

# Caracterización de emplazamientos contaminados por hidrocarburos mediante la aplicación de técnicas geofísicas

Los trabajos de investigación han estado enfocados al estudio de la viabilidad del empleo de dos técnicas geofísicas, tomografía eléctrica y georradar, en la detección de LNAPLs en el subsuelo. Los trabajos se realizaron en un escenario piloto, un cubeto de dimensiones 4 m x 2 m x 1,05 m, y en escenario real, la refinería de Repsol YPF, en Puertollano (Ciudad Real). Los resultados de las investigaciones realizados con tomografía fueron muy satisfactorios. No así con georradar, donde se obtuvieron resultados óptimos en escenario piloto pero no siempre en escenario real.

En el año 2009 se publicó la aprobación del Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015 en el que se contempla a los suelos contaminados, el Plan Nacional de Suelos Contaminados, que tiene entre sus objetivos, la elaboración del Inventario Nacional de Suelos contaminados y la confección del Mapa Nacional de Suelos Contaminados antes del año 2016.

La elaboración del Inventario Nacional de Suelos Contaminados tiene entre sus objetivos proceder a la descontaminación y recuperación del suelo. Como los recursos a emplear son forzosamente limitados puede no ser viable descontaminar todas las zonas, siendo lo más lógico el establecimiento de una política centralizada que planifique, tras estudios detallados, las regiones preferentes, con mayor prioridad por presentar más altos riesgos, tanto para realizar investigaciones evaluadoras como para planificar su descontaminación y regeneración.

El empleo de técnicas geofísicas en el reconocimiento del subsuelo, previo a cualquier actuación en el mismo, es una práctica cada vez más habitual, tanto por la información que proporcionan como por el ahorro económico que suponen, ya que posibilitan una planificación más concreta y precisa de los trabajos posteriores.

La investigación sobre la viabilidad del empleo de técnicas geofísicas (tomografía eléctrica y radar del subsuelo) en la evaluación del grado de contaminación de un suelo afectado por el vertido de hidrocarburos ligeros y pesados (fluidos orgánicos inmiscibles en agua y de menor densidad que ella - LNAPLs), simulando la contaminación en un escenario piloto y ampliando las investigaciones en subsuelo industrial, en particular, en diferentes emplazamientos de la refinería de Repsol YPF en Puertollano, Ciudad Real, ha sido la base para el desarrollo de la Tesis Doctoral: *Caracterización de Emplazamientos Contaminados mediante la Aplicación de Técnicas Geofísicas*.

## Técnicas geofísicas empleadas

Cuando comenzaron los trabajos desarrollados en la Tesis Doctoral, las investigaciones en este campo, tanto a nivel nacional como internacional, no eran muy numerosas. Sin embargo, en estos últimos años han aumentado considerablemente tanto los trabajos de investigación como las publicaciones realizadas por la comunidad nacional e internacional.

Únicamente algunos métodos eléctricos y electromagnéticos son capaces de detectar contaminación por algunos hidrocarburos y contaminantes orgánicos. Los niveles de contaminación que son capaces de determinar dependen de la interacción que se presenta entre el contaminante químico y los materiales de la matriz. Los más fáciles de detectar son aquellos que son insolubles en agua o los que reaccionan químicamente con los minerales de la arcilla. Los mejores ejemplos son el tetracloroetano (disolvente utilizado en limpieza en seco) y perclorotileno y el tolueno, (solvente industrial muy común y principal componente de la gasolina).

Ambos son poco solubles en agua, tienen alta resistividad eléctrica y baja permitividad dieléctrica. Sin embargo, los compuestos orgánicos solubles en agua, como los alcoholes, no pueden ser detectados. Todos los contaminantes orgánicos no son detectados por métodos geofísicos no invasivos cuando se encuentran en las concentraciones que exige la legislación (ppm o ppb). A tales niveles la presencia de contaminantes solo puede ser inferida por cartografía geofísica de estructuras geológicas y de los caminos de migración de los contaminantes o a través de cambios en heterogeneidades hidrogeológicas.

En los últimos quince años, ha ido aumentando la aplicación de determinadas técnicas geofísicas, superficiales y subterráneas, de carácter no invasivo o poco invasivo que son aplicables a la caracterización de acuíferos y suelos contaminados por NAPLs, aunque ge-

**Palabras clave:** GEOFÍSICA, GEORRADAR, LNAPLs, RADAR DEL SUBSUELO, SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS, TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.

 **M<sup>a</sup> del Pilar MARTÍNEZ DE LA CALLE,**  
Ing. de Minas  
**José M. GALERA FERNÁNDEZ,**  
Dr. Ing. de Minas

neralmente estás técnicas lo que hacen es indicar las zonas preferentes de migración del contaminante mediante los contrastes (acústicos, electromagnéticos, gamma o de neutrones) que miden, siendo, por tanto, una medición indirecta de la contaminación. Únicamente se obtienen evidencias directas en casos en los que las condiciones sean ideales (volumen significativo de contaminante y suficientes contrastes entre el nivel de fondo y el foco). (García García, Á. y Martínez Navarrete, C. 2005.).

Las principales desventajas que presentan es la posibilidad de que las singularidades localizadas no sean indicativas de contrastes entre las anomalías, la insuficiente resolución para volúmenes pequeños, la posibilidad de influencia de actividades antrópicas y la posible interferencia en los resultados debida a la porosidad y el contenido de humedad.

Daniels et al. (1995) realizaron estudios con georradar en tanques modelo afectados por derrames de hidrocarburos y, obtuvieron que en algunas localizaciones era posible detectar contaminantes orgánicos no acuosos utilizando GPR. Los avances posteriores en los softwares de visualización de datos y la utilización de las tres dimensiones han permitido tomar una mayor conciencia del comportamiento de los contaminantes en la zona no saturada.

En referencia a la conductividad de un suelo contaminado por LNAPLs, diferentes investigaciones han demostrado que con el paso del tiempo se producen incrementos en el valor de éste parámetro, variaciones que pueden ser detectadas mediante tomografía

En estos trabajos, se ha confirmado esta hipótesis mediante la simulación de una capa freática contaminada en un escenario piloto.

Por las características operativas que presentan las técnicas de tomografía y georradar, se consideró un buen campo de investigación el estudio de aplicación de las mismas en suelos contaminados.

Los trabajos de georradar se realizaron con el equipo *SIR System 3000* y antenas de frecuencia 900, 400 y 200 MHz, utilizando como software de interpretación de datos *FGWIN-RAD6-MAIN*. Los trabajos de tomografía se llevaron a cabo con el equipo *SYSCAL JUNIOR Switch 72* y con el software de interpretación de datos, *Res2dinv*.

## Investigaciones en escenario piloto. Simulación de contaminación de suelos y acuíferos próximos a la superficie por hidrocarburos ligeros y pesados

En el escenario piloto se investigó la viabilidad del empleo del georradar en la detección de manchas de contaminación en el subsuelo. Para ello, se construyó en el Centro Tecnológico de *AITEMIN* en Toledo, un estanque impermeable en el cual se reprodujeron las condiciones de contaminación por hidrocarburos de un suelo areno-arcilloso y de un acuífero detrítico libre (**Fig. 1**).

La selección de este tipo de suelos así como la simulación de un acuífero detrítico libre, fue debido a que representa a tipos de suelos y estados (acuífero detrítico libre), muy habituales en la naturaleza, son materiales muy permeables y transmisivos y muy conductivos lo que favorece la penetración de las ondas electromagnéticas.

El estanque consta de dos compartimentos impermeabilizados con pintura plástica de 4,00 m de longitud, 2,00 m de anchura y una profundidad media de 1,05 m. El relleno que simula el suelo está constituido por una capa inferior de 20 cm de espesor de grava calibrada de 16-20 mm de diámetro para facilitar el vaciado de agua por el drenaje de fondo y una capa superior de 80 cm de espesor, de zahorra sin lavar compuesta por gravas, arenas, limos y arcillas con algunos cantos de cuarcitas.

Las antenas empleadas en la investigación fueron de frecuencia 200 MHz y 900 MHz.



■ [Figura 1] .- Vista del estanque piloto.

Primeramente se analizaron las reflexiones producidas en la onda electromagnética en ese medio. A continuación se realizaron los mismos estudios cuando en el medio había presencia de un nivel freático posicionado en las gravas situadas en la parte inferior del tanque. Finalmente se procedió al vertido en el medio de gasolina, en primer lugar, y después de gasoil, para estudiar el comportamiento de la onda electromagnética en la zona vadosa y el nivel freático.

Los resultados obtenidos fueron muy positivos, demostrando que el georradar puede resultar un método geofísico muy efectivo en la detección y seguimiento de la evolución espacial y temporal de las zonas de suelos y acuíferos afectadas por la contaminación producida por hidrocarburos.

La **Fig. 3** muestra los radargramas obtenidos cuando se inyectaron 13 litros de gasóleo. El segundo de ellos se obtuvo pasadas 24 ho-

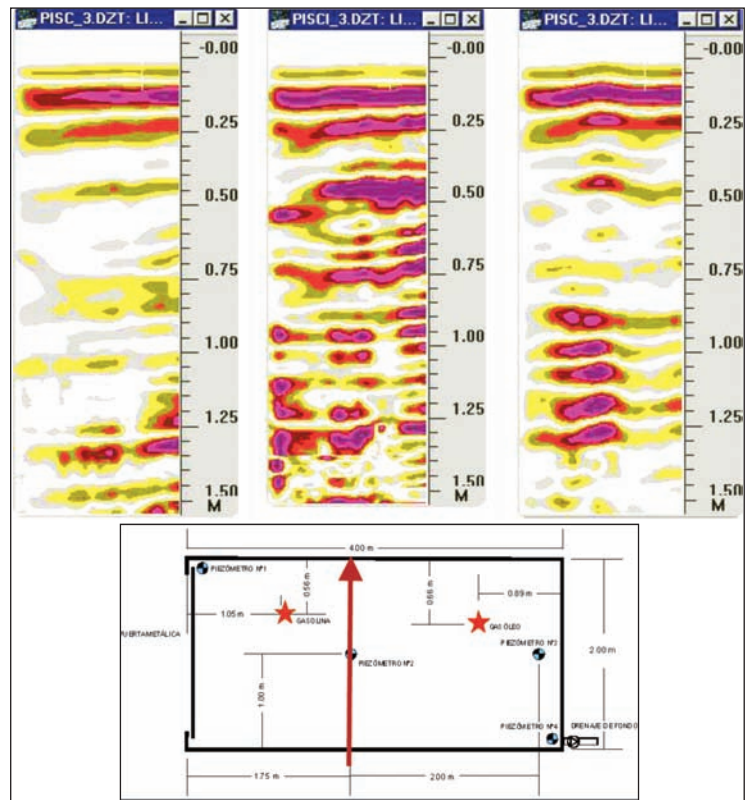


■ [Figura 2] .- Relleno del estanque piloto.

ras que se inyectaron 37 l más y el último, pasadas 48 horas desde la última inyección.

## Escenario real. Detección y caracterización de manchas de contaminación por hidrocarburos en subsuelo industrial (Refinería de Repsol YPF Puertollano (Ciudad Real))

Las fugas industriales de hidrocarburos suponen un problema importante de contaminación de suelos. El problema de las fugas, se extiende, en medida no despreciable, a depósitos auxiliares y establecimientos de distribu-



■ [Fig. 3].- Perfil 3. Gasóleo. Antena de 200 MHz. Longitud perfil; 135 cm.

ción de hidrocarburos. Estas fugas pueden producirse durante la producción, manipulación, almacenamiento y transporte.

Siempre las fugas más peligrosas son las que permanecen ocultas y que no son descubiertas hasta que se produce la contaminación de un pozo, río, etc. La detección previa de estas fugas es difícil y costosa. Los análisis retrospectivos que se realizan cuando se ha producido una fuga señalan que las fugas de hidrocarburos a largo plazo y ocasionales, que se producen en los lugares de envase o bombeo de las cisternas o tanques, son el principal foco de contaminación del suelo por hidrocarburos.

Lo normal en las instalaciones industriales es que el suelo que sufre la contaminación esté ya parcial o totalmente antropizado, aunque esto no signifique que esté ya contaminado. Estas instalaciones suelen tener adecuadas sus soleras, al menos desde el punto de vista constructivo, lo que hace que raramente se encuentre un suelo natural dentro de una instalación industrial.

Por ello se consideró oportuno tomar a la industria del sector refino como escenario real para investigar a escala real la viabilidad de la técnica geofísica de georradar y tomografía eléctrica en la detección y delimitación de manchas de contaminación en el subsuelo.

Se realizaron investigaciones en tres localizaciones diferentes: *Exploraciones con georradar en un subsuelo afectado por una fuga puntual localizada en una tubería de un tan-*

que. Exploraciones utilizando tomografía y georradar en subsuelo donde podría haber presencia de hidrocarburos por actividades realizadas en el pasado; y, finalmente, exploraciones con estas mismas técnicas en el subsuelo próximo a un tanque de crudo.

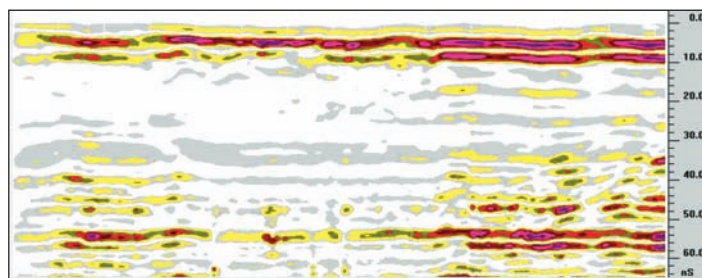
En el primer caso, la fuga se había producido en una tubería procedente de un tanque, afectando únicamente a una pequeña zona de terreno del cubeto en las proximidades del tanque de combustible. El método operativo consistió en establecer un mallado de perfiles transversales y longitudinales en la superficie del área posiblemente afectada por la fuga; siguiendo estos perfiles se realizaron exploraciones con la antena de 200 MHz, calibrada para una profundidad de reconocimiento de 1,6 m.

El radargrama tipo que se obtuvo es el mostrado en la **Fig. 4**, identificando las zonas del mismo comprendidos entre los 0 y 30 cm de profundidad, como manchas de crudo (comprobado posteriormente con catas de reconocimiento). Las reflexiones registradas a partir de los 40-50 cm de profundidad, se interpretaron como repeticiones de las reflexiones producidas en los primeros centímetros.

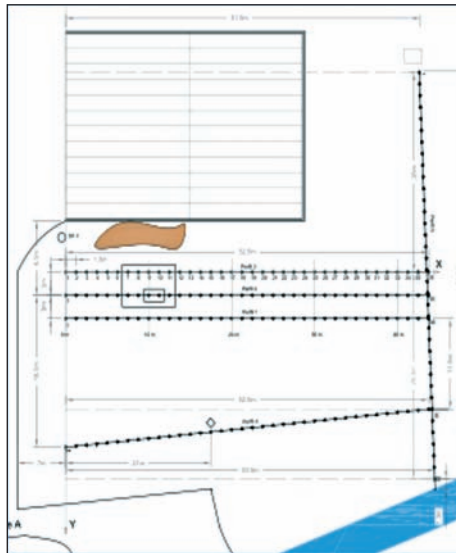
La campaña de exploración permitió realizar una cartografía en el que se señalaban las diferentes profundidades que había ido alcanzado el crudo que, como ya se ha indicado, en ningún punto superó los 30 cm, lo que facilitó la retirada posterior de la capa afectada por el derrame, optimizando los medios.

En las investigaciones del subsuelo en que *podría haber hidrocarburos debido a actividades realizadas en el pasado*, se realizó tomografía y georradar estableciendo la profundidad máxima de exploración en función de la profundidad del nivel freático (a unos 7 metros) por las dificultades que presenta el georradar para trabajar bajo este nivel. Los resultados que se obtuvieron en las campañas no fueron determinantes sobre la viabilidad de la aplicación de estas técnicas.

Se establecieron 5 perfiles de exploración (señalados en la **Fig. 5**). En tomografía se utilizó el dispositivo dipolo-dipolo. Aunque se identificaron segmentos del subsuelo en el primer metro y medio de profundidad con valores de resistividad más elevados (superiores a 100  $\Omega$ .m), que podrían ser debidos a la pre-



■ [Figura 4] .- Radargrama tipo obtenido en todos los perfiles.



■ [Figura 5].- Perfiles de exploración.

sencia de hidrocarburos, esos valores de resistividad también se corresponden con los que presentan los sedimentos con un mayor contenido en partículas de tamaño grueso, por ello, y como no se realizaron catas posteriormente no se pudo asegurar que esos valores de resistividad correspondieran a la presencia de hidrocarburos. Las exploraciones realizadas con georradar no mostraron ninguna anomalía que pudiera ser debida a la presencia de hidrocarburos.

Por último, en los estudios realizados en el cubeto de emplazamiento de un tanque (**Fig. 6**), se seleccionaron dos áreas en las proximidades del tanque, *Zona 1* y *Zona 2*. En tomografía se utilizaron dos configuraciones, dipolo-dipolo y *Wenner-Schulemberger* (**Figs 7 y 8**).

En el emplazamiento *Zona 1*, se alcanzó una profundidad de exploración de 10 metros, utilizando para ello 36 electrodos (504 cuadrípolos), estableciendo una separación entre electrodos de 1,5 m, para conseguir mayor definición en profundidad. El producto entre el número de electrodos utilizados y la separación entre los mismos, proporciona la longitud del perfil de reconocimiento en superficie.

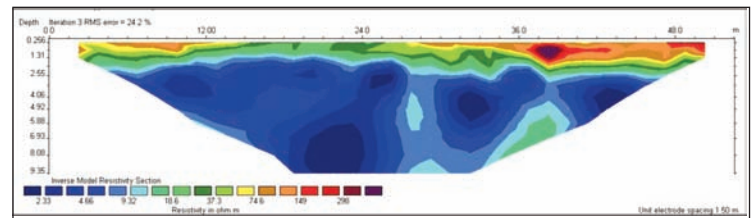


■ [Figura 6].- Tanque y cubeto.

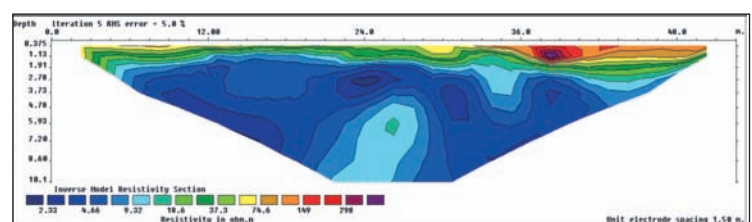
Los modelos que se obtuvieron con las dos configuraciones fueron muy similares, sin embargo, el error al obtener el modelo fue mucho menor utilizando la configuración *Wenner-Schlumberger*.

En los dos modelos se distinguió perfectamente la base del cubeto, constituida por arcillas, de baja resistividad y una franja superficial, hasta los dos metros de profundidad con valores de resistividad muy diferentes (intervalo 18  $\Omega$ .m – 300  $\Omega$ .m). Estas zonas superficiales, en las que los valores de resistividad son más elevados pueden correlacionarse con la presencia de hidrocarburos en las mismas.

En el emplazamiento *Zona 2* se alcanzaron los 13,6 metros de profundidad. Se utilizaron 70 electrodos con una separación de 1 metro, para lograr aún mayor definición que en el emplazamiento *Zona 1*. Los resultados obtenidos en estos emplazamientos en las diferentes campañas de tomografía si permitieron identi-



■ [Figura 7] .- Perfil Tipo. Configuración Dipolo-dipolo.



■ [Figura 7] .- Perfil Tipo. Configuración Wenner-Schlumberger.

car las franjas contaminadas por hidrocarburos como se observa en los perfiles, resultando una técnica adecuada para la delimitación de LNAPLs en el subsuelo, al menos hasta la profundidad reseñada en los trabajos de campo.

Sin embargo, los trabajos realizados con georradar no dieron resultados positivos. Los materiales que se encontraban en el primer metro de profundidad (tamaños gruesos, cantos, etc), dificultaron la interpretación de resultados.

## Resultados y Conclusiones

Los trabajos se han enfocado a la detección por métodos geofísicos de LNAPLs en el subsuelo.

La movilidad de estos compuestos es proporcional a su densidad. En general, estos compuestos son muy poco solubles en agua y tienen menos posibilidades de disolverse en la zona no saturada del subsuelo y pasar a la saturada, por tanto, su migración suele detenerse en la zona suprayacente al nivel freático. Solamente en las investigaciones realizadas en el escenario piloto los LNAPLs alcanzaron el nivel freático.

Las investigaciones realizadas en escenario piloto con georradar fueron muy positivas distinguiendo perfectamente los horizontes del subsuelo cuando se había producido la contaminación por gasolina y gasoil. En uno de los escenarios reales considerados en la refinería de Repsol YPF de Puertollano, en la que se había producido una fuga muy reciente, también se obtuvieron resultados positivos, contrastados posteriormente con la realización de catas de reconocimiento. Sin embargo, en el resto de los escenarios los resultados con georradar no fueron concluyentes.

En el resto de escenarios pueden considerarse muy positivos los resultados obtenidos con tomografía eléctrica, aunque en uno de los escenarios no fue posible correlacionar las resistividades obtenidas con la presencia de hidrocarburos por falta de catas de reconocimiento posteriores. En cualquier caso no se tenía constancia de derrames en el pasado.

Por último, en los trabajos realizados en el cubeto de un tanque de crudo, en los perfiles obtenidos con tomografía eléctrica se observan claramente dos franjas con valores diferentes de resistividad, la franja inferior, que correspondería al material arcilloso compactado (valores muy bajos de resistividad), que corresponde al material de la base del cubeto y la franja superior, con valores más elevados de resistividad (menor conductividad), que indicaría la presencia de otro material/sustancia en el subsuelo, que podría corresponder a hidrocarburos. La presencia de hidrocarburos provoca unos valores elevados de resistividad si las fugas son recientes y no ha dado tiempo a que se inicien los procesos de biodegradación. A medida que se desarrollan tales procesos, los valores de resistividad van disminuyendo.

## Agradecimientos

Manifiesto mi agradecimiento a *Aitemin*, por permitir utilizar las investigaciones acometidas en los proyectos de investigación realizados en el marco de actuación del *Convenio de Centros Tecnológicos de la Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha* entre los años 2003 y 2007 y a *Repsol YPF*, en cuyas instalaciones de la refinería en Puertollano, Ciudad Real, se realizaron las investigaciones a escala real.

## Referencias

- ÁLVAREZ-CAMPANA GALLO, J. MANUEL. Diputación Provincial de A Coruña. **Contaminación del suelo debida a procesos industriales**. Curso sobre contaminación de suelos y aguas subterráneas. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 24 al 28 de septiembre de 2001.
- ARACIL, E., MARURI U., VALLES, J., MARTÍNEZ P. Y PORRES J.A. **Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica**. *Ingeopres*, 2003 DIC (122).
- ATEKWANA ELIOT A., ATEKWANA E., LEGALL F., ROWE R., WERKEMA JR D. **Total Dissolved Solids in Groundwater and its Relationship to Electrical Conductivity of Sediments Contaminated with Hydrocarbon**. *Journal of Applied Geophysics* 56 (2004), 281–294.
- ATEKWANA E., SAUCK W., ABDEL AA GAMAL ZIDON, AND WERKEMA JR. D. **Geophysical Investigation of Vadose Zone Conductivity Anomalies at a Hydrocarbon Contaminated Site: Implications for the Assessment of Intrinsic Bioremediation**. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, September 2002, Vol 7, Issue 3, p. 102-111.
- ATEKWANA E.A., BAILEY, J.M., GRONCKI, J.D., SAUCK, W.A., WERKEMA JR, D.D. **Geophysical Investigations of a Landfill and its Associated Plume**. *Proceeding of the Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 1999.
- ATEKWANA E.A., SAUCK, W.A., WERKEMA JR, D.D. **Characterization of a Complex Refinery Groundwater Contamination Plume Using Multiple Geoelectric Methods**. *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 1998.
- BERMEJO CARBONELL, J.L.; SAUCK, W. Y ATEKWANA E. **Aplicaciones Geofísicas en el descubrimiento de plumas de contaminación en acuíferos superficiales**. [www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/geofisicas.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/geofisicas.pdf).
- BIDLEMAN, T. F.; A. A. CASTLEBERRY; W. T. FOREMAN; M. T. ZARANSK & D. W. WALL. 1990. **Petroleum Hydrocarbons in the Surface Water of Two Studies in the Southeastern United States**. *Est. Coast Shelf Science*. 30:91-109.
- BURRIDGE, R. (1976). **Some Mathematical Topics in Seismology**. Universidad de Nueva York, EUA.
- CASSIDY D., WERKEMA, JR D., SAUCK W., ATEKWANA E., ROSSBACH S. AND DURIS J. **The effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements**. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, March 2001, Vol. 6, Issue 1, pp. 47-52.
- DURIS J. W., ROSSBACH S., ATEKWANA E.A., WERKEMA JR. D. **Microbial Community Structure in a Shallow Hydrocarbon-Contaminated Aquifer Associated with High Electrical Conductivity**, *Joint Assembly of AGU, EUG, Nice France, Spring Meeting 2003*.
- GARCÍA GARCÍA, Á. Y MARTÍNEZ NAVARRETE, C. 2005. **Análisis de metodologías para la caracterización y remediación de acuíferos contaminados por líquidos en fase no acuosa (LNAPLs)**. *Boletín Geológico y Minero*, 116 (1): 65-78. ISSN: 0366-0176.
- GRANDA SANZ, A. **Contaminación Industrial y Urbana. Jornadas Nacionales de Geofísica Aplicada a Hidrogeología**. Granada 1999.

- MACKAY M., D.; P. V. ROBERTS & J. A. CHERRY. 1985. **Transport of Organic Contaminants in Groundwater**. *Environmental Science & Technology*. 19(5): 384-392.
- MADRID M., CATALDI A. **Caracterización de fosas petroleras y sitios contaminados por crudos a través de métodos geofísicos y sensores geoquímicos in situ**. *TRX Consulting – Caracas, Venezuela. XI Congreso Venezolano de Geofísica*. Noviembre 2002.
- MARTÍNEZ DE LA CALLE, M.P, TIRADO ALONSO, A., OBIS SANCHEZ, J. **Aplicaciones de la técnica geofísica de georradar**. *XI Congreso Internacional de la Industria, Minería y Metalurgia, Zaragoza. Área V. Construcción e Ingeniería Civil*. Junio de 2002.
- SAUCK, W., ATEKWANA, A., WERKEMA, D., CASSIDY, D. **Anomalous Conductivity in Hydrocarbon Spill Zones - New Extensions to the WMU Model**. *European Geophysical Society XXVI General Assembly, Nice, France, 25-30 March 2001*.
- SHERROD L., WERKEMA D., SAUCK W., ATEKWANA E., ROSSBACH S., AND ATEKWANA E. **Column experiments and anomalous conductivity in hydrocarbon-impacted sands**. *Eighth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil, 2003*.
- UBIAS, A. (1971), **Introducción a la sismología y estructura interna de la Tierra**. *Taller del I.G. y C., Madrid, España*.
- VEGA DE LA, M., OSELLA, A., LASCANO, E. (2003). **Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil**. *Journal of Applied Geophysics* 54. 97-109.

YONG, R. N.; A. M. O. MOHAMED & B. P. WARKENTIN. 1992. **Principles of Contaminant Transport in Soils**. Elsevier Science Publishers. Netherlands.

- WERKEMA, D.D., ATEKWANA, E.A., ATEKWANA, E., DURIS, J., ROSSBACH, S., ALLEN, J., SMART, L., SAUCK, W.A., **Laboratory and field results linking high conductivities to the microbial degradation of petroleum hydrocarbons**. *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems 2004, Colorado Springs, CO., In press*.
- WERKEMA JR, D., DURIS, J W., ROSSBACH, S., ATEKWANA, E., SAUCK, W., AND CASSIDY, D P. **In Situ Apparent Resistivity Measurements and Microbial Population Distribution at a Hydrocarbon Contaminated Site: Implications for Assessing Natural Attenuation**. *Geophysics*, 2004. *In press*.
- WERKEMA JR. D., ATEKWANA E., ENDRES A., AND SAUCK W., **Geoelectrical Stratigraphy and Analysis of a Hydrocarbon Impacted Aquifer**, *Joint Assembly of AGU, EUG, Nice France, Spring Meeting 2003*.
- WERKEMA JR. D., ATEKWANA E., ENDRES A., SAUCK W. **Temporal and Spatial Variability Of High Resolution In Situ Vertical Apparent Resistivity Measurements At A LNAPL Impacted Site**. *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 2002, 13ESCA.
- WERKEMA JR., Ph.D. **Geoelectrical Response of an Aged LNAPL Plume: Implications For Monitoring Natural Attenuation**. *Dissertation, Western Michigan University Waldo Library, 2002*.
- WERKEMA JR. D., ASUMADU J., ATEKWANA E., AND SAUCK W., **A Generic Automated/Semi-Automated Digital Multi-Electrode Instrument for Field Resistivity Measurements**. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Dec 2000, vol. 49, No. 6, p.1249.
- MI., GAMAL ZIDON ABDEL AAL, WERKEMA, JR. D., SAUCK W., ATEKWANA E., **Geophysical Investigation of Vadose Zone Conductivity Anomalies at a Former Refinery Site, Kalamazoo** *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, 2001, VZC-4.