estudiado hasta una profundidad de 6 metros.

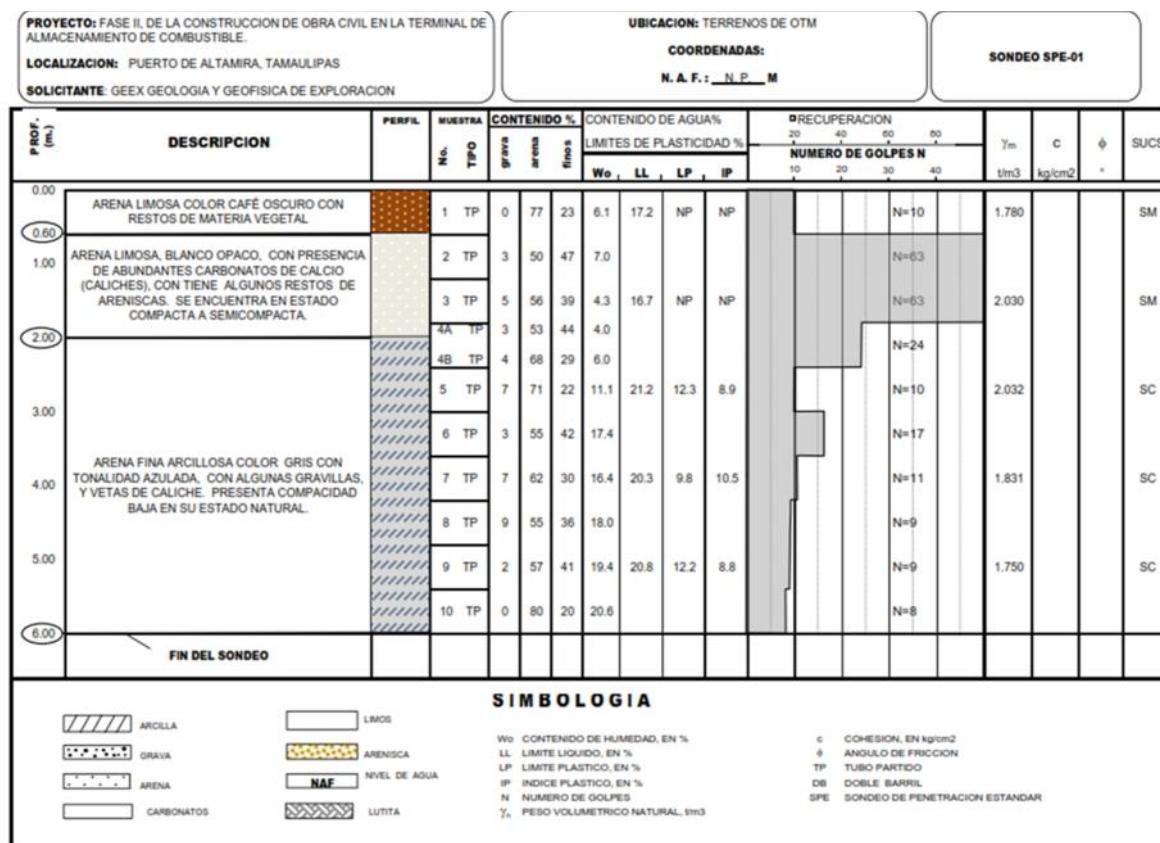


Figura 6. Perfil estratigráfico obtenido con el sondeo de la mecánica de suelos a 6 metros de profundidad. Fuente: Elaboración propia de los autores mediante software.

En el resultado de este sondeo no detectó la presencia del nivel freático dentro del rango explorado; sin embargo, se observó humedad en los sedimentos desde la superficie hasta el fondo del sondeo. Los valores de saturación de humedad aumentan con la profundidad, oscilando desde un 6.1 % en la parte superior y un valor promedio del 21 % en la parte inferior del sondeo.

Estos resultados sugieren la proximidad del nivel freático, que, de acuerdo con los datos obtenidos en la tomografía eléctrica, se ubica en algunos sectores del terreno a partir de los 7 metros de profundidad.

Adicionalmente, los sedimentos identificados corresponden a materiales arenosos y limosos, derivados de la descomposición de rocas calcáreas preexistentes. Estas rocas están compuestas principalmente por restos de organismos marinos, como conchas y caracoles, característicos del ambiente litoral de la región.

En la siguiente Figura 7 se muestra un modelo 3D de la estratigrafía descrita anteriormente donde se muestra la ubicación del acuífero, que de acuerdo con las características analizadas corresponden al de tipo confinado, existente en el subsuelo del sitio estudiado, siendo esto correlacionarle en las descripciones de la mecánica de suelos.

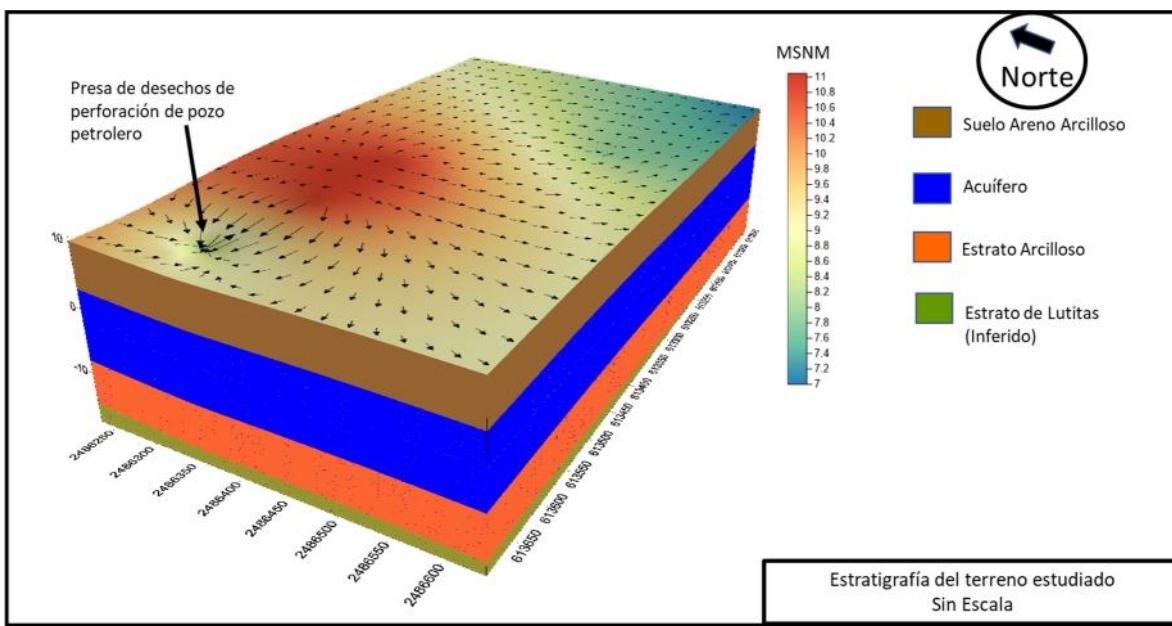


Figura 7. Estratigrafía propuesta del terreno estudiado. El acuífero se presenta a profundidades mayores desde los 7 a los 13 metros aproximadamente, siendo de tipo confinado en estratos arenos arcillosos. Fuente: Elaboración propia de los autores mediante software.

Con respecto a la permeabilidad del sitio estudiado y de acuerdo con las muestras obtenidas y analizadas en los sondeos, se registran los siguientes valores:

Tabla 1. Valores de permeabilidad obtenidos durante el muestreo. Fuente: Elaboración propia de los autores.

Estrato	Profundidad	Tipo de sedimento	Permeabilidad K
1	0 a 60 cm.	Arena con limos	10^{-3} cm/seg.
2	60 a 200 cm.	Arena con limos y carbonatados	10^{-4} cm/seg.
3	200 a 600 cm.	Arena con arcillas	10^{-5} cm/seg.

La Figura 8 muestra la distribución de la permeabilidad obtenidas en el suelo desde superficie hasta los 6 metros de profundidad. De acuerdo con estos valores se puede establecer que existe una buena infiltración de agua desde la superficie, debido al tipo de materiales que componen el suelo. (Silvia 2006)

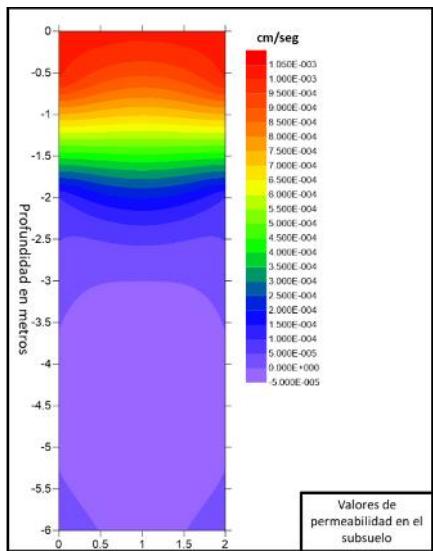


Figura 8. Distribución de la permeabilidad en suelo hasta 6 metros. Fuente: Elaboración propia de los autores mediante software.

En las muestras analizadas para determinar la permeabilidad del suelo, únicamente se detectaron niveles de humedad con valores que no superaron el 21 %, lo que confirma la ausencia de saturación total (100 %) de agua. Sin embargo, la estimación del nivel freático indica una proximidad considerable a las profundidades estudiadas.

Esto se corroboró mediante la observación a 24 horas después del sondeo, de un ascenso del nivel freático hasta los 2 metros de profundidad. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en la tomografía eléctrica, que sugieren la presencia del nivel freático cercano a la superficie, respaldado también por los valores de permeabilidad obtenidos.

En cuanto a la contaminación detectada en el sitio, los datos sugieren que esta es antigua y está confinada a un área específica, correspondiente a lo que se identifica como la presa de desechos. En la periferia del sitio no se detectó evidencia de contaminación, lo que indica que no hubo una migración lateral significativa del contaminante y, en caso de que tal migración hubiera ocurrido, es probable que estos se hayan volatilizado debido a la

buena permeabilidad del suelo, particularmente para compuestos ligeros y volátiles. Algunos contaminantes pudieron haberse infiltrado por lixiviación, migrando con el flujo subterráneo hasta desaparecer del área evaluada.

La Figura 9 muestra las resistividades medidas hasta una profundidad de 20 metros, las cuales se utilizaron para evaluar la posible contaminación del acuífero. Los valores obtenidos, que varían entre 0.008 mV y 0.016 mV a profundidades de entre 8 y 14 metros, no indican contaminación en el acuífero. Sin embargo, esta conclusión no pudo ser comprobada de manera directa, ya que el presente estudio no incluyó análisis químicos del agua subterránea para validar dicha interpretación. (Ojo 2022, Ugbor 2021, Okpoli 2013)

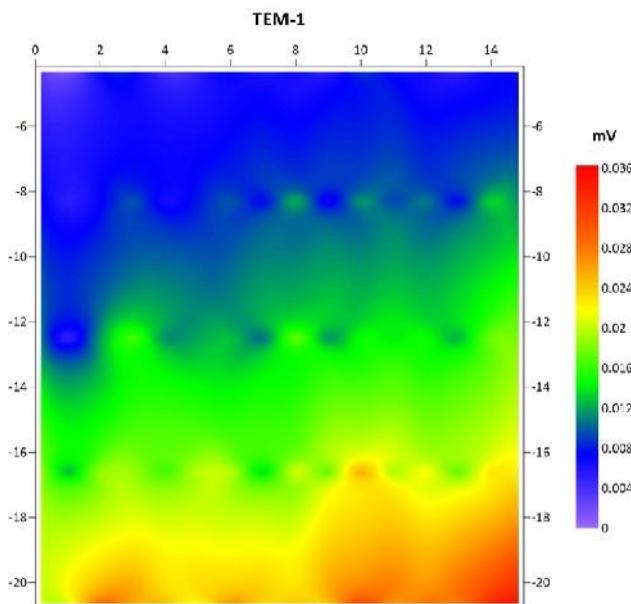


Figura 9. Resistividades del subsuelo registradas hasta 20 metros de profundidad. Fuente: Elaboración propia de los autores mediante software.

Aparentemente, en dónde se ubica el terreno estudiado anteriormente era un campo petrolero con actividades de perforación de pozos petroleros, de acuerdo con las actividades en las cercanías del terreno referido.

Es probable que los contaminantes de la actividad petrolera hayan tenido su destino final en las lagunas marginales que existían en la zona, antes de la construcción de la dársena del puerto industrial de Altamira. Algunas de esas lagunas desaparecieron hace

aproximadamente cuarenta años para convertirse en lo que es actualmente la dársena de ciaboga y muelles de atraque de embarcaciones de gran calado.

El punto con rastros de contaminación registrado en el sitio parece ser una presa de desechos abandonada de la actividad de perforación petrolera y en la cual se depositaban hidrocarburos que se obtenían de las pruebas de producción, así como los desechos de los fluidos de perforación, bentonita y recortes de la roca perforada. Dado que se encontró tubería que pudieron pertenecer a al pozo perforado y que actualmente debe estar taponado con antigüedades aproximadas de 50 años.

La presa de desechos de perforación es un foco contaminante puntual y por la cantidad de años que se estima existe, muchos de esos contaminantes ya desaparecieron sobre todo los volátiles, quedando solamente hidrocarburo intemperizado y algunos rastros de bentonita utilizada para formular el fluido de perforación.

Asimismo, muchos de esos contaminantes se lixiviaron y migraron hacia el Este donde se ubica la línea de costa. Dado que anteriormente existieron lagunas marginales, se sospecha que algunas de ellas actuaron como sitios de degradación de contaminantes. Con la construcción del puerto industrial esas lagunas desaparecieron y por consiguiente también el contaminante que ahí se encontraba. (Omolayo 2014)

Conclusiones

El suelo del sitio analizado presenta una buena permeabilidad, lo que ha facilitado la lixiviación de fracciones líquidas del contaminante y la volatilización de compuestos más ligeros, particularmente durante los periodos de estiaje. Este comportamiento explica la ausencia de concentraciones elevadas de gases en las gasometrías realizadas en los alrededores del foco de contaminación.

El nivel freático se localiza aproximadamente a 7 metros de profundidad. Los resultados obtenidos a través de la tomografía electromagnética sugieren que el acuífero subyacente no presenta evidencia de contaminación. Esto puede atribuirse a su condición de acuífero confinado, con una buena circulación de agua, lo que podría haber facilitado la

migración de posibles contaminantes hacia las antiguas lagunas marginales que han desaparecido.

Se recomienda realizar sondeos a mayor profundidad para determinar con precisión el nivel estático del acuífero y obtener muestras de agua subterránea que permitan verificar, de manera directa y concluyente, la ausencia de contaminación en el acuífero mediante análisis químicos detallados.

Asimismo, se propone la remediación del sitio mediante la sustitución del material arenoso contaminado con hidrocarburos intemperizados, utilizando material arenoso limpio disponible en los bancos de materiales cercanos al área de estudio. Los residuos de hidrocarburos extraídos deben ser trasladados y confinados en un sitio autorizado, cumpliendo con las normativas ambientales vigentes, para garantizar la rehabilitación efectiva del terreno.

Referencias bibliográficas

- Adriana Martínez-Prado, Elena Pérez-López, Joaquín Pinto-Espinoza, Blanca amelia. Gurrola – Narvaez , Ana Lilia Osorio- Rodriguez (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. recuperado el 11 de diciembre de 2024, de rev. int. contam. ambie. <http://file:///d:/doc%20articulos%202022/bibliografia/biorremediacion%203.pdf>
- Abiriga, Daniel.; Vestgarden, Live S.; Klempe, Harald. (2020) Groundwater contamination from a municipal landfill: Effect of age, landfill closure, and season on groundwater chemistry. *Science of the Total Environment* 737, 140307.
- Busquets, E., & Casas, A. (1995). Caracterización de vertederos y detección de penachos contaminantes mediante la utilización de métodos geofísicos. *Física de la tierra*, 7.
- Servicio Geológico Mexicano, Carta Geológica Minera Tampico F14-3-6 del 2004.
- Hasan, M. Shang, Y., Meng, H. et al. (2021) Application of electrical resistivity tomography (ERT) for rock mass quality evaluation. *Sci Rep* 11, 23683. DOI: 10.1038/s41598-021-03217-8.

Ricardo José Padilla y Sánchez, Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana Tomo LIX, Núm. 1, 2007, P. 19-42.

Oscar Izaguirre Ávila. (2013) Marco Geológico Regional De La Cuenca Baja Y Desembocadura Del Rio Panuco En El Municipio De Ciudad Madero, Tamps. Las Características De Sus Depósitos Sedimentarios En La Llanura De Inundación.

Silvia Angelone, María Teresa Garibay, Marina Cauhapé Casaux. Permeabilidad de suelos. Universidad Nacional Del Rosario. 2006

Loke, M. H. & Barker, R. D. (1996) Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophys. Prospect.* 44(3), 499–523.

Mainoo, Patrick A.; Manu, E., Yidana, Sandow M.; Agyekuma, William A.; Stigterd, Tibor.; Duaha, Anthony A.; Prekoc, Kwasi. (2019) Application of 2D-Electrical resistivity tomography in RIISDS año 8 n o 116 delineating groundwater potential zones: Case study from the voltaian super delineating groundwater potential zones: Case study from the voltaian super group of Ghana. *Journal of African Earth Sciences* 160, 103618.

Omolayo, Dare.; Tope, Fatoba Julius. (2014) 2D electrical imaging surveys for leachate plume migration at an old dump site in Ibadan south western Nigeria: A case study. *International Journal of Geophysics* Article ID 879530, 6 pp. DOI: 10.1155/2014/879530.

Ojo Akintayo O.; Olurin, Oluwaseun T.; Ganiyu, Saheed A.; Badmus, Biodun S.; Idowu, Olufemi A. (2022) Electrical Imaging Characterization of a Dumpsite on an Abandoned Quarry Site in Abeokuta, South West, Nigeria. *Scientific African* 17, e01330.

Okpoli, Cyril Chibueze. (2013) Application of 2D electrical resistivity tomography in landfill site: A case study of Iku, Ikare Akoko, southwestern Nigeria, *Journal of Geological Research*, Article ID 895160, 8 pp, DOI: 10.1155/2013/895160.

Ugbor, C.C. Ikwuagwu, I.E.; Ogboke, O.J. (2021) 2D inversion of electrical resistivity investigation of contaminant plume around a dumpsite near Onitsha expressway in southeastern Nigeria. *Sci Rep* 11, 11854, DOI: 10.1038/s41598-021-91019-3.

Zhan, Lt., Xu, H., Jiang, Xm. et al. (2019) Use of electrical resistivity tomography for detecting the distribution of leachate and gas in a large-scale MSW landfill cell. *Environ Sci Pollut Res* 26, 20325– 20343. DOI: 10.1007/s11356-019-05308-6.