

# *Caracterización de vertederos y detección de penachos contaminantes mediante la utilización de métodos geofísicos*

E. BUSQUETS y A. CASAS

Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica  
Universidad de Barcelona

## **RESUMEN**

La proliferación de vertederos clandestinos o mal acondicionados, constituye un importante problema ambiental debido al considerable riesgo que representan como posible foco de contaminación de los suelos y las aguas subterráneas, principalmente. El desconocimiento del tipo de residuos contenidos en un vertedero y su distribución espacial, hace difícil evaluar el grado de peligrosidad que individualmente representan y por tanto determinar las prioridades de actuación en su reconocimiento y las correspondientes estrategias posteriores de saneamiento. El estudio de reconocimiento puede verse condicionado si se utilizan métodos directos, como sondeos o catas, ya que muchas veces estos trabajos pueden por sí mismos ayudar a acelerar los procesos contaminantes. Por tanto, la utilización de técnicas no destructivas como son por ejemplo los diferentes métodos de prospección geofísica, pueden considerarse muy recomendables en la fase inicial de estudio de cualquier vertedero.

Los objetivos de este trabajo han sido determinar la utilidad de la prospección geofísica para localizar y caracterizar vertederos y detectar la existencia de penachos contaminantes tanto en la zona saturada como en la no saturada. Las ventajas de utilización de estos métodos son que actúan de forma rápida y no destructiva, son más económicos que los métodos directos y proporcionan una visión global de la zona de estudio.

A partir del análisis de los resultados obtenidos por los diferentes métodos geofísicos aplicados sobre distintos vertederos, se ha estudiado el nivel de efectividad de cada uno de ellos. En general, puede establecerse que los perfiles de georadar y los sondeos eléctricos verticales han dado buenos resultados para determinar los límites laterales y la profundidad del vertedero, mientras que la existencia de penachos contaminantes queda mejor definida utilizando el calicaje electromagnético. Por otra parte, la prospección magnética es muy eficaz en la detección de la presencia de objetos metálicos férricos como son bidones, tuberías, etc.

El estudio muestra, además, como puede obtenerse una información más precisa del área investigada mediante la utilización combinada de distintos métodos.

**Palabras clave:** Vertedero, penacho contaminante, prospección geofísica, impacto medio ambiente.

## ABSTRACT

The existence of numerous irregular or illegal landfills is an important cause for groundwater and soil pollution. The lack of knowledge of the nature and distribution of the residues makes it difficult to evaluate the environmental risk they pose, and the establishment of sound cleaning strategies. It also affects the choice of direct methods which in many cases can result in the acceleration of the polluting processes when inappropriately chosen.

The aim of this work is to determine useful of the geophysical methods for the location and characterization such landfills, and the detection of pollution contaminated plumes both in saturated and the unsaturated zones. The advantage of using geophysical methods is their non-destructive nature, economy, and speed. They also provide a better overall view of the studied area.

The geophysical characterization of a landfill must determine its geometry, type and distribution of residues, and presence and extension of any polluting plume. Since in all these methods there is an interpretation subject to indeterminations, a geological, hydrogeological, historical and antropic study of the area must be conducted prior to interpretation of the geophysical data.

Nearly all the available geophysical methods can be used in environmental studies. We have used ground probing radar, electromagnetic profiling prospection, vertical electric soundings, and magnetic exploration. The choice depends on the physical property studied and their field use. Electric and electromagnetic prospectons measure underground resistivity variations related to structure and composition while magnetic exploration measures magnetic anomalies of the Earth's field produced by magnetic polarized bodies.

The effectivity of each method has been tested and the results obtained at different landfills evaluated. We conclude that ground probing radar and vertical electrical soundings give good results in determining landfill geometry. The existence of polluting plumes is best detected by using electromagnetic sounding. Magnetic prospection successfully detects the presence of metallic objects such as drums and pipes. All the methods present problems in the presence of external noise produced by power lines, buildings, vehicles, etc. This noise restricts the use of the geophysical methods in the field. Our study illustrates that the combined use of several methods provides more precise information concerning the studied area.

**Key words:** Landfill, contaminating plume, geophysical survey, environment impact.

## INTRODUCCIÓN

En el último siglo se ha producido un gran avance en el bienestar social asociado, en gran parte, al desarrollo industrial. Este cambio ha aportado,

como contrapartida, la contaminación del medio natural debido al gran número de residuos que se generaban y la ausencia de instalaciones adecuadas capacitadas para absorberlos. El resultado es la existencia de numerosos vertederos, clandestinos o mal acondicionados, que representan un riesgo potencial o real de contaminación al medio: suelos, aguas subterráneas, etcétera.

La prospección geofísica, tradicionalmente utilizada para la detección de hidrocarburos, estudios de minería, aguas subterráneas e ingeniería civil, se está aplicando en la actualidad con notable éxito en estudios ambientales (Benson *et al.*, 1984). Esto es debido a que sus cualidades como métodos rápidos, no destructivos y económicos hace adecuada su utilización en lugares donde existen asociadas unas condiciones especiales de peligrosidad como son acumulaciones de gases y lixiviados, producto del lavado de los residuos que contienen.

Entre los distintos métodos de prospección geofísica: prospección magnética, gravimétrica, eléctrica, electromagnética y sísmica, prácticamente todos pueden contribuir de forma significativa en el estudio de problemas ambientales (Lord *et al.*, 1988). Esto es debido a la gran diversidad y distinta complejidad de las diferentes condiciones y modelos de vertederos existentes cuyas características dependen de distintos factores:

- Tipo de residuos que contiene, cantidad y forma de acumulación de éstos.
- Materiales y/o estructuras geológicas donde se encuentran englobados.

Teniendo en cuenta todos estos factores, se atribuyen al vertedero distintos grados de peligrosidad que están en función de la contaminación que pueda causar al medio y que decidirán las actuaciones posteriores de recuperación y saneamiento de la zona.

## **OBJETIVOS**

Los objetivos del trabajo que se presenta han sido determinar la utilidad de la *prospección geofísica para localizar y caracterizar vertederos*. La caracterización de un vertedero consiste en determinar:

- límites,
- composición y distribución de los residuos que contiene,
- presencia y extensión del *penacho contaminante*,
- condiciones hidrogeológicas locales.

Previamente al inicio de la campaña de prospección geofísica, que se realiza con la finalidad de obtener información del subsuelo, es necesario contar con otro tipo de investigaciones como:

- La recopilación de información histórica de la zona como informes, otros estudios, fotografías, etc.
- El estudio de la foto aérea seriada en el tiempo.
- El reconocimiento «in situ» de la zona afectada.
- El estudio del medio hidrogeológico y de los datos disponibles.

Toda esta información nos determinará por un lado los requerimientos de trabajo que consisten en considerar la cantidad de espacio cubierto, establecer la profundidad y resolución requeridas y determinar las técnicas a emplear. Por otro lado, nos ayudará en la interpretación final de los resultados.

En el estudio que se presenta se muestran algunos resultados obtenidos a partir de distintos métodos geofísicos donde se incluye la prospección magnética, la prospección eléctrica y la prospección electromagnética. Con dichos resultados se evalúa la utilidad individual de cada uno de los métodos utilizados.

## PROSPECCIÓN GEOFÍSICA: MÉTODOS UTILIZADOS

### Prospección magnética

La prospección magnética se basa en la detección de anomalías del campo magnético terrestre. Estas anomalías están causadas por materiales que presentan elevada susceptibilidad magnética, es decir, que pueden polarizarse magnéticamente en presencia de un campo inductor. Todas las sustancias ferromagnéticas presentan estas características.

El campo magnético terrestre se define en cada instante por un vector  $B$  que en cada región particular se caracteriza por un módulo igual a la intensidad total del campo, una inclinación (o ángulo respecto la horizontal) y una declinación (o ángulo respecto al norte geográfico). El valor de la intensidad varía desde 60.000 nT (nanoTeslas) cerca de los polos, hasta 25.000 nT en el Ecuador (Kearey *et al.*, 1991). En nuestra latitud, su valor aproximado es de 44.500 nT. El campo geomagnético, sin embargo, no es constante: existen variaciones diurnas de algunas decenas de nT y variaciones en períodos aleatorios, conocidas como tormentas magnéticas, con cambios de amplitud de hasta 1.000 nT. Estas variaciones deben tenerse en cuenta antes de tratar los datos, ya que pueden distorsionar los resultados.

El vector de la intensidad del campo total  $B$  puede descomponerse en una componente vertical  $Z$  y una componente horizontal  $H$  en la dirección del norte magnético.  $Z$  es máxima cuando la inclinación es de 90, o lo que es igual, cuando las medidas han sido tomadas en el polo. La existencia de componente horizontal implica que la anomalía es bi-polar, es decir, presenta un máximo positivo y un mínimo negativo.

La anomalía creada por un cuerpo magnetizado está en función de la masa y la profundidad a la que se encuentra dicho cuerpo, pero también depende de

la forma, susceptibilidad del material, situación espacial, inclinación del campo magnético terrestre y magnetismo remanente. Todos estos parámetros, en numerosas ocasiones, no pueden ser controlados, lo que dificulta el estudio y se llega únicamente a dos tipos de interpretación:

*Cualitativa*, donde se permite caracterizar zonas con distribuciones magnéticas distintas y correlacionarlas con la existencia de objetos metálicos enterrados, y

*Cuantitativa*, si se compara con modelos teóricos obtenidos de anomalías creadas por cuerpos geométricos simples o mediante el cálculo experimental de una estructura determinada (Fig. 1).

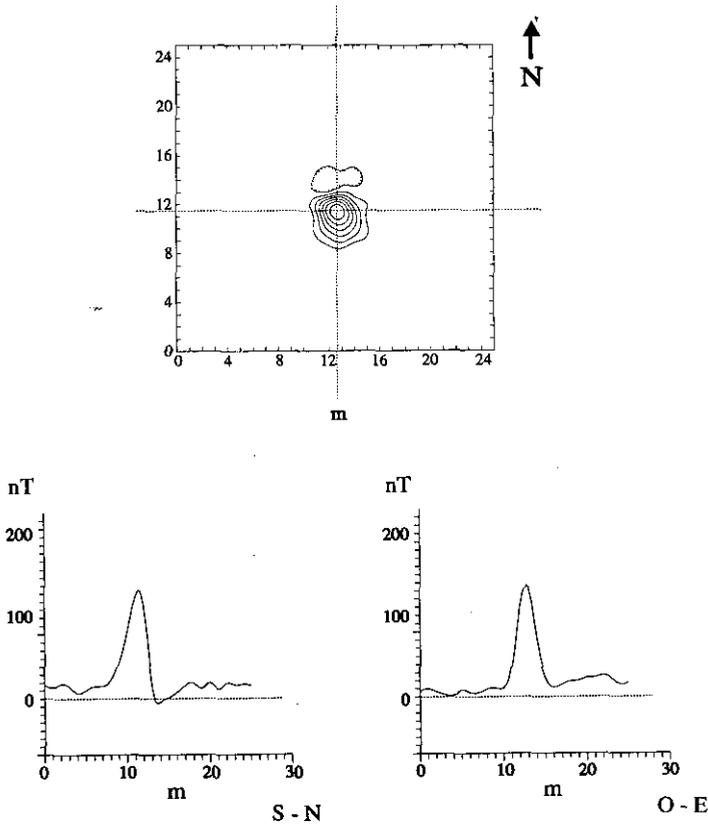


Fig. 1. Representación de la anomalía magnética experimental creada por un bidón de 200 l, situado a 2 m de profundidad respecto al sensor del magnetómetro. La inclinación del campo geomagnético en esta latitud es de 58 y la posición del bidón con respecto a dicho campo es de E-O.

El instrumento más adecuado para este tipo de estudios es el magnetómetro de protones, por ser un equipo de campo ligero, de fácil utilización y económico. Proporciona de forma precisa ( $\pm 1$  nT) el valor absoluto de la intensidad total del campo magnético. Esta medida comprende tanto el valor regional como el valor de la anomalía creada por cuerpos superficiales existentes. Para destacar estas últimas se elimina por distintos procedimientos de filtrado el efecto regional.

Para la aplicación de esta técnica de exploración sobre el terreno debe tenerse en cuenta que en la respuesta del magnetómetro también influye la combinación de otros efectos producidos por estructuras superficiales como por ejemplo las vallas metálicas, edificios cercanos, coches, etc. Estos efectos actúan como ruido porque enmascaran la respuesta propia del objetivo que se persigue y es difícil aislar sus efectos sobre la señal.

La utilidad de la prospección magnética en estudios de caracterización de vertederos incluye:

- Localizar objetos férricos como bidones, depósitos de almacenamiento, etc.
- Seleccionar lugares excavados y rellenos con desechos férricos.

En el siguiente ejemplo (Fig. 2) obtenido sobre un vertedero, se observa un destacado relieve magnético que contrasta con los valores de fondo de las zonas limítrofes. En esta área queda perfectamente localizada la existencia de cuerpos férricos enterrados. Para cuantificar la masa que crea la anomalía y aproximar la profundidad a la que se encuentra se ha representado un perfil en dirección N-S que pasa por el punto de intensidad máxima. En este perfil se

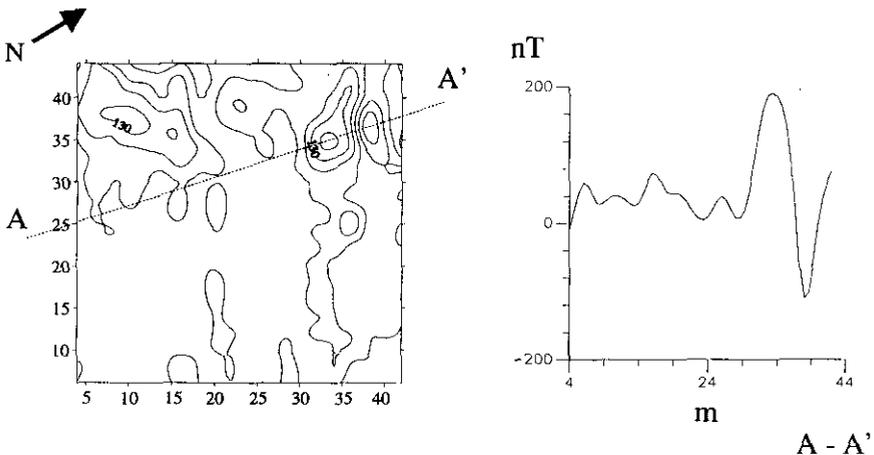


Fig. 2. Representación de las anomalías magnéticas existentes sobre un vertedero conteniendo bidones metálicos.

observa una serie de anomalías donde destaca la última por su mayor intensidad y marcado carácter bi-polar, donde se refleja con claridad una parte muy acusada negativa que destaca de los modelos existentes. La explicación podría ser debida a la existencia de una magnetización remanente en el cuerpo que produce la anomalía. Comparando esta anomalía con los modelos teóricos obtenidos podemos deducir que la masa metálica que la genera está formada por el equivalente a unos 17 bidones enterrados a 6 m de profundidad.

### **Ventajas y limitaciones del método**

Ventajas:

- Puede localizar cualquier tipo de objeto férreo independientemente de su forma o posición.
- La resolución es bastante elevada, pudiendo detectar un bidón aislado a 4 m de profundidad.
- La interpretación cuantitativa de los datos nos proporciona información sobre la profundidad y la cantidad de masa férrea enterrada.

Limitaciones:

- Es susceptible al ruido producido por la existencia de otros objetos férricos próximos a la zona de medidas como coches, edificios, etc. y líneas de alta tensión.
- Es sensible a las fluctuaciones temporales del campo magnético terrestre.
- La detectabilidad de un cuerpo está condicionada por la cantidad de masa y la profundidad a la que se encuentra.
- Los datos tienen un uso limitado para una interpretación cuantitativa, sobre todo en presencia de magnetización remanente.

### **Prospección eléctrica**

La prospección eléctrica se fundamenta en el estudio de las variaciones de la resistividad eléctrica del subsuelo permitiendo, a partir de las relaciones existentes entre ésta y el tipo de litología o la salinidad del fluido contenido en las rocas porosas, obtener información sobre la estructura y composición del subsuelo.

Los minerales que componen el suelo y las rocas son muy resistivos. En estas circunstancias el porcentaje de agua existente influye decisivamente en la disminución de los valores medidos. En general, la resistividad de las rocas disminuye sus valores normales cuando sucede alguno de los siguientes casos (McNeill, 1990):

- El contenido de agua del suelo aumenta. Este factor está relacionado con el grado de porosidad y permeabilidad existente.
- Hay mayor concentración de electrólitos disueltos.
- Aumenta la temperatura.

Por otro lado, algún tipo de material como las arcillas, por la propiedad de intercambio catiónico que presentan, tienen unos valores de resistividad muy bajos.

Existen distintos métodos de prospección eléctrica: unos utilizan campos eléctricos naturales, mientras que otros artificiales dependen de la introducción de corrientes en el terreno y determinan la diferencia de potencial resultante en superficie. Este parámetro está directamente relacionado con el valor de la resistividad media del subsuelo. En general, en aplicaciones ambientales y estudios hidrogeológicos, los métodos de inyección de corriente artificial son los más utilizados. Dentro de estos métodos, en los que se utiliza corriente continua se incluyen:

- Sondeos eléctricos verticales (S.E.V.), que miden la variación de la resistividad aparente del subsuelo en profundidad.
- Calicatas eléctricas, que miden la variación de la resistividad lateralmente a una profundidad prácticamente constante.

Ambos métodos consisten en la medida de la resistividad del terreno a partir de un dispositivo constituido por cuatro electrodos: dos de corriente, por donde inyecta el campo artificial de corriente en el subsuelo, y dos de potencial, entre los que se mide la diferencia de potencial producida. La resistividad aparente en cualquier caso se obtiene a partir de la expresión:

$$\rho_a = k \left( \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} \right)$$

donde:

- I es la intensidad de la corriente inyectada en miliamperios;
- $\Delta V$  es la diferencia de potencial;
- k es el coeficiente geométrico del dispositivo que depende de las distancias respectivas entre los cuatro electrodos.

En función de la disposición geométrica de los electrodos se obtienen distintos dispositivos de los que el más utilizado es Schlumberger (Fig. 3). Esto se debe a su mayor eficacia y resolución, ya que son necesarios menos operadores en su aplicación y presenta menos perturbaciones por el efecto de heterogeneidades laterales superficiales que otros dispositivos como por ejemplo Wenner.

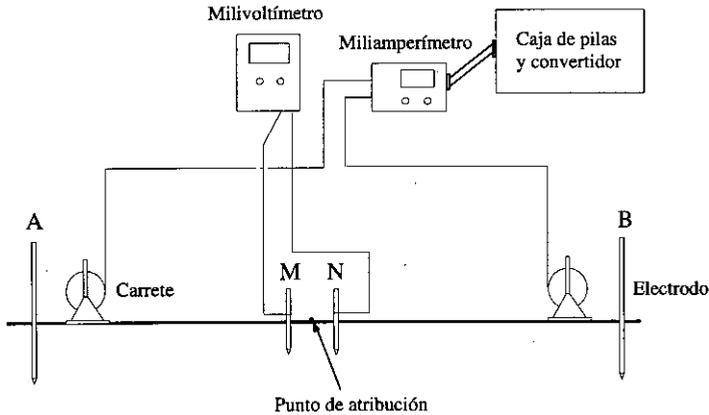


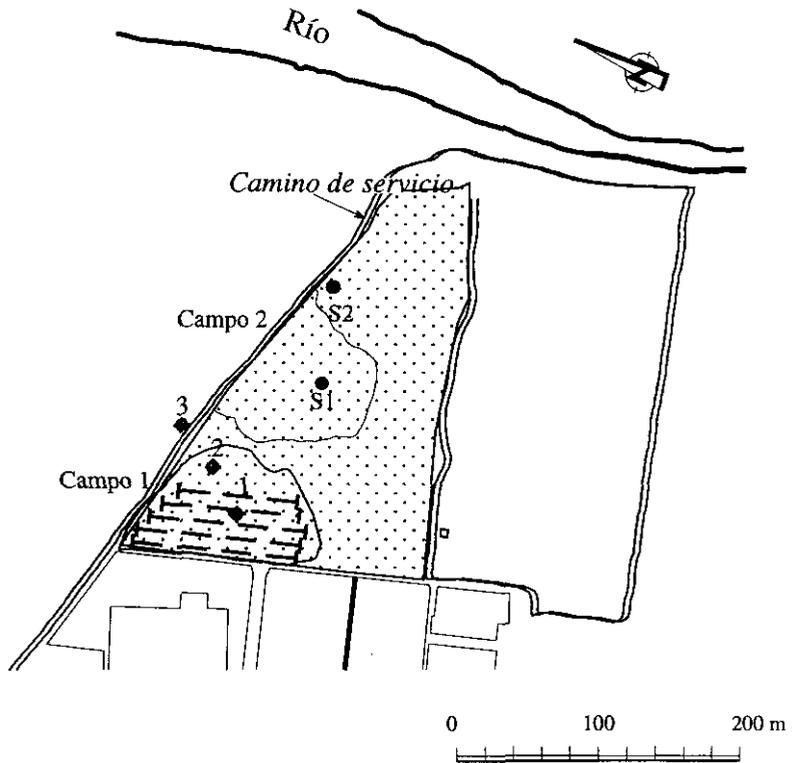
Fig. 3. Esquema de un dispositivo electródico Schlumberger.

La aplicación de los métodos geoelectrónicos de corriente continua en el estudio de vertederos se utiliza para:

- Localizar y cartografiar la existencia de penachos contaminantes y estimar la resistividad.
- Establecer la dirección de movimiento del contaminante y cuantificarlo a partir de medidas hechas en diferentes tiempos sobre el mismo punto.
- Definir la geometría (extensión y profundidad) del área afectada por los vertederos y caracterizar su composición.

En la figura 4 se observa la disposición de tres Sondeos eléctricos verticales con respecto al vertedero existente en la zona. Los sondeos 1 y 2 están localizados justo encima de este, mientras que el sondeo número 3 se encuentra fuera. Las respuestas obtenidas presentan claras diferencias (Fig. 5): En el SEV1 se detecta una profundidad de relleno de 16.5 m. Esta profundidad es mayor que la obtenida en el SEV2 que llega hasta 23.5 m. Las resistividades de la zona de relleno dan valores entre 13 y 18 ohm.m lo que indica la ausencia de penacho contaminante. Por debajo, las resistividades obtenidas se encuentran entre 55 y 75 ohm.m, lo que determina la existencia a esta profundidad de las gravas saturadas de las formaciones aluviales cuaternarias. En el SEV3 donde se obtiene una resistividad, entre 2 y 17 m de profundidad, de 70 ohm.m, podría corresponder a las arenas y gravas de la formación aluvial. Por debajo la resistividad desciende, lo que marca el comienzo de la zona saturada o un cambio en la litología. La existencia de sondeos mecánicos en la zona (Fig. 4) minimiza el error en la interpretación de los sondeos eléctricos verticales y limita el grado de ambigüedad que plantea el problema de la equiva-

lencia, es decir, que la curva experimental de un mismo sondeo eléctrico pueda ser atribuida correctamente como producida por diferentes modelos de terreno.



- — — — — Prospección Electromagnética
- ◆ Sondeo Eléctrico Vertical
- Sondeo mecánico de percusión
- ▣ Vertedero

Fig. 4. Esquema de situación que muestra la prospección geofísica realizada sobre un vertedero.

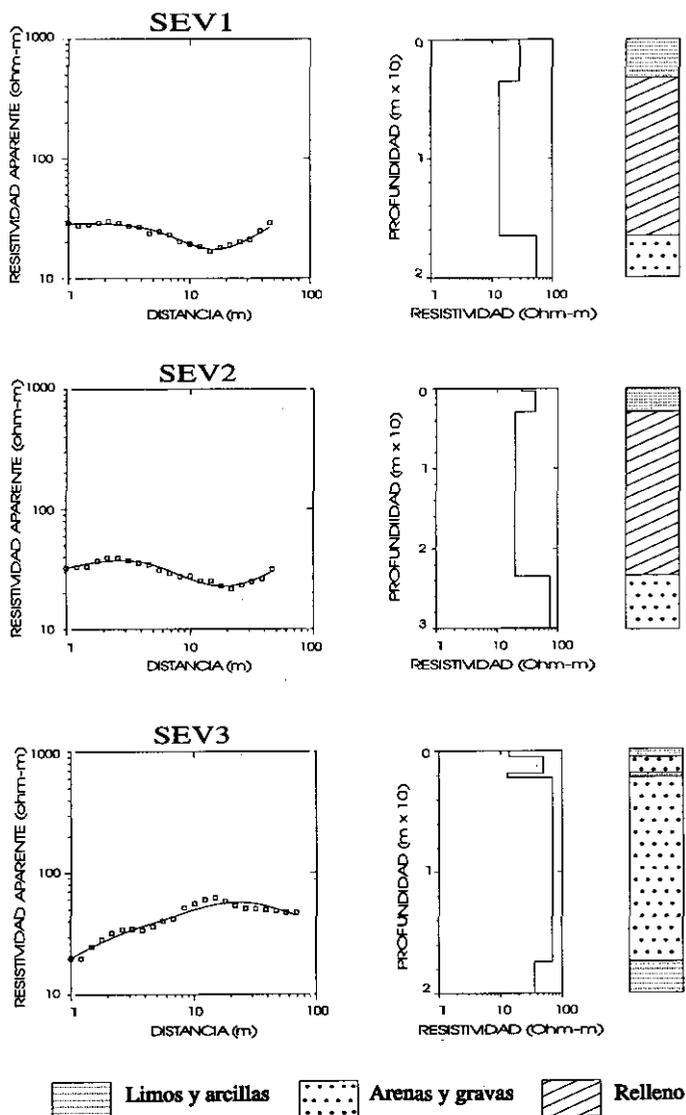


Fig. 5. Sondeos eléctricos verticales realizados sobre un vertedero según la disposición presentada en la fig. 4. Los sondeos 1 y 2 muestran una capa de baja resistividad (entre 10 y 18 ohm.m) correspondiente a los materiales de relleno del vertedero, fundamentalmente arcillosos, mientras que el sondeo 3 presenta la composición litológica original de alternancia de arenas y gravas de la terraza aluvial.

## Ventajas y limitaciones del método

### Ventajas:

- Se trabaja obteniendo tanto perfiles longitudinales en profundidad como perfiles a una profundidad prácticamente constante escogida por el operador.
- El instrumental de medida es sencillo y económico.
- Se consiguen profundidades importantes, en función de la intensidad de corriente y de la disponibilidad del cableado eléctrico.

### Inconvenientes:

- La utilización de electrodos puede traer problemas en áreas donde la superficie tiene una elevada resistividad. Esto es debido a que las resistencias de contacto pueden ser muy grandes o en zonas muy conductoras puede producirse un corto circuito que impida la penetración de la corriente.
- Para obtener unos buenos resultados es importante la existencia de una cierta homogeneidad lateral en el suelo y topografía plana.
- Es un método lento y necesita un mínimo de tres operadores para utilizarlo, así como unas condiciones del suelo especiales para poder implantar los electrodos.

## Prospección electromagnética

La prospección electromagnética mide la conductividad eléctrica aparente del subsuelo. Se fundamenta en el hecho de que un campo electromagnético, producido por una antena o bobina por la que pasa una corriente alterna, se propaga a través del subsuelo, induciendo otras corrientes alternas en cualquier conductor que atraviere en su recorrido. Estas corrientes originan campos electromagnéticos secundarios que alteran el campo primario (o campo normal en caso de ausencia de cuerpos conductores) variando su intensidad, fase y dirección. Lo que define estos campos son los contrastes de conductividad.

El problema de cálculo teórico de la respuesta de un conductor frente a un campo electromagnético consiste en la resolución de las ecuaciones de Maxwell para determinadas condiciones de contorno. El hecho de tener una resolución compleja, los estudios se limitan a modelos sencillos. Así se ha determinado que en diferentes condiciones definidas técnicamente como una operación con un valor del número de inducción (o producto entre la separación de las bobinas y la profundidad en que la amplitud del campo electromagnético decrece un factor igual a  $e^{-1}$ ) muy bajo ( $<1$ ), la relación entre el campo magnético secundario y el primario es una función lineal de la conductividad del terreno,

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right)$$

donde:

- $\sigma_a$  = conductividad aparente del terreno
- $H_p$  = campo magnético en la bobina emisora
- $H_s$  = campo magnético en la bobina receptora
- $\omega = 2\pi f$
- $f$  = frecuencia en Hz
- $\mu_0$  = permeabilidad en el vacío
- $s$  = separación entre bobinas
- $(H_s / H_p)$  = cuadratura

La intensidad de las corrientes inducidas depende, entre otros factores, de la susceptibilidad de la masa magnética y de la frecuencia del campo primario. Generalmente la corriente es más intensa, cuando la resistividad, la susceptibilidad magnética y la frecuencia son más grandes. La profundidad de penetración, en cambio, depende de la frecuencia del emisor y de la conductividad del terreno. Su valor es función de (McNeill, 1980):

$$d = 500 \left( \frac{\rho_a}{f} \right)^{1/2}$$

donde:

- $\rho_a$  = resistividad aparente del medio
- $f$  = frecuencia del emisor (Hz)

La aplicación de la prospección electromagnética en la caracterización de vertederos conlleva:

- Evaluar las condiciones hidrogeológicas locales.
- Detectar y cartografiar la existencia de penachos contaminantes. Tomando medidas en distintos tiempos se puede determinar también su migración.
- Localizar los límites de la zona excavada y determinar las características de los residuos contenidos.

Existen diferentes equipos comerciales disponibles para realizar estudios de prospección electromagnética. Para estudios de caracterización de vertederos y contaminación de aguas subterráneas se utilizan principalmente las calicatas electromagnéticas (Greenhouse y al., 1983) y el geo-radar.

### Calicateo electromagnético

Consta de dos bobinas, una emisora y otra receptora conectadas entre sí. La bobina emisora emite con ondas multifrecuencia; la bobina receptora mide las componentes de fase y cuadratura del campo magnético vertical a diferentes frecuencias y genera como respuesta el valor de la conductividad en ese punto (Fig. 6).

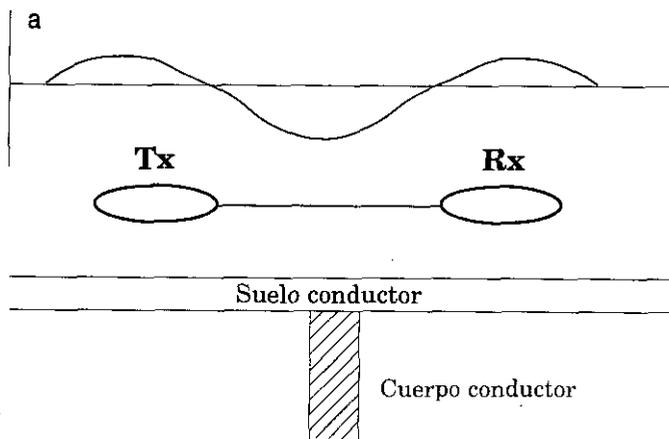


Fig. 6. Variación de la conductividad en presencia de un cuerpo conductor. Tx es el emisor y Rx el receptor.

Uno de los instrumentos más utilizados es el EM34-3 de Geonics, que opera con dos posiciones de las bobinas (vertical y horizontal) y distintas separaciones entre éstas de 10, 20 y 40 m. Estas condiciones determinan la profundidad efectiva de exploración que está situada entre las siguientes medidas (McNeill, 1980): 7,5, 15, 30 y 60 m.

En la figura 7 se representa la distribución de la resistividad en secciones verticales obtenidas sobre un vertedero con un conductímetro EM34, según la disposición que se observa en la figura 4. Se observa la geometría de un penacho contaminante perfectamente identificable por la forma que dibujan las isolíneas. Así, los mínimos de resistividad asociables a las zonas de mayor concentración en solutos del penacho de lixiviados, siguen un trazado vertical en la zona no saturada (desde la superficie del terreno hasta el nivel freático), mientras que a mayor profundidad la evolución de la zona contaminada sigue la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Destacan también puntos muy localizados de elevada resistividad que se atribuyen a la heterogeneidad del relleno.

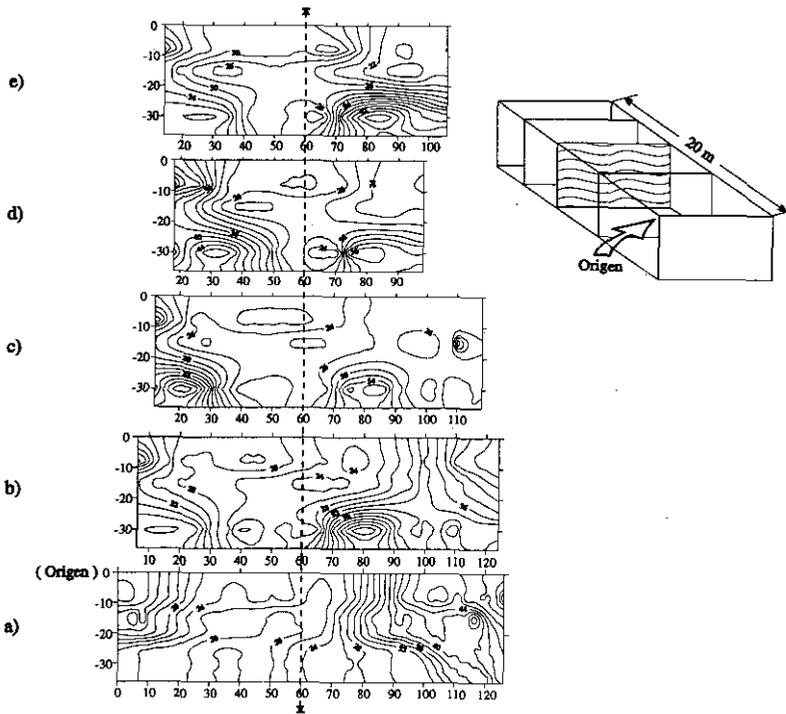


Fig. 7. Distribución de la resistividad aparente en un vertedero, representada en secciones longitudinales, donde puede apreciarse la heterogeneidad de los materiales de relleno. Las bajas resistividades (inferiores a 20 ohm.m) detectadas en la sección a) y que tienen continuidad en las demás secciones pueden interpretarse como debidas a un penacho contaminante originado por el fixiviado del vertedero.

## Ventajas y limitaciones del método

### Ventajas:

- La resolución lateral es excelente si se compara con las técnicas resistivas convencionales y trabaja de forma mas rápida y efectiva que ésta.
- Adquiere la misma profundidad de penetración con oberturas entre bobinas mucho menores que entre electrodos si se utilizan calicatas eléctricas.

### Limitaciones:

- El método es susceptible a diferentes fuentes de ruido no controlables como la existencia de una topografía pronunciada, los materiales altamente

conductivos que componen el suelo, la existencia de lentejones de arcilla no conocidos, etc. Las líneas de alta tensión también son una fuente de ruido muy importante, que impide la práctica del método.

- Tiene menos resolución para determinar las variaciones verticales de la resistividad que el Sondeo Eléctrico Vertical a causa de su número limitado de intervalos de profundidad.

## Geo-radar

El equipo de geo-radar consta de cuatro elementos principales: una antena transmisora, una antena receptora, una unidad de control y un sistema de registro. La antena transmisora emite pulsos cortos de energía electromagnética de radio-frecuencia que penetran en el subsuelo. Cuando la onda encuentra heterogeneidades en las propiedades eléctricas de los materiales por los que atraviesa, parte de esta energía se refleja provocando una variación en la señal y parte continua avanzando a profundidades mayores siguiendo el mismo proceso.

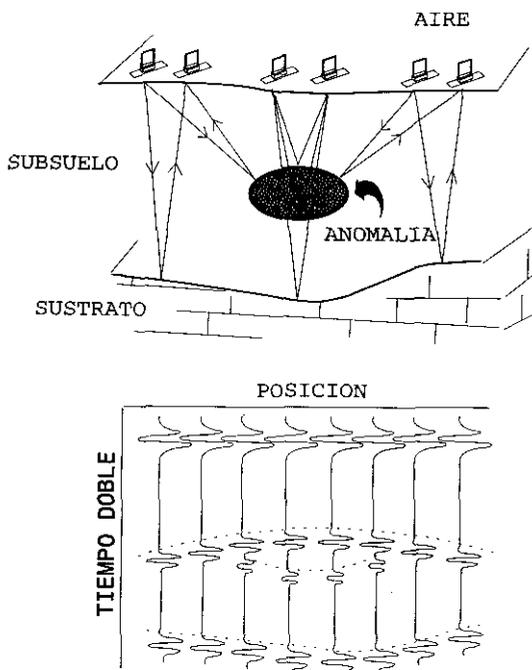


Fig. 8. Representación esquemática de las trayectorias realizadas por las ondas de geo-radar y de las señales generadas en el correspondiente radargrama.

La señal que se refleja es detectada por el receptor y en la unidad de control se amplifica, se transforma al espectro de audio frecuencia, se procesa y finalmente se imprime. El resultado es un perfil vertical continuo donde en ordenadas se representa el tiempo que tarda la señal desde que sale del emisor hasta que es captado por el receptor en ns ( $1 \text{ ns} = 10^{-9}$  segundos), y en abscisas el espacio en metros, análogo a los resultados que se obtienen en sismica de reflexión (Fig. 8).

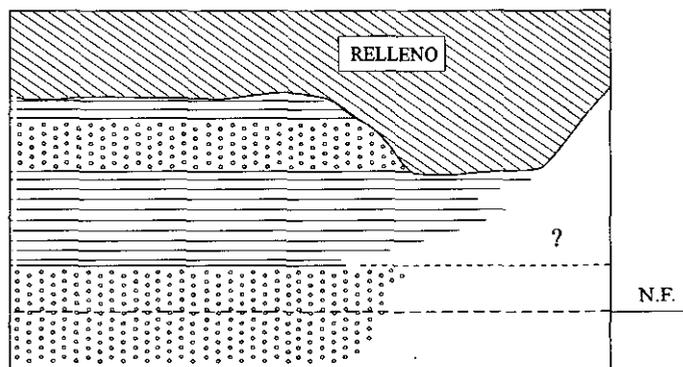
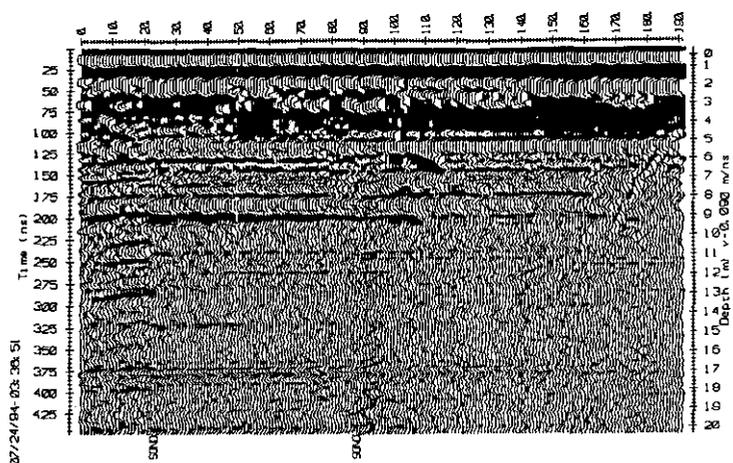


Fig. 9. Perfil de geo-radar obtenido en una zona de rellenos. Los cambios en la morfología de los distintos reflectores, de forma caótica y muy energéticos en la franja superior y sub-horizontales a mayores profundidades, nos determinan la existencia de un relleno superior, que aumenta su potencia a partir del metro 105. Por debajo, se observan los materiales originales del aluvial. La interpretación, representada esquemáticamente en esta figura, se basa también en la información obtenida de los sondeos mecánicos existentes en los puntos marcados en el perfil superior con la etiqueta SOND.

Las frecuencias de transmisión más comunes con las que trabaja el georadar oscilan entre 10 y 1000 MHz (megahertz). La selección de la antena varía en función de la profundidad a alcanzar y la resolución. Altas frecuencias implican perfiles de alta resolución y escasa penetración. Con bajas frecuencias, en cambio, se llega a mayores profundidades pero con pérdida de resolución, definiéndose entonces características de orden métrico.

En la figura 9 se representa un perfil obtenido en una zona de vertederos con una antena de 50 MHz. Inicialmente encontramos una franja de reflectores de baja frecuencia y muy energéticos que llegan hasta 110 ns, aproximadamente. Por debajo, y hasta 200 ns, existe un reflector que delimita inferiormente la segunda franja, caracterizada por la presencia de reflectores muy continuos y más energéticos que corresponde a intercalaciones de la arenas y gravas en un acuífero aluvial. Los reflectores continuos desaparecen gradualmente a partir del punto 105 de referencia de posición en relación al origen. Se considera área de relleno la primera franja con reflectores de baja frecuencia, que aumenta su profundidad en la posición 105 m, conteniendo materiales distintos de los más superficiales. Finalmente, destaca la presencia de dos reflectores más: uno de mayor energía que los de alrededor situado a 320 ns y otro, característico por su morfología doble, a 380 ns. Todos los reflectores señalados pertenecen a cambios de litología en profundidad, de arenas a limos. El último, situado a 380 m, por su posición respecto del nivel regional se interpreta como correspondiente al nivel freático.

### **Ventajas y limitaciones del método**

#### Ventajas:

- Se obtienen perfiles longitudinales continuos del subsuelo, cosa que da una visión global y facilita la interpretación.
- Es un método rápido y sólo necesita dos operadores para su manejo.
- El sistema tiene capacidad de optimización para cada caso al intercambiarse antenas de diferentes frecuencias.
- Es método de alta de resolución: desde pocos centímetros hasta algunos metros.

#### Limitaciones:

- La profundidad de penetración depende mucho de las condiciones del lugar (está muy limitada por la existencia de fluidos que rellenan los poros o la existencia de arcillas muy superficiales).
- La profundidad máxima a la que se llega (30 - 40 m ) no es muy grande si se compara con otros métodos.

- En determinadas condiciones la interpretación del perfil puede resultar difícil.
- Las medidas pueden quedar afectadas por diferentes fuentes de ruido externas.
- La conversión de profundidades de tiempos doble a metros no es exacta a causa de las heterogeneidades de materiales existentes en el subsuelo.

## CONCLUSIONES

La utilización de la prospección geofísica en los estudios de caracterización de vertederos resulta interesante debido a las ventajas de utilización que estos métodos comportan. Por un lado trabajan de forma no destructiva, lo que evita contactos directos con el vertedero que pueden conducir a problemas mayores de contaminación. También nos dan una visión global de la situación en que se encuentra la zona de forma rápida y más económica que los métodos directos, lo que disminuye el coste del proyecto.

Cada uno de los métodos estudiados, debido a la teoría de prospección en que se fundamentan y a las ventajas particulares que aportan, se adapta mejor a los distintos objetivos y situaciones que comporta el estudio. Así, las prospecciones eléctrica y electromagnética nos permiten detectar la presencia de penachos contaminantes, discriminar el tipo de material enterrado y determinar la morfología espacial del relleno. La prospección magnética, por su parte, nos permite localizar la existencia de bidones, tuberías, y cualquier tipo de objeto férreo. En general, las características multivalentes de cada método hacen que su utilización conjunta permita complementar las distintas informaciones y obtener así, una caracterización más detallada y global que conduce a una interpretación más segura.

Posteriormente a los trabajos de prospección geofísica, utilizados para catalogar los distintos vertederos según sus características como son el tipo de relleno y el peligro de contaminación, se elaborarán nuevos planes de intervención apropiados a cada lugar. Si se detecta algún tipo de contaminación, debe procederse a un control sistemático de la zona mediante métodos directos: sondeos y catas mecánicas, análisis químicos, etc., para una cuantificación e información más detallada del problema, procediendo al saneamiento en caso de necesidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- BENSON, R. C., GLACCUM, R. A., y NOEL, M. R. (1984): *Geophysical Techniques for sensing buried wastes and waste migration*. Technos, Inc. ed. 236 p.
- GREENHOUSE, J. P., y SLAINE, D. D. (1983): «The use of reconnaissance electromagnetic methods to map contaminant migration». *Ground Water Monitoring Review*, vol. 3, n.º 2:47-49.
- KEAREY, P., y BROOKS, M. (1991): *An Introduction to Geophysical Exploration*. Oxford, Ed. Blackwell Scientific Publications, 254 p.

- LORD, A. E. JR., y KOERNER, R. M. (1988): «Nondestructive Testing (NDT) Techniques to Detect Contained Subsurface Hazardous Waste». *Journal of Hazardous Materials*, 19: 119-123.
- MCNEILL, J. D. (1980): *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Technical Note tn-6, Geonics, Mississauga.
- MCNEILL, J. D. (1990): *Use of electromagnetic methods for groundwater studies*. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol. 3, n.º 2:191-218.