

## **Módulo: Contaminación de los Suelos y Aguas Subterráneas**

### **Sesión: Caracterización**

## **Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental**

**Año de realización 2015-2016**

**PROFESOR/A: Gabriel Conde**

Para ver esta política, debe  
desplazarse al final de la página.

Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

## Índice

1.	Introducción .....	1
2.	Estrategia de caracterización .....	1
3.	Desarrollo de un programa de caracterización .....	3
3.1.	Recopilación y análisis de información .....	4
3.1.1.	Estudio histórico .....	4
3.1.2.	Estudio del medio físico .....	5
3.2.	Inspección del emplazamiento .....	5
3.3.	Elaboración de un primer modelo conceptual del emplazamiento .....	7
3.4.	Investigación de campo y laboratorio.....	7
3.4.1.	Caracterización geológica e hidrogeológica .....	9
3.4.2.	Toma de muestras para evaluación de la contaminación .....	7
3.4.3.	Pretratamiento, envasado y envío de las muestras.....	15
3.4.4.	Análisis <i>in situ</i> .....	16
3.4.5.	Análisis en laboratorio .....	16
3.4.6.	Evaluación de resultados .....	17
3.5.	Elaboración del informe de caracterización .....	18
3.6.	Control de calidad.....	18
4.	Acreditación de entidades .....	19

## 1. Introducción

Una vez que se ha identificado un espacio potencialmente contaminado, ha de realizarse la caracterización o investigación, que puede entenderse, en un sentido amplio, como el conjunto de labores a realizar de cara a obtener la información suficiente para confirmar o descartar la presencia de contaminación y, en su caso, determinar su naturaleza y extensión y definir la problemática planteada por la misma. Tal problemática incluye habitualmente, no sólo los riesgos que supone para la salud humana y el medio ambiente, sino también una serie de consecuencias de carácter legal (incluso penal), social y económico que no deben infravalorarse.

Los trabajos de caracterización no deben constituir un fin en sí mismos, sino un medio para obtener información necesaria para el diagnóstico y la toma de decisiones.

## 2. Estrategia de caracterización

Los trabajos de caracterización constituyen en gran parte de los estudios de espacios contaminados las principales fuentes de información para efectuar el diagnóstico, por lo que la validez de los resultados de tales estudios depende en buena medida de la calidad con que se ha ejecutado la caracterización. Si, además, se tiene en cuenta que es durante la fase de caracterización cuando habitualmente se mantiene el mayor contacto directo con el emplazamiento y se consideran los elevados costes que este tipo de trabajos suelen conllevar, queda patente la necesidad de proceder a la ejecución de los mismos siguiendo una estrategia y un programa definidos de antemano.

Si bien no es posible definir una estrategia aplicable con carácter general para la caracterización de cualquier espacio contaminado, se pueden mencionar algunos aspectos clave a tener presentes a la hora de diseñar aquella y el contenido de los trabajos:

- La estrategia de caracterización debe ser coherente con los objetivos del estudio global en que se encuadra.
- Los trabajos de caracterización (y en consecuencia la estrategia a adoptar) suelen estar condicionados por limitaciones temporales (plazo de ejecución de los mismos) y operativas (disponibilidad de técnicas y equipos, restricciones impuestas por las características del emplazamiento o por sus propietarios, etc.).
- El diseño del programa de caracterización debe perseguir la optimización de los recursos económicos destinados al mismo, de modo que se obtenga el máximo de información útil.

La experiencia demuestra que, siempre que otros condicionantes no lo impidan, resulta ventajoso adoptar un planteamiento secuencial para la caracterización de un espacio contaminado. Ello se traduce en el diseño y ejecución de los trabajos por fases, de modo que al término de cada una de ellas se realiza una evaluación de la información obtenida, estimándose si es necesario o no y, en caso afirmativo, hasta qué punto y en qué aspectos es preciso ampliar la investigación durante una fase posterior.

Este es el enfoque que recogen numerosas normas o recomendaciones elaboradas en varios países y en varias comunidades autónomas españolas, para orientar la ejecución de este tipo de trabajos. A título de ejemplo, el Gobierno Vasco, a través de IHOBE, y la Comunidad de Madrid han editado varias guías metodológicas para el estudio de espacios contaminados. De acuerdo con lo establecido en estas guías, el estudio de un emplazamiento potencialmente contaminado debe pasar, en general, por dos fases de investigación (ver Figura 1):

- La Investigación Preliminar, dividida a su vez en dos etapas diferenciadas:
  - Caracterización inicial, orientada a evaluar la posibilidad de existencia de contaminación en el emplazamiento, se compone de un estudio histórico, una inspección del emplazamiento y un análisis del medio físico en que se encuentra localizado aquél.
  - Caracterización analítica, orientada a confirmar o desechar la presencia de contaminación, se basa en un programa de muestreo y análisis, diseñado a partir de la información suministrada por la etapa anterior.
- La Investigación Detallada, orientada a definir espacial y temporalmente la contaminación previamente confirmada y a evaluar los riesgos actuales y futuros derivados de la misma.

Para cada una de estas etapas, se establecen recomendaciones acerca de cómo efectuar los distintos trabajos, dependiendo, además, el enfoque de algunos de ellos, de la información disponible acerca de las supuestas causas de la contaminación (origen conocido o desconocido, fuentes puntuales o dispersas, etc.). A su vez, los trabajos de cada una de dichas etapas (especialmente de la última) pueden ejecutarse en una o varias fases, en función de las características particulares de cada caso.

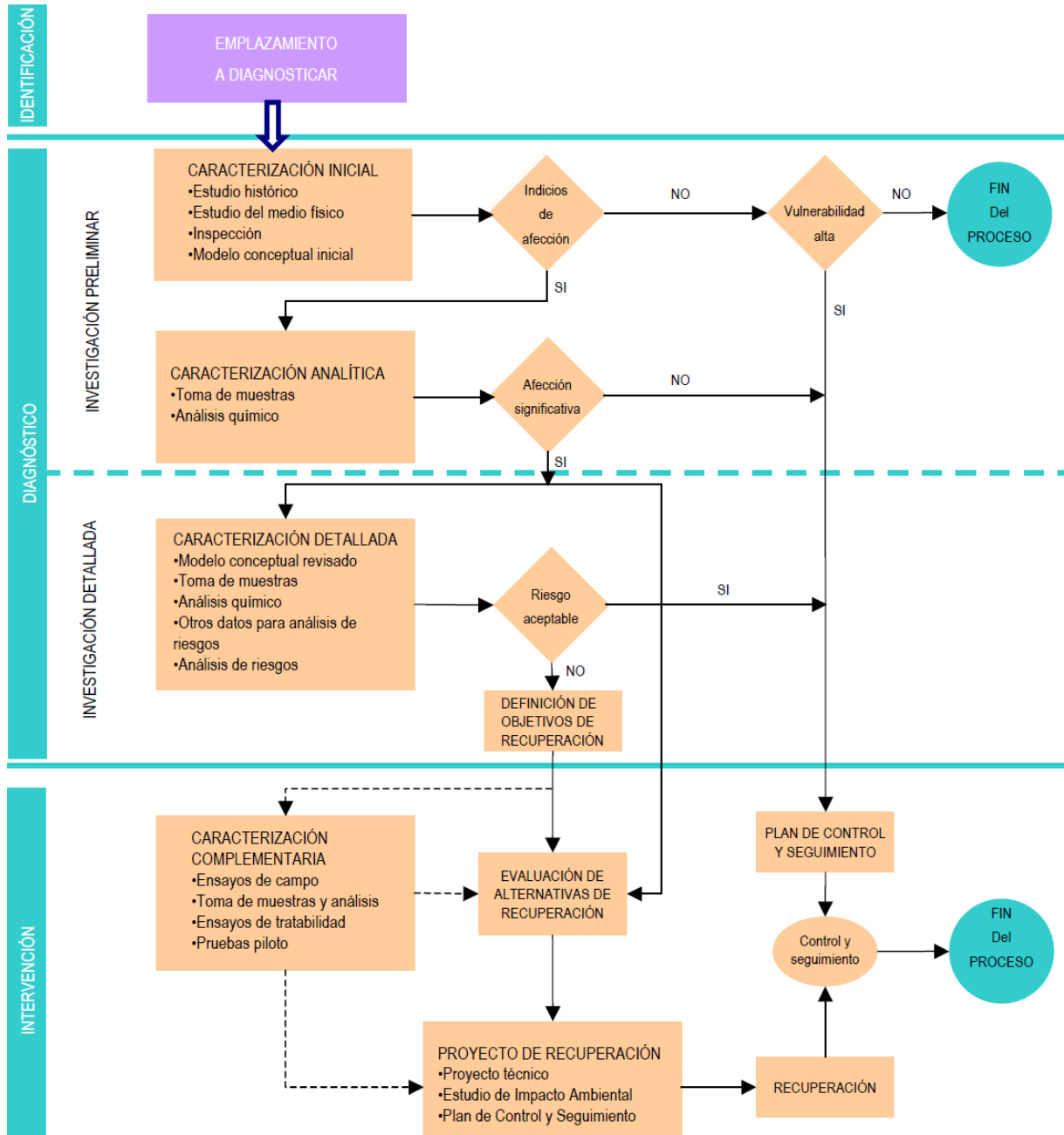


Figura 1.- Esquema general de gestión de suelos contaminados en la Comunidad de Madrid

Fuente: www.madrid.org

### 3. Desarrollo de un programa de caracterización

En los siguientes epígrafes se desarrolla el contenido genérico y algunas consideraciones de interés referentes a las labores antes mencionadas. Conviene recordar que estos contenidos deberán ajustarse a los objetivos y limitaciones que presente cada caso concreto.

### 3.1. Recopilación y análisis de información

La optimización de los resultados de un programa de caracterización de espacios contaminados aconseja recopilar la mayor información ya elaborada que sea posible, en las etapas preliminares de la investigación, dado que habitualmente la obtención de aquella es mucho menos costosa que su elaboración ex profeso dentro del estudio. Esta información será la base para efectuar el estudio histórico y el análisis del medio físico.

La información a recopilar es en general muy variada, debiendo decidirse en cada caso el alcance y aspectos sobre los que centrar la búsqueda. Por otra parte, las fuentes de información a utilizar suelen ser diversas, desde estudios y mapas fácilmente disponibles hasta datos que puedan aportar propietarios, operadores o individuos y entidades afectadas por el problema, pasando incluso por archivos históricos locales.

La recopilación y análisis de la información obtenida debe dar lugar, en primer término, a una evaluación de la calidad y fiabilidad de la misma, identificando, además, las lagunas que sería deseable cubrir en trabajos posteriores. En la medida de lo posible, conviene también prever el modo de conseguir la información no disponible.

#### 3.1.1. Estudio histórico

La información que, genéricamente, suele ser de interés puede resumirse en los siguientes aspectos:

- Datos "históricos" sobre el emplazamiento: propietarios, actividades desarrolladas en el mismo, sucesos relevantes (accidentes, fugas, denuncias, etc.), estudios previos realizados, documentación gráfica (planos, fotografías terrestres y aéreas).
- Información específica sobre las actividades desarrolladas actualmente en el emplazamiento: procesos y ubicaciones de los mismos, materias primas, productos y subproductos utilizados (en su caso), instalaciones de almacenamiento y trasvase, métodos de gestión, sistemas de seguridad y prevención instalados, preparación del personal, prácticas operativas, etc.

Con esa información, hay que identificar las sustancias peligrosas utilizadas, producidas o emitidas por la instalación y confeccionar una lista de ellas. Si en la lista las sustancias peligrosas figuran con un nombre comercial, deben indicarse también sus componentes químicos. En el caso de las mezclas o compuestos, debe indicarse la proporción relativa del principal constituyente químico.

Seguidamente hay que determinar, respecto a cada una de las sustancias peligrosas identificadas, la posibilidad real de contaminación del suelo y las aguas subterráneas en el emplazamiento de la instalación, teniendo en cuenta lo siguiente:

- las cantidades de cada sustancia peligrosa o grupo de sustancias peligrosas semejantes de que se trate;
- las propiedades fisicoquímicas de cada sustancia peligrosa, por ejemplo su composición, estado físico (sólido, líquido o gaseoso), solubilidad, toxicidad, movilidad, persistencia, etc.
- cómo y dónde se almacenan, utilizan y transportan las sustancias peligrosas en la instalación;
- si existe el riesgo de que se generen emisiones;
- las medidas adoptadas para garantizar que la contaminación del suelo y las aguas subterráneas sea imposible en la práctica.

A continuación hay que determinar las fuentes potenciales que puedan haber provocado la presencia en el suelo de las sustancias peligrosas identificadas, considerando los datos y la información disponibles sobre:

- El uso actual del emplazamiento y las emisiones de sustancias peligrosas que hayan tenido lugar y que puedan plantear un riesgo de contaminación. Deben tenerse en cuenta, en particular, los accidentes o incidentes, los derrames o goteos durante las actividades corrientes, los cambios en las prácticas operativas, la superficie del emplazamiento (por ejemplo, pavimento o instalaciones de almacenamiento) y las sustancias peligrosas utilizadas.
- Los usos anteriores del emplazamiento que puedan haber generado emisiones de sustancias peligrosas, independientemente de que tales sustancias sean o no las mismas que se utilizan, producen o emiten en la instalación existente.

### 3.1.2. Estudio del medio físico

También hay que analizar el entorno ambiental del emplazamiento, en particular:

- Topografía.
- Geología.
- Hidrogeología, especialmente si hay aguas subterráneas y cuál es la dirección de su flujo.
- Hidrología: masas de aguas superficiales presentes en el entorno.
- Aspectos ambientales (por ejemplo, hábitats y especies particulares, zonas protegidas, etc.).
- Usos del suelos actuales y previstos para un futuro (reales y normativos), tanto en el emplazamiento como en su entorno.
- Calidad y usos actuales y previstos en el futuro de las aguas (superficiales y subterráneas).

## 3.2. Inspección del emplazamiento

La inspección del emplazamiento en estudio constituye (salvo casos excepcionales) una tarea ineludible de la caracterización. Entre los objetivos de la misma cabe citar la confirmación y/o matización de la información previamente recopilada, así como la obtención de datos adicionales sobre aspectos específicos, que sólo la visita de campo puede proporcionar.

La optimización de los resultados de una primera inspección de un emplazamiento aconseja diseñar antes en gabinete un programa para la realización de la misma. En dicho programa se deben contemplar básicamente los siguientes aspectos:

- Datos sobre los que centrar la búsqueda de información, de acuerdo con los objetivos del estudio y los resultados obtenidos en trabajos previos.
- Medios humanos y materiales precisos.
- Medidas de seguridad y equipos de protección personal que pueden ser necesarios durante la inspección.
- Solicitud de permisos de acceso al emplazamiento.

Siempre que las condiciones lo permitan, la inspección in situ debe ser efectuada por un equipo multidisciplinar familiarizado con este tipo de trabajos y con las condiciones locales del lugar. En lo posible la inspección se realizará a pie y, en todo caso, se dispondrá de documentación gráfica de soporte (planos, mapas, fotografías aéreas) a fin de localizar sobre ella los datos significativos. La realización de un reportaje fotográfico adicional resulta siempre del máximo interés.

Los aspectos en los que habitualmente se centra la inspección de un emplazamiento son los siguientes:

- Localización de cada sustancia peligrosa en el emplazamiento, es decir, el lugar donde se produce su entrega, almacenamiento, utilización, traslado en el emplazamiento, emisión, etc.
- Presencia e integridad de mecanismos de contención.
- Tipo de superficie del terreno (hormigón, sin pavimento, etc.) en las proximidades de cada punto de emisión.
- Identificación de indicios de emisiones al suelo ya producidas, tales como, alteraciones organolépticas del suelo (manchas, olor), aguas (irrisaciones) y vegetación.
- Cambios en la situación de las instalaciones (límites, edificios, accesos, estructuras superficiales y subterráneas) respecto a la información histórica previamente obtenida.
- Indicios de presencia de rellenos artificiales.
- Existencia de grietas o daños en las estructuras y en la superficie del emplazamiento, prestando especial atención a las proximidades de focos potenciales de emisión.
- Signos de ataque químico en superficies de hormigón.
- Identificación de las vías de drenaje, corredores de servicio y otros conductos potenciales para la migración de contaminantes y ubicación de los aliviaderos.



- Estado de los conductos de drenaje de proceso; si puede hacerse de forma segura, deben inspeccionarse los pozos de registro, los sumideros y los drenes colectores.

Si bien la primera inspección de un emplazamiento no suele ir encaminada a la toma de muestras del medio, en algunos casos se puede aprovechar para muestrear de forma limitada medios fácilmente accesibles, así como para medir ciertos parámetros in situ mediante equipos portátiles.

En cualquier caso, la inspección propiamente dicha debe complementarse con la obtención de información en fuentes de difícil acceso desde el gabinete (autoridades e instituciones locales, residentes de los alrededores del emplazamiento, operarios del mismo, transportistas de residuos, etc.).

### 3.3. Elaboración de un primer modelo conceptual del emplazamiento

Toda la información obtenida en la inspección de campo, unida a la disponible recopilada previamente, será analizada con vistas a elaborar un modelo conceptual inicial del emplazamiento, en el que se formulan las primeras hipótesis acerca de la problemática del mismo, incidiendo en las causas y focos de contaminación, los contaminantes significativos, los compartimentos medioambientales potencialmente afectados, los mecanismos de migración y/o transformación de los contaminantes y los receptores que pueden estar razonablemente expuestos a ellos a través de una o más vías. Es importante también saber si propiedades colindantes podrían ser fuente de los mismos contaminantes o de contaminantes similares-

Las conclusiones de este análisis deben quedar reflejadas en un informe en el que, además, se apunten las líneas de investigación complementaria que, en caso necesario, habrían de abordarse en trabajos posteriores. Se deberán tener presentes las incertidumbres asociadas a la información obtenida.

### 3.4. Investigación de campo y laboratorio

En la mayor parte de los estudios de caracterización de espacios contaminados el grado de conocimiento que proporcionan los trabajos anteriormente descritos no es suficiente para elaborar un diagnóstico de la situación. Las particularidades de cada estudio concreto servirán de base para evaluar la necesidad de acometer una investigación adicional de un emplazamiento apoyada en trabajos de campo más o menos intensivos. En caso necesario, se evaluará previamente el alcance y contenido de dichos trabajos.

A este respecto es preciso recordar que esta fase de la caracterización es la que habitualmente conlleva una mayor dedicación de recursos humanos y materiales, por lo que la optimización de los mismos requiere una cuidadosa planificación de los trabajos.

En lo que se refiere a la estrategia a adoptar para los trabajos de campo, la experiencia demuestra que la ejecución de las investigaciones por etapas sucesivas constituye una buena práctica de cara a obtener los mejores resultados al menor coste posible.

Siempre que otros condicionantes no lo impidan, se recomienda definir una primera campaña de trabajos de campo tendente a obtener datos lo más detallados posible acerca de las características geológicas e hidrogeológicas del emplazamiento, así como una primera aproximación al estado de contaminación del mismo (tipo, extensión y medios afectados) en base a un muestreo y analítica en laboratorio relativamente reducidos.

A la vista de los resultados de esta campaña, se decidirá la necesidad de ejecutar o no otra posterior y, en caso afirmativo, los objetivos y contenidos de la misma, pudiendo repetirse este proceso tantas veces cuantas se estime preciso.

El diseño previo en gabinete de cada etapa de trabajo de campo debe realizarse a la vista de los objetivos concretos que se pretenden alcanzar. En todo caso, se recomienda que, en lo posible, se planifique en gabinete la ubicación de calicatas, perforaciones, sondeos, piezómetros a instalar, puntos de muestreo y tipos de muestras y, en general, cualquier trabajo que sea localizable en el espacio. Ello no debe entrar en conflicto con la necesaria flexibilidad y capacidad de improvisación que han de poseer los integrantes del equipo de campo a fin de poder afrontar las situaciones imprevistas que en este tipo de trabajos aparecen con frecuencia.

La preparación de los trabajos en gabinete se complementará con la definición de los medios humanos y materiales necesarios para abordar las investigaciones, incluyendo las medidas de seguridad y equipos de protección personal oportunos. Así mismo se deben adelantar las gestiones precisas para garantizar el acceso al emplazamiento de las personas y equipos involucrados en los trabajos.

Las investigaciones de campo suelen ir dirigidas a obtener datos acerca de los siguientes aspectos:

- Caracterización geológica e hidrogeológica detallada del emplazamiento.
- Carácter y extensión de la contaminación mediante la toma de muestras y posterior análisis en laboratorio.

En los siguientes epígrafes se exponen algunas consideraciones genéricas acerca del modo de acometer estas investigaciones, citándose las técnicas disponibles, buena parte de las cuales han sido heredadas de otros campos y adaptadas a las especificidades de la investigación de espacios contaminados. Una información más detallada sobre las características y posibilidades de aplicación de las técnicas mencionadas puede encontrarse en la abundante bibliografía disponible.

### 3.4.1. Caracterización geológica e hidrogeológica

La necesidad de conocer en detalle los mecanismos que rigen la dispersión de los contaminantes en un emplazamiento determinado requiere a menudo complementar la información disponible a priori con investigaciones in situ sobre las características geológicas e hidrogeológicas del mismo. Tales investigaciones pueden ser específicas para este aspecto o aprovecharse también para otros fines (por ejemplo, la toma de muestras para análisis químicos), lo cual debe preverse de antemano en la medida que ello condiciona los métodos y técnicas de investigación aplicables.

Entre las técnicas habitualmente utilizadas para este tipo de caracterización cabe citar las siguientes:

#### 3.4.1.1. Métodos de prospección geofísica

Los métodos de prospección geofísica (reflexión/refracción sísmica, resistividad eléctrica, métodos electromagnéticos, radar, magnetometría) son útiles para determinar la estratificación del subsuelo, la presencia de aguas subterráneas, etc., residiendo su principal interés en que pueden proporcionar información sobre amplias áreas a un coste comparativamente bajo. Asimismo pueden ser interesantes para acotar la situación de residuos enterrados. La tabla 1 resume las principales posibilidades de aplicación de los métodos de prospección geofísica en los estudios de espacios contaminados.

#### 3.4.1.2. Excavaciones (zanjas o calicatas):

La apertura de zanjas o calicatas con retroexcavadora (ver Figura 2) es una técnica relativamente barata, si bien posee claras limitaciones en cuanto a la superficie a la que se pueden extender y a la profundidad que se puede alcanzar. Su ejecución suele aprovecharse para la toma de muestras de residuos y suelos para su caracterización geotécnica y/o química.



Figura 2.- Cata con retroexcavadora

#### 3.4.1.3. *Perforaciones y sondeos*

La ejecución de perforaciones y sondeos se aprovecha normalmente para la determinación del perfil litológico (ver figura 3) y para la toma de muestras (alteradas o inalteradas) de los materiales atravesados, para su posterior caracterización en laboratorio. Así mismo, es necesaria para la instalación de piezómetros y pozos de control de las aguas subterráneas.





**Figura 3.- Testigo litológico obtenido mediante sondeo mecánico a rotación**

Fuente: Protocolo de actuaciones de descontaminación de las aguas subterráneas en estaciones de servicio (Agencia Catalana del Agua)

Existen diversas técnicas que, en todo caso, proporcionan información de carácter puntual, pudiendo alcanzarse con algunas de ellas grandes profundidades. Una clasificación básica distingue los siguientes tipos de perforación:

- Con medios manuales, tales como las cucharas Edelman y riverside, barrena de hélice, etc. (ver Figura 4),
- Con medios mecánicos ligeros, consistentes en una barrena a percusión con martillo en cabeza (ver Figura 5)
- Con equipo mecánico pesado, basado en barrenas helicoidales, baterías de rotación, percusión o rotopercusión (ver Figura 6). Se puede considerar como un método caro, si bien en ciertos casos resulta ineludible.

Cada una de ellas posee un campo de aplicación idóneo de acuerdo con sus características y limitaciones.

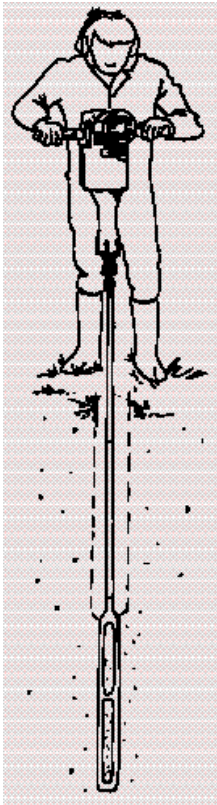
**Tabla 1.- Métodos de prospección geofísica**

MÉTODO	APLICACIÓN	VENTAJAS	INCONVENIENTES
<b>Reflexión y/o refracción sísmica</b>  Determina cambios en la litología del subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de recursos hídricos subterráneos</li> <li>- Perfiles cleotécnicos</li> <li>- Perfiles estratigráficos del subsuelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil accesibilidad</li> <li>- Gran capacidad (profundidad) de penetración</li> <li>- Cubre áreas de forma rápida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja resolución en sustratos muy estratificados</li> <li>- Sensible al ruido en zonas urbanas</li> <li>- Dificultades de penetración en ambientes fríos</li> <li>- Aplicación limitada en ambientes húmedos</li> </ul>
<b>Resistividad eléctrica</b>  Determina cambios de resistividad debidos a la litología, presencia de agua subterránea y cambios de su calidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidad del nivel freático</li> <li>- Perfiles estratigráficos del subsuelo</li> <li>- Evaluación de recursos hídricos subterráneos</li> <li>- Estudio de acuíferos</li> <li>- Estudio de vertederos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cubre áreas de forma rápida</li> <li>- Gran capacidad de penetración (150-300 m)</li> <li>- Movilidad alta</li> <li>- Resultados aproximados en campo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible a interferencias eléctricas naturales y artificiales</li> <li>- Aplicación limitada en ambientes húmedos y zonas urbanas</li> <li>- Dificultad de reflejar la heterogeneidad lateral</li> </ul>
<b>Prospección electromagnética</b>  Determina cambios de conductividad debidos a la litología y calidad de las aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perfiles estratigráficos del subsuelo</li> <li>- Evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas</li> <li>- Estudio de vertederos</li> <li>- Evaluación de recursos hídricos subterráneos</li> <li>- Detección de instalaciones enterradas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran movilidad</li> <li>- Rápida resolución e interpretación de resultados</li> <li>- Fácil accesibilidad</li> <li>- Efectividad en el análisis de resistividades altas</li> <li>- Equipos fácilmente accesibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados menos refinados que la resistividad</li> <li>- Inadecuada en zonas con instalaciones eléctricas enterradas</li> <li>- Menor resolución vertical que otros métodos (hasta unos 30 m.)</li> <li>- Aplicación limitada en ambientes húmedos</li> </ul>
<b>Radar penetrante</b>  Proporciona perfiles "visuales" continuos de los niveles superiores del subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detección de objetos enterrados</li> <li>- Delineación de la estructura y situación de sustratos rocosos</li> <li>- Detección de formaciones cársticas</li> <li>- Evaluación de la integridad física de estructuras artificiales de tierra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede cubrir grandes áreas</li> <li>- Alta resolución vertical en terrenos adecuados (arenosos y no saturados)</li> <li>- Representación "visual" de resultados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitada profundidad de penetración (15-25 m)</li> <li>- Accesibilidad limitada por el tamaño de los equipos</li> <li>- Discutible interpretación de resultados en algunos casos</li> <li>- Aplicación limitada en ambientes húmedos</li> </ul>
<b>Magnetometría</b>  Detecta la presencia de objetos metálicos féreos enterrados	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Localización de objetos féreos enterrados</li> <li>- Detección de los límites de vertederos que contengan objetos féreos</li> <li>- Localización de estratos rocosos con minerales féreos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran movilidad</li> <li>- Posible interpretación de resultados en campo</li> <li>- Puede cubrir áreas de forma rápida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La detección depende del tamaño y contenido en hierro del objeto enterrado</li> <li>- Dificil resolución de resultados en zonas urbanas</li> <li>- Aplicación limitada en ambientes húmedos</li> <li>- Dificil interpretación de resultados en zonas con corrientes magnéticas naturales</li> <li>- Profundidad de penetración limitada a unos 20 m.</li> </ul>





Figura 4.- Perforación manual



**Figura 5.- Perforación semimecánica**  
Fuente: Catálogo de Ejkelkamp



**Figura 6.- Perforación mecánica**



#### 3.4.1.4. *Instalación de pozos de control*

Los pozos de control se utilizan para medir los niveles freáticos y tomar muestras representativas de las aguas subterráneas existentes en puntos seleccionados del emplazamiento y su entorno. Las lecturas de niveles, efectuadas durante un periodo suficientemente dilatado, constituyen valiosa información, para conocer el comportamiento hidrogeológico del sustrato.

El diseño de los pozos de control debe ser acorde con los materiales encontrados en el perfil del terreno. Un diseño típico se muestra en la Figura 7. Las fases constructivas de un pozo de control son las siguientes:

- Perforación, comúnmente mediante sondeo mecánico de un diámetro de alrededor de 130 mm.
- Entubado con tramos de tubería filtro (ranurada) y ciega (con sus tapones de fondo y superficie y sus centradores), comúnmente de PVC y 50 mm de diámetro
- Equipamiento, con instalación del filtro de grava o arena silíceas y sellado de la parte superior con bentonita.
- Colocación de arqueta y cementación de la misma.
- Purgado o limpieza tras su ejecución, que consiste en la extracción de agua, comúnmente mediante bombas, hasta que se aprecie la ausencia de finos en el agua y la estabilización de parámetros como pH y conductividad.

En las Figuras 8, 9 y 10, se muestran detalles de los elementos de los pozos de control.

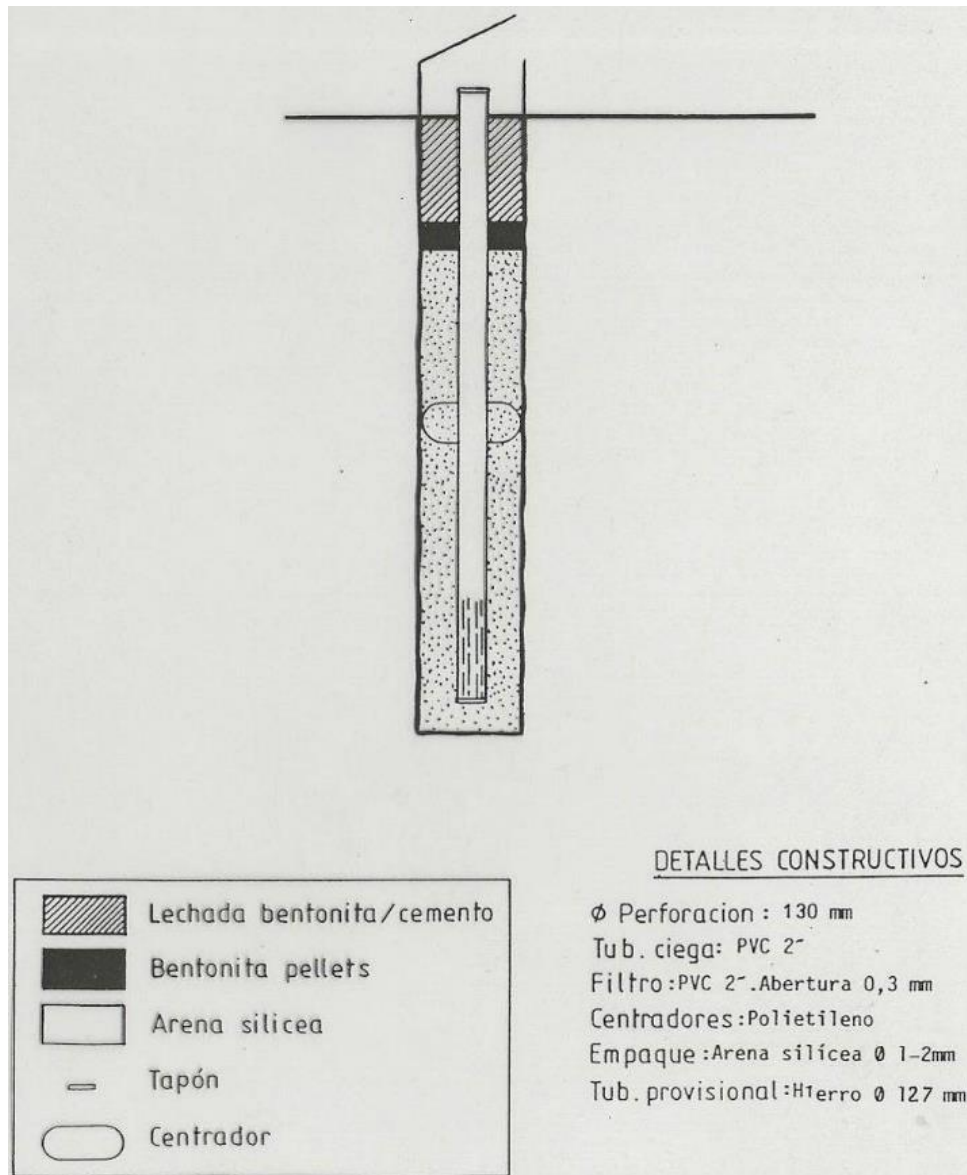
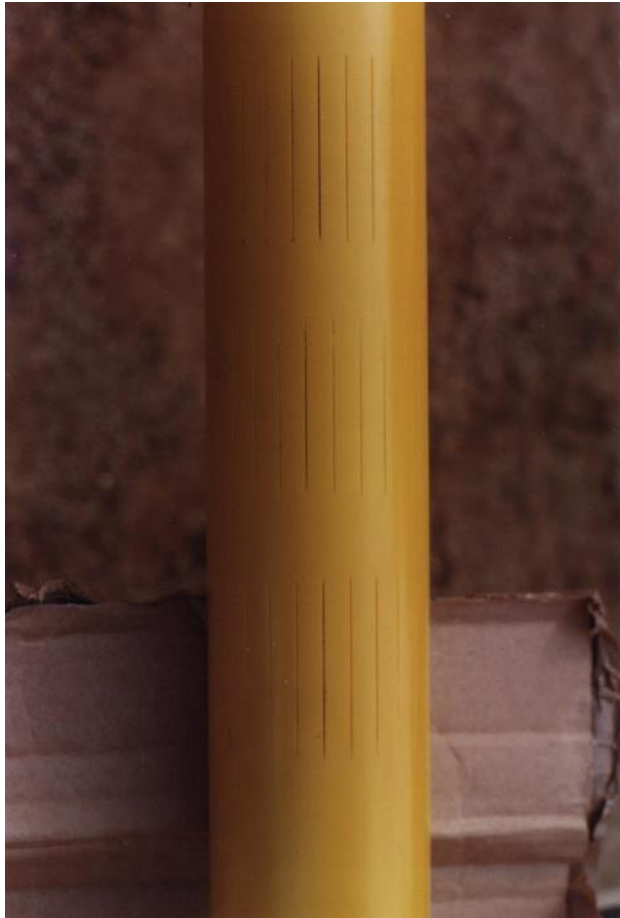


Figura 7.- Pozo de control



**Figura 8.- Tubo piezométrico ranurado**



**Figura 9.- Instalando el tubo piezométrico**



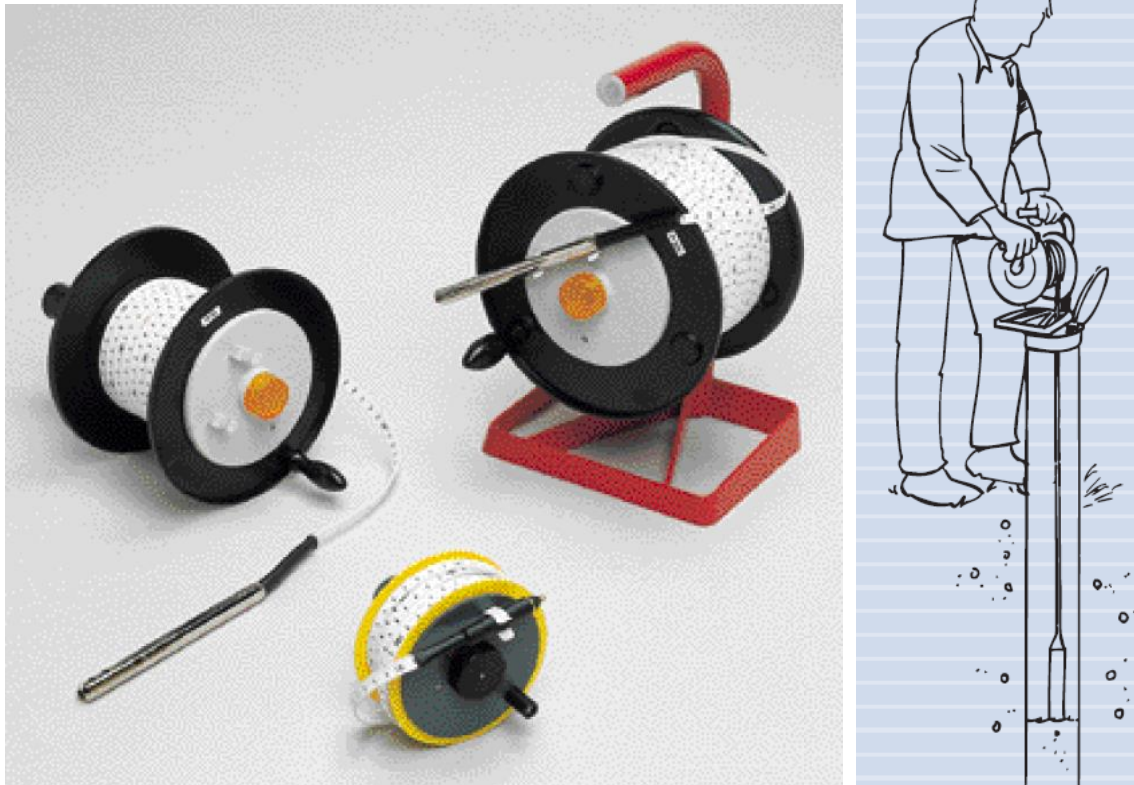
**Figura 10.- Arqueta con tapa de un pozo de control**

Fuente: Protocolo de actuaciones de descontaminación de las aguas subterráneas en estaciones de servicio (Agencia Catalana del Agua)



En todo caso, su instalación ha de efectuarse siguiendo un conjunto de normas de buena práctica que abarcan tanto los propios métodos de construcción como los materiales constitutivos de los distintos elementos del pozo. Todo ello va encaminado a evitar indeseables interferencias sobre la calidad de las aguas y, consecuentemente, a garantizar la representatividad de las muestras que posteriormente se tomen.

La medida del nivel freático en los pozos de control se realiza manualmente, mediante el uso de unos sensores con señal sonora y luminosa, colocados en el extremo de una cinta métrica (ver figura 11).



**Figura 11.- Equipos para medición de nivel freático**

Fuente: Catálogo de Ejkelkamp

#### 3.4.1.5. *Determinación de los parámetros hidráulicos*

La caracterización hidrogeológica debe incluir la obtención de los parámetros característicos del acuífero de interés: gradiente hidráulico, permeabilidad, etc. Estos datos se consideran básicos para la comprensión del funcionamiento del sistema y determinantes a la hora de seleccionar las técnicas de descontaminación más adecuadas, en caso necesario.

Las técnicas habitualmente utilizadas en la evaluación de los parámetros hidráulicos subterráneos incluyen:

- Análisis granulométricos
- Ensayos de bombeo y recuperación in situ
- Ensayos de permeabilidad en laboratorio
- Uso de trazadores
- Determinación de los niveles piezométricos

### 3.4.2. Toma de muestras para evaluación de la contaminación

El muestreo de los medios potencialmente afectados para su posterior análisis constituye la principal herramienta para cuantificar el carácter y extensión de la contaminación, siendo este aspecto determinante a la hora de evaluar y diseñar cualquier actuación de recuperación. El alcance del muestreo puede variar ampliamente de un emplazamiento a otro y también en función de la fase y los objetivos del estudio en que se enmarca la caracterización. Genéricamente, el muestreo se puede extender a matrices sólidas (suelos, sedimentos, productos y residuos), líquidas (aguas superficiales y subterráneas, lixiviados, productos y residuos), gases (aire ambiente, aire intersticial de la zona no saturada del suelo) y elementos bióticos (fitoplancton, plantas acuáticas microscópicas, macrofitas y animales).

La obtención de muestras representativas del estado real de contaminación del emplazamiento es un requisito fundamental en este tipo de trabajos. La representatividad de las muestras se garantizará mediante (entre otras medidas) el uso de equipos de muestreo adecuados al medio y tipo de contaminante a estudiar, así como siguiendo procedimientos estandarizados y reconocidos. En todo caso, resulta importante contemplar sistemáticamente algunas reglas de buena práctica, entre las que cabe citar las siguientes:

- Utilizar elementos de muestreo constituidos por materiales que no puedan interferir significativamente con los tipos de contaminantes a analizar.
- Proceder a la limpieza de los elementos de muestreo con agua "libre de toda sospecha" entre la toma de dos muestras consecutivas.
- Organizar y ejecutar el muestreo de un medio desde la zona supuestamente menos contaminada a la más contaminada, a fin de minimizar los riesgos de aparición de contaminación cruzada.

La estrategia de muestreo debe ir siempre encaminada a optimizar la relación entre el volumen de información conseguido y el coste de su obtención, para lo cual es normalmente aconsejable dividir estos trabajos en etapas, de forma que se vaya acotando progresivamente tanto el carácter como el

ámbito espacial afectado por la contaminación. Una recomendación adicional ampliamente extendida (en particular, para muestras de matrices sólidas) es que sistemáticamente se proceda a tomar un mayor número de muestras de las que a priori se van a analizar en el laboratorio, con lo cual se gana en flexibilidad y se ahorran costes de repetición de muestreos. A este respecto, cada vez es más frecuente aplicar en campo técnicas de selección de muestras apoyadas en la medición aproximada de contaminantes individuales o familias de los mismos mediante equipos portátiles.

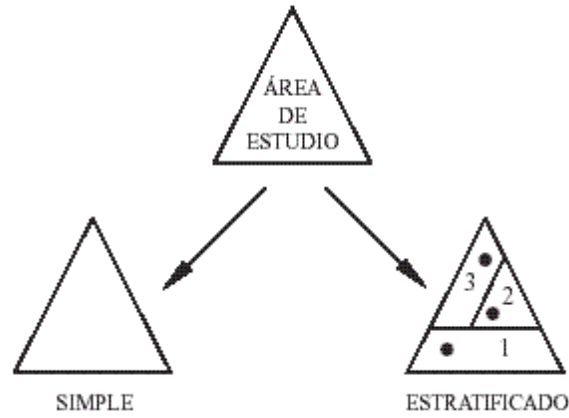
#### 3.4.2.1. *Toma de muestras de suelos*

En el diseño del muestreo de suelos se suele distinguir entre dos tipos de esquemas:

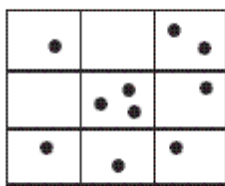
- Muestreo simple: aplicable a los emplazamientos en los que no existen razones naturales, históricas o de otro tipo para diferenciar áreas dentro de los mismos. Con este método se pretende obtener una representación exacta de todo el emplazamiento por medio de un muestreo uniforme en toda la superficie.
- Muestreo estratificado: se aplica habitualmente cuando la información previa existente aconseja diferenciar por algún motivo áreas dentro del emplazamiento. Así, por ejemplo, se puede focalizar el muestreo en zonas en las que se sospeche que hay contaminación.

Para decidir la localización concreta de los puntos de muestreo dentro del emplazamiento, se acude en ocasiones a modelos más o menos conceptuales: muestreo aleatorio, sistemático, sistemático aleatorio, por perfiles, etc. (ver Figura 12). La conveniencia de aplicar uno u otro depende básicamente de las características del emplazamiento en estudio y de los objetivos concretos que se hayan marcado para una determinada etapa de caracterización, debiéndose utilizar distintos esquemas a medida que se va acotando y cuantificando la problemática.

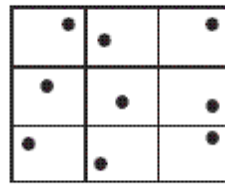
**DISTRIBUCIÓN DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO**



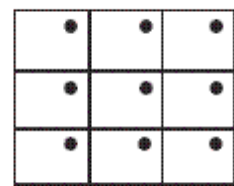
**DISTRIBUCIÓN DENTRO DE LAS DIFERENTES ÁREAS O SUBÁREAS**



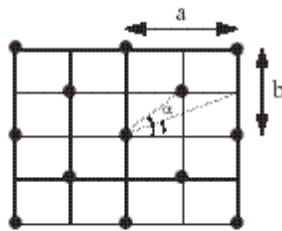
A. Al azar



B. Sistemático al azar



C. Regular o sistemático



D. Sistemático al tresbolillo o alternado

La red se modifica según a:b y  $\alpha$   
Por ejemplo:

<b>a:b</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Tipo de red</b>
a=b	45°	cuadrada
a=b	30°	hexagonal
a≠b	45°	rectangular



D. Sistemático en gradiente

**Figura 12.- Modelos de distribución espacial de puntos de muestreo**

Fuente: Guía metodológica de estudio histórico y diseño de muestreo (IHOBE, 1998)

La toma de muestras de suelo suele ir asociada a la ejecución de excavaciones (catas) o sondeos (manuales, semimecánicos o mecánicos), que a su vez pueden tener sólo esta finalidad u otras añadidas. La siguiente tabla muestra la aplicabilidad, ventajas y limitaciones de cada una de dichas técnicas.



**Tabla 2.- Comparación de los métodos de toma de muestras de suelo**

<b>Sistema</b>	<b>Aplicabilidad</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
Calicatas	Delimitación superficial y horizontal	Costes reducidos, rapidez de investigación	Profundidad (hasta 4-5 m), representatividad de muestras
Sondeos manuales	Suelos cohesivos y no cohesivos	Facilidad manejo, reducido peso, costes bajos	Profundidad (hasta 1 m). Suelos duros
Sondeos ligeros	Suelos cohesivos y no cohesivos	Costes medios, posibilidad de acceso a zonas difíciles para equipos mecánicos	Profundidad (hasta 8-10 m). Suelos rocosos o arenosos
Sondeos mecánicos	Todo tipo de suelos	Grandes profundidades, versatilidad, diámetros variables de perforación, instalación de pozos de control	Costes asociados, dificultad en lugares de difícil acceso, personal experimental

En consecuencia los equipos y sistemas de muestreo deben preverse a la vista del conjunto de condicionantes. Entre los equipos habituales de toma de muestras de suelos (ver figura 13) cabe mencionar la cuchara Edelman, la cuchara riverside, el tomamuestras de pistón, la cuchara neumática, la cuchara de pared gruesa, el tomamuestras de pared delgada (tubo Shelby) y la barrena rotativa con extracción de testigo continuo.

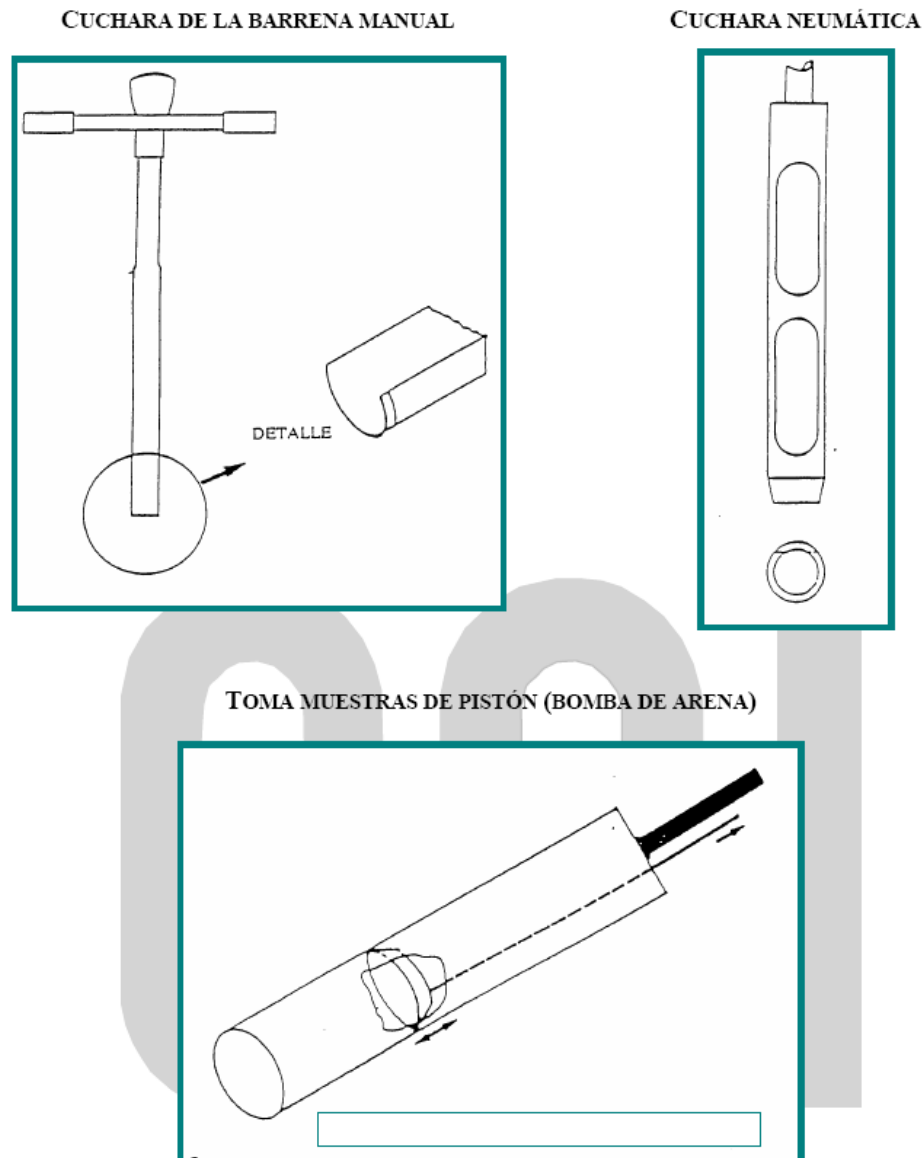


Figura 13.- Herramientas de muestreo de suelo

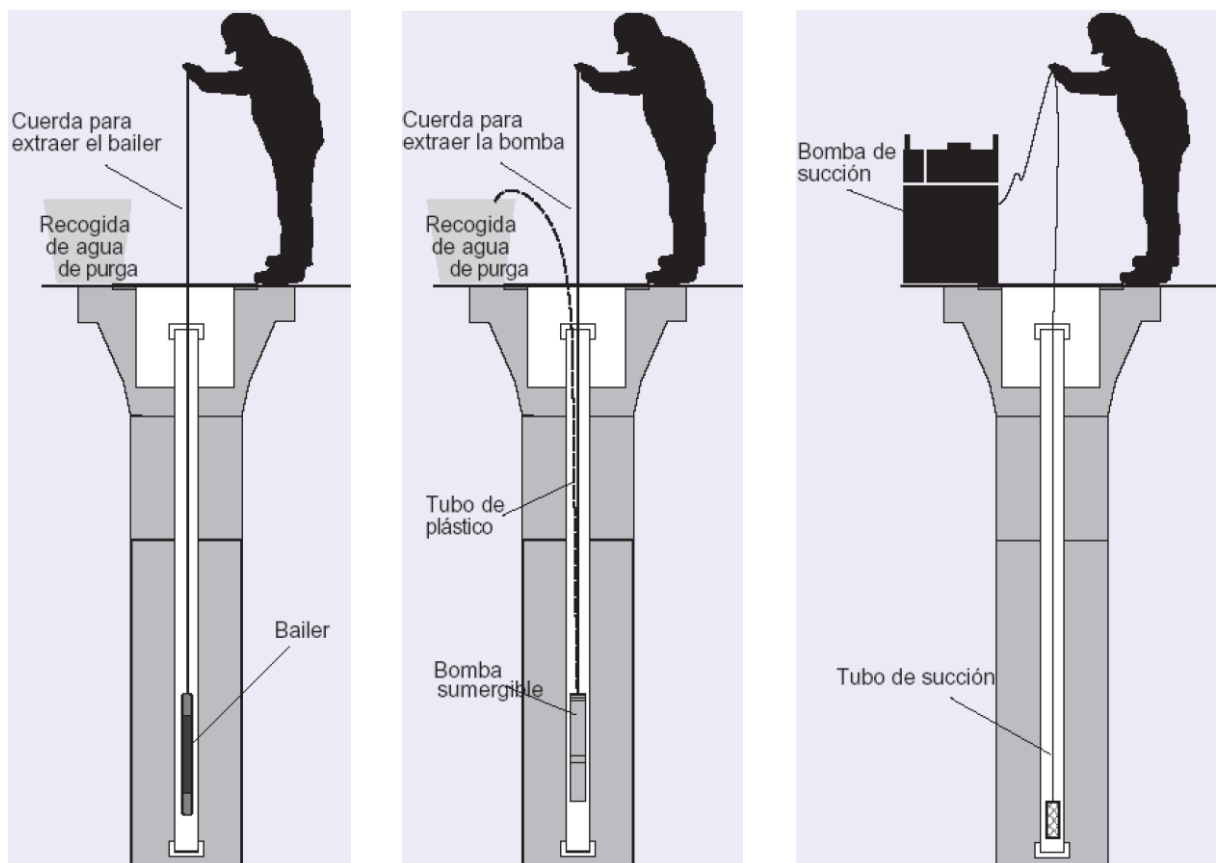
#### 3.4.2.2. Toma de muestras de agua

Las zonas propicias para la ubicación de pozos de control son:

- Aguas arriba del foco: para tener la referencia del movimiento y calidad del agua que fluye hacia la ubicación del foco contaminante.
- Zona de contacto: para tener controlada la zona de mezcla entre las aguas subterráneas naturales, procedentes de aguas arriba, y las aguas de lixiviación procedentes del propio foco contaminante.

- Aguas abajo del foco: para evaluar el movimiento y la calidad del agua que procede de la zona donde se ubica el foco contaminante.
- Localizaciones especiales: puede ser el caso de pozos de captación de agua potable o de manantiales que, aun estando «lejos» del foco, pudieran ser objeto de cierta sospecha, o requirieran ser muestreados simplemente por motivos de seguridad.

En cuanto al muestreo de agua, los equipos utilizados difieren sensiblemente si se trata de aguas superficiales o subterráneas. En el primer caso, los más habituales son las botellas tomamuestras y los muestreadores de tubo (coliwasa, bailer, tomamuestras de sobrenadantes). Para las aguas subterráneas (ver figuras 14 y 15) son aplicables diversos tipos de bombas: de aspiración, sumergible, peristálticas, etc., así como los muestreadores de tubo o bailers (ver Figura 16), debiendo seleccionarse el más adecuado en función de varios criterios: profundidad del nivel freático, capacidad de bombeo y caudal suministrado por el acuífero, dimensiones de la tubería piezométrica, presencia/ausencia de compuestos volátiles, etc.



**Figura 14. Equipos para purgado de pozos y toma de muestras**

Traducido de “Practice Guide for Investigation and Remediation of Contaminated Land” (Environmental Protection Department, Government of Hong Kong, 2011)

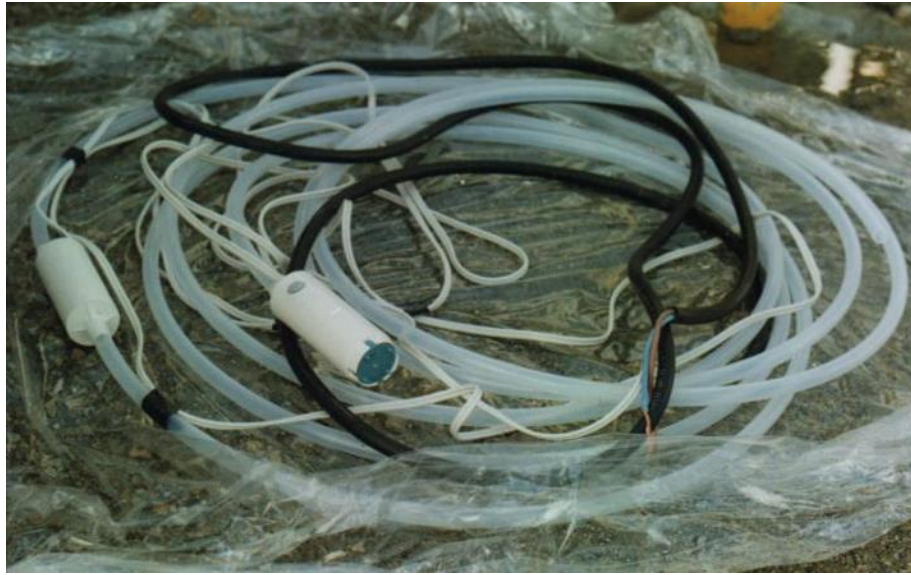


Figura 15.- Sistema de extracción de agua subterránea compuesto por dos bombas sumergibles en serie



Figura 16. Muestreador manual (bailer) con presencia de fase libre

Fuente: Protocolo de actuaciones de descontaminación de las aguas subterráneas en estaciones de servicio (Agència Catalana de L'Aigua)

En todo caso, es importante tener presente que la obtención de una muestra representativa de aguas subterráneas de un pozo de control exige llevar a cabo previamente una operación de limpieza del mismo, consistente en la extracción de determinados volúmenes de agua (ver figura 17) varias veces y con ciertos periodos de recuperación antes de obtener la muestra propiamente dicha. Esta medida es particularmente necesaria cuando se ha utilizado agua durante la perforación del sondeo ejecutado para instalar el pozo.



**Figura 17.- Limpieza de un pozo de control de aguas subterráneas con bomba de aspiración con motor de gasolina**

En el caso de vertederos incontrolados es muy interesante también tomar muestras de lixiviados, ya que su análisis da una idea muy representativa de los contaminantes presentes en la masa de residuos.

#### **3.4.2.3. Toma de muestras de gases**

El muestreo de gases (normalmente, aire ambiente o aire intersticial del suelo) suele realizarse en las etapas preliminares de la caracterización. En el caso del aire ambiente, el muestreo va orientado a detectar contaminantes que, inhalados (sobre todo en ambientes cerrados), pueden poner en peligro la salud. Por su parte, el muestreo del aire intersticial del suelo va normalmente dirigido a la detección de componentes volátiles o semivolátiles asociados a una fuente de contaminación (por ejemplo, gasolinas, disolventes, etc.) y constituye una técnica de diagnóstico indirecto y orientativo de la extensión de la contaminación en el emplazamiento.

Básicamente, existen dos tipos de técnicas de muestreo del aire intersticial del suelo: el muestreo activo, que se basa en la captación del gas en ampollas de carbón activo o tubos capilares mediante



aspiración, y el muestreo pasivo, en el que los gases del suelo se captan en una cápsula con carbón activo enterrada a escasa profundidad y recuperada tras varios días de exposición.

### 3.4.3. Pretratamiento, envasado y envío de las muestras

Otro tipo de precauciones adicionales a contemplar en todo muestreo son las referentes a los siguientes aspectos:

- Pretratamiento in situ de las muestras: en particular para las muestras de aguas es preciso proceder a determinadas operaciones durante su toma (filtrado, adición de reactivos, etc.) que varían en función de los parámetros a analizar posteriormente en laboratorio.
- Envasado (clases de botellas y frascos, materiales, cierres), rotulación e identificación de las muestras.
  - Conservación de las muestras hasta su llegada al laboratorio: es requisito general proceder a la refrigeración de las muestras de modo que se garantice que su temperatura no supera los 4°C antes de su entrada en el laboratorio de destino.
  - Empaquetado y transporte de las muestras al laboratorio: la forma de embalar las muestras debe asegurar la completa inmovilidad de los recipientes que las contienen durante el transporte, el cual debe efectuarse dentro de los plazos recomendados, que habitualmente son inferiores a 24 horas, desde que la muestra ha sido tomada.
- Preparación de blancos: siempre que sea posible, se recomienda incluir en cada lote de muestras algunas adicionales que sirvan como "blancos de campo", es decir, muestras supuestamente no afectadas por el problema en estudio.
- Cadena de custodia: es el proceso que garantiza el control y seguimiento de las muestras desde su toma hasta que el laboratorio procede a su aceptación.

Debe estar documentada mediante hojas de muestreo, albaranes de transporte y firmas de aceptación del laboratorio.

En definitiva, la realización de un muestreo correcto en un estudio de caracterización de espacios contaminados exige poner a punto una logística compleja que no puede quedar a merced de la improvisación. Parte de dicha logística está constituida por la cumplimentación de una serie de formularios de campo relativos a la ejecución de perforaciones y sondeos, la instalación de pozos de

control, la toma de muestras de los distintos medios, la codificación e identificación de las mismas y la solicitud de determinaciones analíticas al laboratorio.

### 3.4.4. Análisis *in situ*

La tabla 3 resume el campo de aplicación y características básicas de las técnicas de análisis *in situ* utilizadas más frecuentemente.

**Tabla 3.- Técnicas/equipos de determinación de contaminantes en campo**

TÉCNICA/EQUIPO	CAMPO DE APLICACIÓN	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
Espectroscopia de fluorescencia por rayos X (XRF)	Determinación cuantitativa de metales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de respuesta corto. Alto rendimiento (200-400 muestras/día)</li> <li>- No aplicable a Hg y Be</li> <li>- Posibles interferencias con la matriz</li> <li>- Detección a nivel de ppm. Recomendable calibración <i>in situ</i></li> </ul>
Detector de ionización por llama (FID)	Determinación semicuantitativa de COVs	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados inmediatos</li> <li>- Detección a nivel de ppm (depende de los compuestos)</li> <li>- Posibilidad de complementarlo con cromatografía de gases para identificar compuestos específicos</li> </ul>
Detector de fotoionización (PID)	Determinación semicuantitativa de contenido total de COVs	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados inmediatos</li> <li>- No detecta compuestos individuales</li> <li>- Posibles interferencias ligadas a la humedad ambiente y a fuentes eléctricas</li> <li>- No considera el metano</li> <li>- Detección a nivel de ppm</li> </ul>
Tests de inmunoensayo	Determinación cuantitativa de COVs, PAHs, hidrocarburos derivados del petróleo, PCBs, pesticidas, Hg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados rápidos. Lato rendimiento (30 ensayos/h)</li> <li>- Posibles interferencias</li> <li>- Pueden producir falsos productivos</li> <li>- Necesaria validación previa</li> </ul>
Tests colorimétricos	Determinación semicuantitativa de un amplio espectro de compuestos orgánicos e inorgánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados rápidos</li> <li>- Posibles interferencias</li> <li>- Niveles de detección altos para algunos compuestos</li> </ul>

### 3.4.5. Análisis en laboratorio

El proceso habitual en el laboratorio se inicia con la recepción de las muestras, tras la cual debe procederse a ejecutar los análisis a la mayor brevedad posible.

La estrategia analítica está habitualmente condicionada por factores técnicos y económicos. Cada proyecto y campaña de caracterización requieren distintas estrategias, por lo que resulta clave la toma conjunta de decisiones entre la dirección del proyecto y el laboratorio. Teniendo en cuenta los elevados costes que suelen conllevar los análisis de laboratorio, en muchos casos resulta interesante adoptar el "screening" como estrategia de ejecución de análisis, comenzando con una analítica amplia sobre un reducido número de muestras significativas para, a la vista de los resultados, intentar acotar progresivamente las determinaciones a efectuar en las siguientes tandas de muestras. El "screening" presenta particular interés en las primeras etapas de muestreo, cuando la información acerca de los contaminantes implicados es más incierta.

El laboratorio ha de estar provisto de las siguientes herramientas analíticas:

- **Compuestos orgánicos:**
  - Cromatografía de gases - espectrometría de masas
  - Cromatografía líquida de alta resolución
  
- **Metales y metaloides:**
  - Espectrofotometría de absorción atómica
  - Espectrofotometría de plasma (ICP)
  
- **Contaminantes inorgánicos no metálicos:**
  - Espectrofotometría de absorción molecular
  - Cromatografía iónica

En lo que se refiere a los métodos analíticos, se ha de cuidar la adopción de métodos normalizados y reconocidos como válidos: normas CEN o ISO o, a falta de ellas, normas de la Environmental Protection Agency de EE.UU.

### **3.4.6. Evaluación de resultados**

Los resultados obtenidos a lo largo de todos los trabajos de caracterización constituyen la base para realizar el diagnóstico de la problemática planteada por el emplazamiento en estudio. Los valores de concentración de contaminantes obtenidos en los análisis de las muestras de suelo se comparan con los NGR y los de las muestras de aguas subterráneas, con los valores de referencia establecidos en la



legislación holandesa<sup>1</sup>, dado que no existen todavía normas de calidad en la legislación española ni europea.

Como colofón de estos trabajos, se debe elaborar un documento en el que se exponga la interpretación final a que dan lugar las investigaciones efectuadas, indicando las incertidumbres aún remanentes y evaluando en consecuencia la validez de las conclusiones extraídas. Tal documento, que irá acompañado de una descripción completa de los trabajos efectuados y de sus resultados, tendrá entidad propia y servirá como clave de referencia para acometer cualquier tarea posterior.

### 3.4.7. Elaboración del informe de caracterización

Finalmente, hay que reunir toda la información que se ha obtenido, para elaborar un informe que describa el estado de contaminación del suelo y las aguas subterráneas por las sustancias peligrosas relevantes. El informe debe describir con claridad y exactitud los datos utilizados para determinar el estado del suelo y las aguas subterráneas, los métodos aplicados para el muestreo y análisis de los sustratos y el modo de evaluación de los resultados, tanto estadística como metodológicamente.

Cuando están presentes sustancias peligrosas contaminantes, en el informe deben indicarse los estratos de suelo o las masas de agua subterránea con los que están asociadas y describirse su concentración, naturaleza y alcance. Así mismo, se debe incluir la descripción del modelo conceptual del emplazamiento refinada adecuadamente con la información de detalle obtenida.

## 3.5. Control de calidad

El control de calidad es un elemento básico de todo el proceso de caracterización de un emplazamiento potencialmente contaminado y debe abarcar todas las tareas incluidas en un programa de caracterización, en especial, los trabajos de campo y la analítica de laboratorio.

A continuación se indican algunos elementos del control de calidad asociados a los principales trabajos de caracterización descritos anteriormente:

- Investigaciones de campo y toma de muestras: registros de datos, procedimientos normalizados de trabajo, controles de equipos y herramientas, formación del personal, cadena de custodia de muestras.

---

<sup>1</sup> Soil Remediation Circular. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2009)

- Informes: utilización de formatos normalizados, organización y mantenimiento de archivos informáticos y de papel.

## 4. Acreditación de entidades

El Real Decreto 9/2005 no exige que las investigaciones que den soporte a la declaración de suelos contaminados y las operaciones de recuperación sean llevadas a cabo por entidades reconocidas de alguna forma para ello. Ésta ha sido, sin embargo, una opción por la que han optado numerosos países o regiones europeas (Países Bajos y varios estados alemanes).

A través de una acreditación de este tipo se persiguen diferentes objetivos complementarios:

- Garantizar la calidad de los estudios y trabajos que se realizan en este ámbito
- Proporcionar a los administrados protección ante entidades sin suficiente capacitación o experiencia
- Facilitar el trabajo de la administración a través de la mejora de los datos en los que han de basar sus decisiones
- Preparar un sistema de control y mejora continua de las entidades acreditadas

En la actualidad, el País Vasco es la única comunidad autónoma que ha aprobado legislación específica relativa a la acreditación (*Decreto 199/2006, de 10 de octubre, por el que se establece el sistema de acreditación de entidades de investigación y recuperación de la calidad del suelo y se determina el contenido y alcance de las investigaciones de la calidad del suelo a realizar por dichas entidades*). La base de la acreditación se encuentra en la *Ley 1/2005, de 4 de febrero, de prevención y corrección de la contaminación del suelo del País Vasco*. De acuerdo a su artículo 36, “la acreditación será requisito imprescindible, para poder realizar las investigaciones de la calidad el suelo, el diseño y la ejecución de las medidas de recuperación que se presentan en esta ley”.

En el País Vasco se ha optado por un sistema que exige:

- Acreditación como entidad de ensayo según la norma UNE-EN ISO 17025, para el laboratorio que haga los análisis.
- Acreditación como organismo de inspección según la norma UNE-EN ISO/IEC 17020.
- Requerimientos adicionales relacionados, por ejemplo, con la composición del equipo mínimo de trabajo y la constitución de una póliza de seguros para cubrir las responsabilidades derivadas de su actuación, que son controlados desde el órgano ambiental de la Comunidad Autónoma.

En este momento se cifra en 40 el número de entidades acreditadas en el País Vasco.

Otras comunidades autónomas han tomado ya decisiones en este aspecto. Así, en Andalucía se requiere, por el momento, la acreditación en la norma UNE-EN ISO 17025, aunque existen previsiones de realizar desarrollos específicos en este marco. Por su parte, Galicia han preparado un decreto que incluye una disposición a este respecto.