

MASTER EN INGENIERÍA Y GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL

Módulo:
Contaminación de los Suelos y Aguas Subterráneas

MATERIA: CARACTERIZACIÓN

AUTOR: GABRIEL CONDE

Sumario

Introducción.....	1
Estrategia de caracterización	1
Desarrollo de un programa de caracterización	4
Recopilación y análisis de Información	4
Reconocimiento del emplazamiento.....	5
Investigación de campo	7
Caracterización geológica e hidrogeológica.....	8
Toma de muestras para evaluación de la contaminación	15
Análisis de laboratorio.....	22
Evaluación y documentación de resultados.....	23
Control de calidad.....	23
Valores de referencia para la evaluación de la contaminación del suelo	24

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 suelen constituir un fin en sí mismos, sino un medio para obtener información necesaria para el diagnóstico y la toma de decisiones.

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 aquélla 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 que punto y en que aspectos es preciso ampliar la investigación durante una fase posterior.

Este es el enfoque que recogen numerosas normas o recomendaciones elaboradas en varios países para orientar la ejecución de este tipo de trabajos. A título de ejemplo, el Gobierno Vasco, a través de IHOBE, viene editando desde 1994 varias "Guías metodológicas" y "Guías técnicas" para el estudio de espacios contaminados. El denominado "Manual Práctico para la Investigación de la Contaminación del Suelo" establece que el estudio de un emplazamiento potencialmente contaminado debe pasar, en general, por dos fases de investigación (ver Figura 1):

- La Investigación Exploratoria, dividida a su vez en dos etapas diferenciadas:
 - La primera, orientada a evaluar la posibilidad de existencia de contaminación en el emplazamiento, se compone de un estudio histórico, una visita al emplazamiento y un análisis del medio físico en que se encuentra localizado aquél.
 - La segunda, 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, de modo que se pueda acometer una evaluación de los riesgos actuales y futuros derivados del emplazamiento.

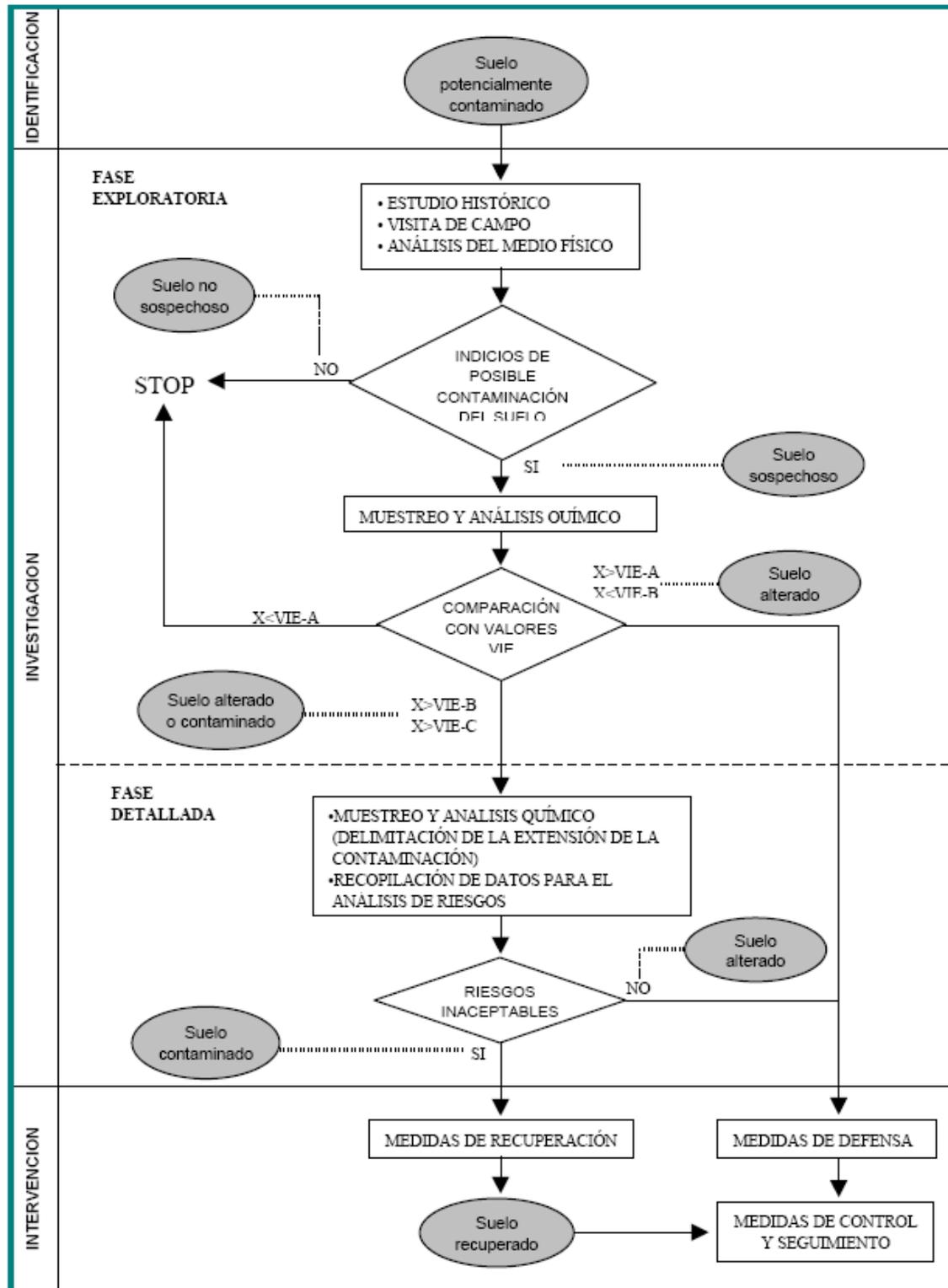
Para cada una de estas etapas, se establecen recomendaciones acerca de cómo efectuar los distintos trabajos, dependiendo además el enfoque de algunos de ellos de la información disponible acerca de las supuestas causas de la contaminación (origen conocido o desconocido, fuentes puntuales o dispersas, etc.).

Este enfoque de investigación por etapas, al igual que otros similares, incluye tres tipos de labores habituales en un programa concreto de caracterización de un emplazamiento. Tales labores son:

- Recopilación y análisis de información acerca del emplazamiento.
- Reconocimiento del emplazamiento.
- Investigación del emplazamiento a base de trabajos de campo.

Cada una de estas labores (especialmente la última) pueden ejecutarse en una o varias etapas, en función de las características particulares de cada caso.

FIGURA 1: ESQUEMA DE ETAPAS DE INVESTIGACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS CONTAMINADOS



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.

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.

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, escapes, 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.
- Características geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del emplazamiento y su entorno.
- Características edafológicas y geoquímicas del suelo.
- Hidrología de las aguas superficiales (en su caso).
- Topografía actual del emplazamiento.
- Características climáticas de la zona.
- Ecosistemas presentes en el emplazamiento y su entorno.
- Información demográfica, patrones de comportamiento de la población.
- Usos del suelo (reales y normativos) actuales y previstos para un futuro tanto en el emplazamiento como en su entorno.

- Calidad y usos actuales y previstos en el futuro de las aguas (superficiales y subterráneas).
- Accesibilidad al emplazamiento (infraestructura viaria y ferroviaria).
- Redes de servicios (abastecimiento de agua, saneamiento, distribución de energía eléctrica y gas, telefonía, etc.) presentes en el emplazamiento y su entorno próximo (aspecto éste de particular importancia en emplazamientos situados en zonas urbanas).
- Requerimientos ambientales y de salud pública que es preciso contemplar, tanto para definir los objetivos de una eventual actuación de recuperación como para adoptar medidas de seguridad y protección personal durante los trabajos de campo.
- Exigencias legales y administrativas de todo tipo que puedan condicionar el diseño y ejecución de las medidas de recuperación.

Como puede apreciarse, 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.

En segundo lugar, debe elaborarse 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 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.

Reconocimiento del emplazamiento

El reconocimiento del emplazamiento en estudio constituye (salvo casos excepcionales) una fase ineludible de la caracterización. Entre los objetivos del mismo 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 el reconocimiento.
- Solicitud de permisos de acceso al emplazamiento.

Siempre que las condiciones lo permitan, el reconocimiento in situ debe ser efectuado 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 el reconocimiento de un emplazamiento son los siguientes:

- Alteraciones organolépticas del suelo, aguas 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, fenómenos de sedimentación, movimientos de tierras, etc.
- Localización y estado de las redes de servicios (abastecimiento, saneamiento y depuración de aguas, distribución de energía eléctrica, telefonía, gas, etc.).
- Identificación de posibles interferencias operacionales durante los posteriores trabajos de investigación con las actividades desarrolladas en el emplazamiento.
- Disponibilidad de espacio y servicios básicos para ubicar las instalaciones necesarias para llevar a cabo posteriores investigaciones.

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

En cualquier caso, el reconocimiento propiamente dicho 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.).

Toda la información recopilada en esta fase, unida a la disponible previamente, ha de ser analizada con vistas a confirmar, matizar o desmentir las hipótesis efectuadas, modificando el modelo conceptual previo como resulte oportuno. Las conclusiones de este análisis deben quedar reflejadas en un documento en el que, además, se apunten las líneas de investigación complementaria que, en caso necesario, habrían de abordarse en trabajos posteriores.

Investigación de campo

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.

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:

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.

Tabla 1.- Métodos de prospección geofísica

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

Excavaciones (zanjas, trincheras, calicatas):

Son técnicas relativamente baratas, si bien poseen 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.

Perforaciones y sondeos:

La ejecución de perforaciones y sondeos se aprovecha normalmente para la toma de muestras (alteradas o inalteradas) de los materiales atravesados, para su posterior caracterización en laboratorio. Así mismo, son necesarias para la instalación de piezómetros y pozos de control de las aguas subterráneas. En términos generales se pueden considerar como métodos caros, si bien en ciertos casos son ineludibles.

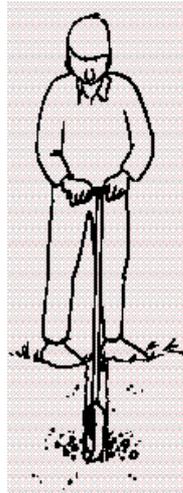
Existen diversas técnicas que, en todo caso, proporcionan información de carácter puntual, pudiendo alcanzarse con algunas de ellas grandes profundidades. Una clasificación básica distingue los siguientes tipos de perforación:

- con medios manuales, tales como las cucharas Edelman y riverside, barrena de hélice, etc. (ver Figura 2a y 4),
- con medios mecánicos ligeros, consistentes en una barrena a percusión con martillo en cabeza (ver Figura 2b)
- con equipo mecánico pesado, basado en barrenas helicoidales, baterías de rotación, percusión o rotopercusión (ver Figura 3).

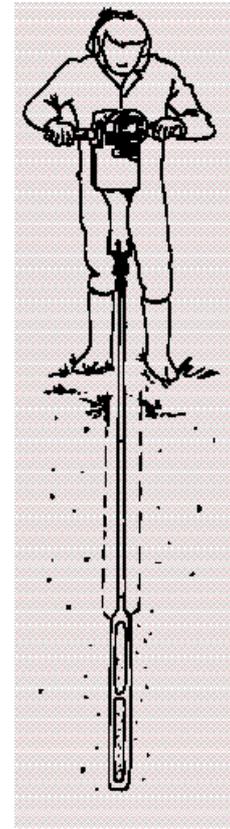
Cada una de ellas posee un campo de aplicación idóneo de acuerdo con sus características y limitaciones.



Figura 2a.- Perforación manual



2b.-Perforación semimecánica

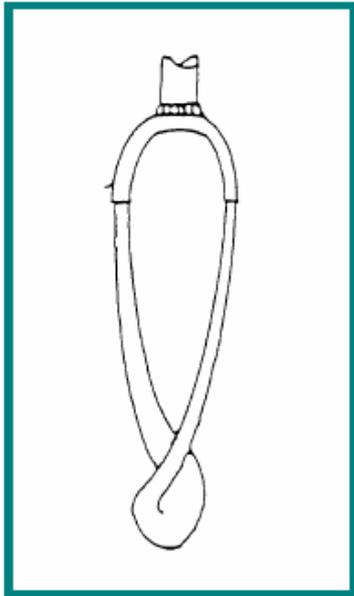


Fuente: Catálogo de Ejkelkamp

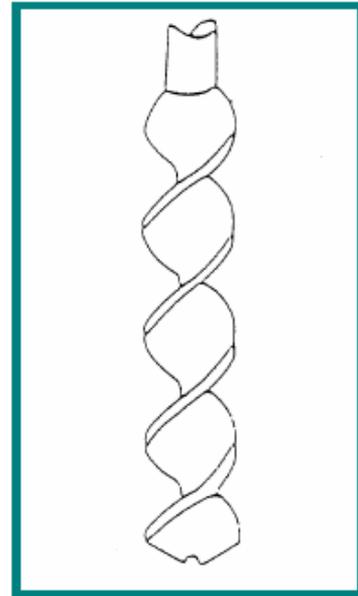


Figura 3.- Perforación mecánica

CUCHARA EDELMAN



BARRENA DE HÉLICE



SONDE DE PERCUSIÓN CON CUCHARA

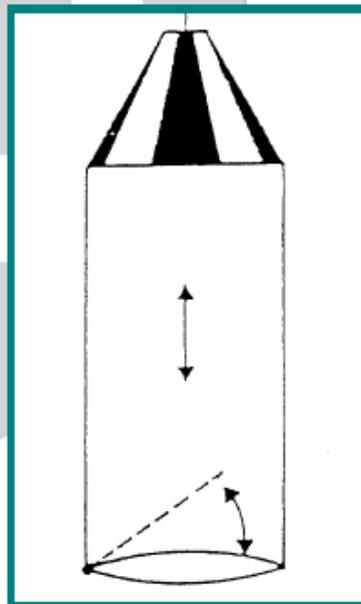


Figura 4.- Sistemas de perforación y toma de muestras

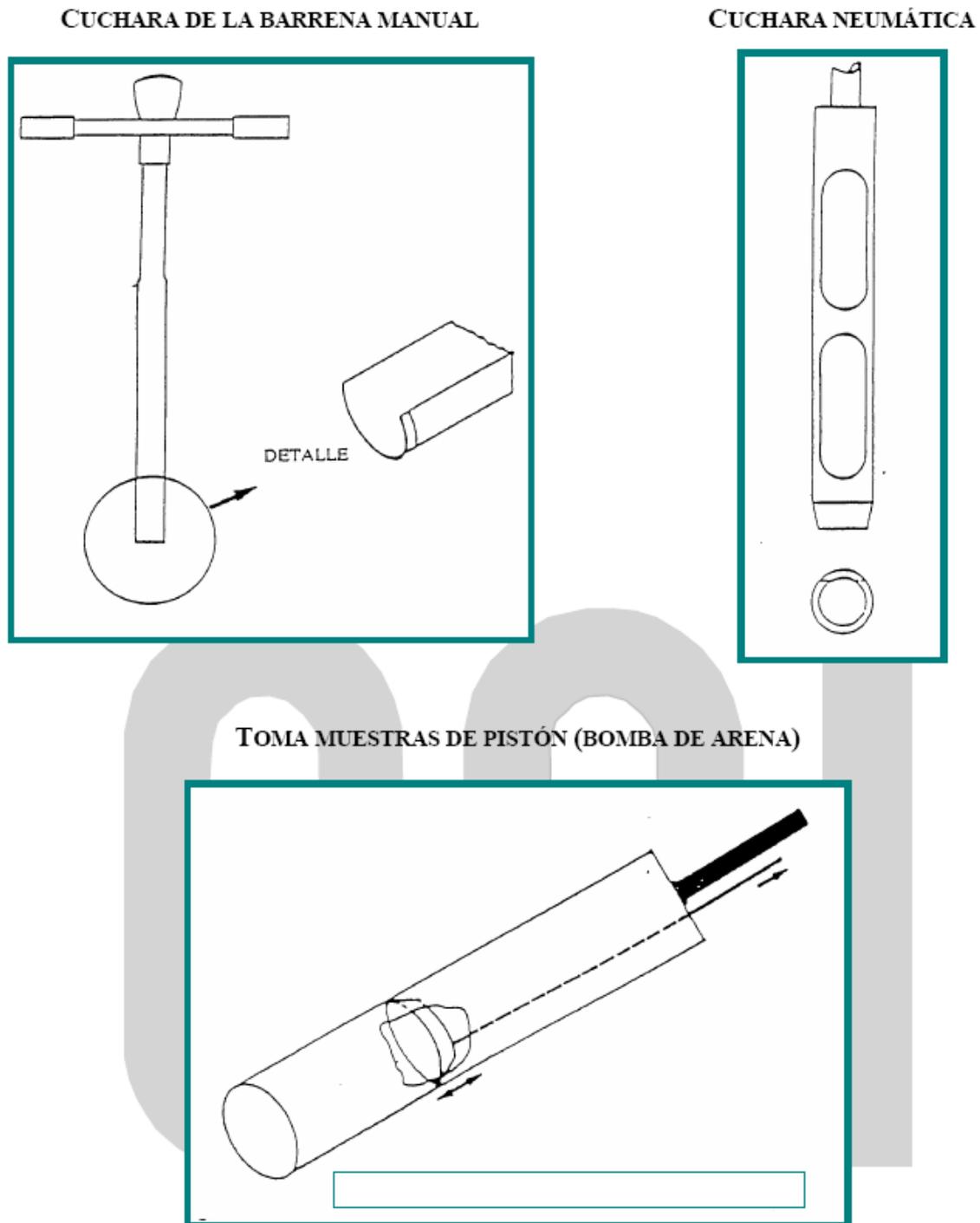


Figura 4 (continuación).- Sistemas de perforación y toma de muestras

Instalación de piezómetros y pozos de control:

Los primeros se utilizan para medir los niveles freáticos en puntos seleccionados, mientras que los segundos permiten además la toma de muestras representativas de las aguas subterráneas existentes en el emplazamiento. En uno u otro caso 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 (ver Figura 5). 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.

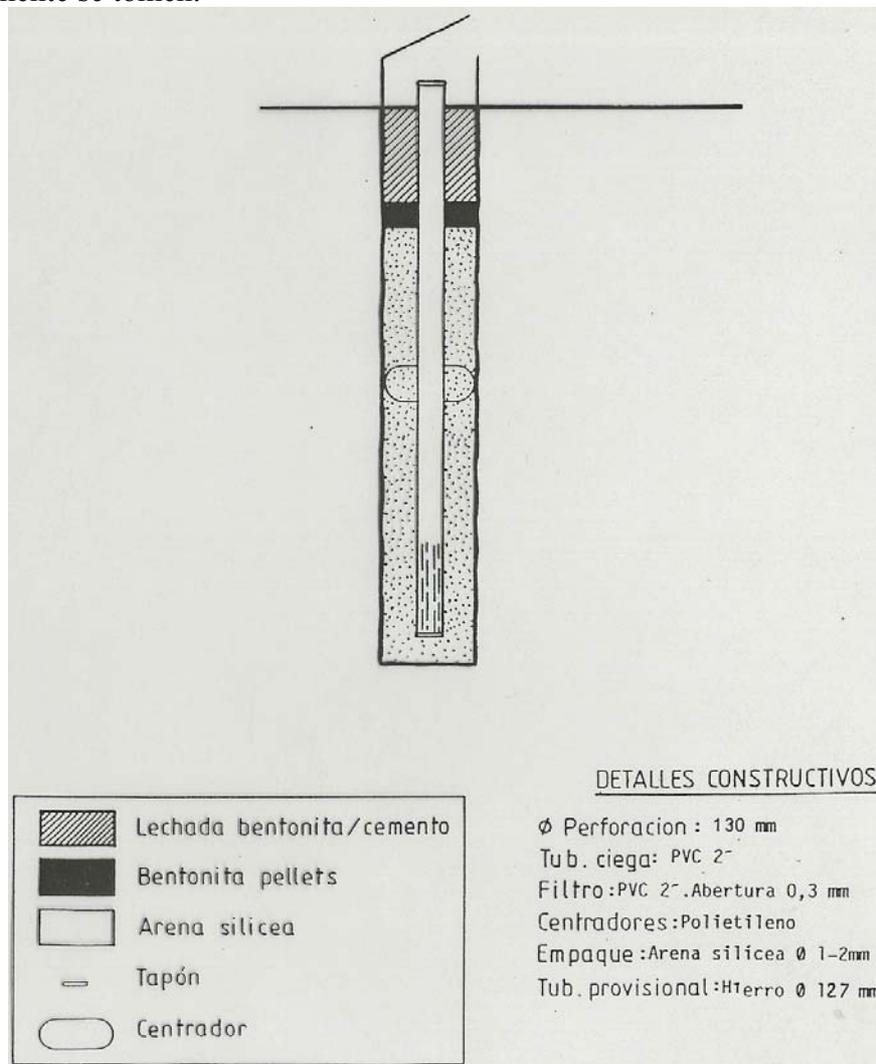


Figura 5.- Pozo de control

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 6).



Figura 6.- Equipos para medición de nivel freático
Fuente: Catálogo de Ejkelkamp

Pruebas de bombeo y ensayos de permeabilidad:

Son técnicas habitualmente utilizadas en la evaluación de los recursos hidráulicos subterráneos, que aportan información complementaria a la suministrada por los niveles piezométricos de cara a evaluar el comportamiento hidrogeológico del emplazamiento.

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. La tabla 2 resume el campo de aplicación y características básicas de los utilizados más frecuentemente.

Tabla 2.- 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	- Tiempo de respuesta corto. Alto rendimiento (200-400 muestras/día) - No aplicable a Hg y Be - Posibles interferencias con la matriz - Detección a nivel de ppm. Recomendable calibración in situ
Detector de ionización por llama (FID)	Determinación semicuantitativa de COVs	- Resultados inmediatos - Detección a nivel de ppm (depende de los compuestos) - Posibilidad de complementarlo con cromatografía de gases para identificar compuestos específicos
Detector de fotoionización (PID)	Determinación semicuantitativa de contenido total de COVs	- Resultados inmediatos - No detecta compuestos individuales - Posibles interferencias ligadas a la humedad ambiente y a fuentes eléctricas - No considera el metano - Detección a nivel de ppm
Tests de inmunoensayo	Determinación cuantitativa de COVs, PAHs, hidrocarburos derivados del petróleo, PCBs, pesticidas, Hg	- Resultados rápidos. Lato rendimiento (30 ensayos/h) - Posibles interferencias - Pueden producir falsos productivos - Necesaria validación previa
Tests colorimétricos	Determinación semicuantitativa de un amplio espectro de compuestos orgánicos e inorgánicos	- Resultados rápidos - Posibles interferencias - Niveles de detección altos para algunos compuestos

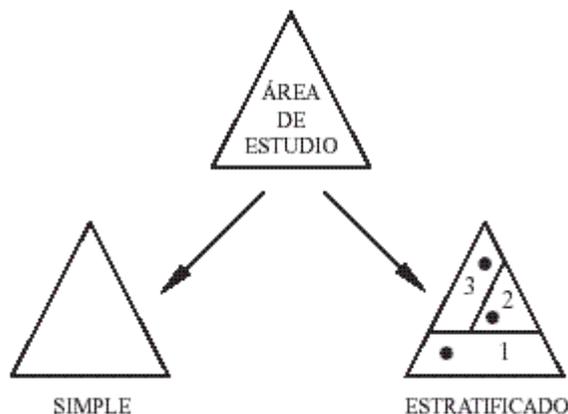
En el diseño del muestreo de suelos, se suele distinguir entre dos tipos de esquemas:

- 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.
- Muestreo estratificado: se aplica habitualmente cuando la información previa existente aconseja diferenciar por algún motivo áreas dentro del emplazamiento.

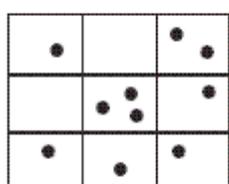
Para decidir la localización concreta de los puntos de muestreo dentro del emplazamiento se acude en ocasiones a modelos más o menos conceptuales: muestreo aleatorio, sistemático, sistemático aleatorio, por perfiles, etc. (ver Figura 7). La conveniencia de aplicar uno u otro depende básicamente de las 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.

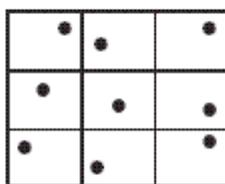
DISTRIBUCIÓN DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO



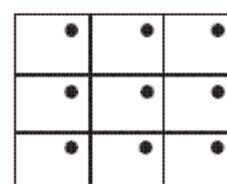
DISTRIBUCIÓN DENTRO DE LAS DIFERENTES ÁREAS O SUBÁREAS



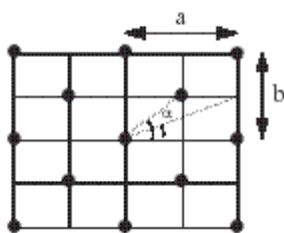
A. Al azar



B. Sistemático al azar



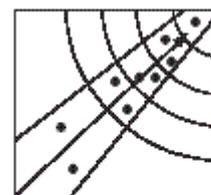
C. Regular o sistemático



D. Sistemático al tresbolillo o alternado

La red se modifica según a:b y α
Por ejemplo:

a:b	α	Tipo de red
a=b	45°	cuadrada
a=b	30°	hexagonal
a≠b	45°	rectangular



D. Sistemático en gradiente

Figura 7.- 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 suelos suele ir asociada a la ejecución de excavaciones, perforaciones y sondeos, que a su vez pueden tener sólo esta finalidad u otras añadidas. 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 4) 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.

En cuanto al muestreo de aguas, 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 son aplicables los muestreadores de tubo, así como diversos tipos de bombas: de aspiración, sumergible (ver figura 8), peristáltica (ver figura 9), válvula de pie, inyección de aire, etc., debiendo seleccionarse el modelo 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 8.- Sistema de extracción de aguas subterránea compuesto por dos bombas sumergibles con motor eléctrico en serie

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 9) 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.

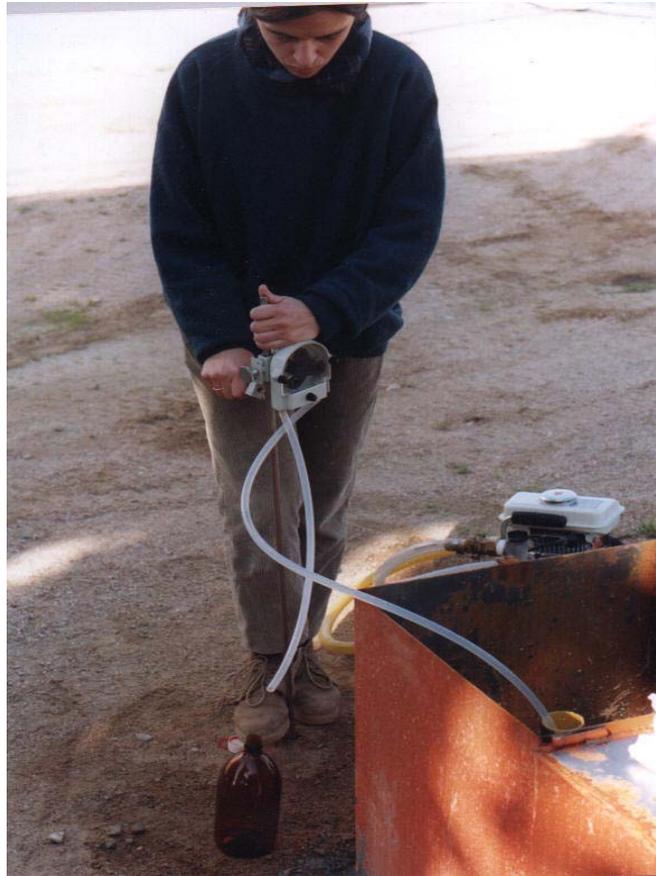


Figura 9.- Bomba peristáltica manual



Figura 10.- Limpieza de un pozo de control de aguas subterráneas con bomba de aspiración con motor de gasolina

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.

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.

Análisis de 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.

En lo que se refiere a los métodos analíticos, se ha de cuidar la adopción de métodos normalizados y reconocidos como válidos por las normativas de prestigio internacional.

Evaluación y documentación 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. Tal diagnóstico se apoyará en metodologías acordes con los objetivos del mismo y con las limitaciones impuestas por el alcance de las investigaciones y sus resultados. En este sentido, es frecuente utilizar modelos de simulación del comportamiento de los contaminantes implicados en los distintos medios afectados (suelos, aguas, aire), así como realizar evaluaciones cualitativas y/o cuantitativas de los riesgos que para la salud humana y los ecosistemas plantea el emplazamiento.

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.

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

Valores de referencia para la evaluación de la contaminación del suelo

Es fundamental disponer de un sistema que estandarice y acelere el proceso de evaluación de la contaminación y de toma de decisión sobre si se considera que el suelo está contaminado o no. Este sistema se ha de basar en la utilización de unos estándares o valores de referencia de concentración de contaminantes.

Para evaluar la contaminación de las aguas se pueden utilizar los valores límite de concentraciones de los contaminantes para los distintos usos, existentes en la legislación internacional. Sin embargo, la evaluación de la contaminación del suelo es más difícil, ya que el nivel al que aparecen riesgos es diferente para los distintos usos y afecciones (por ejemplo, recursos de agua y materiales de construcción), así como para los distintos seres vivos expuestos (hombres, animales y plantas). Incluso puede darse el caso de que las concentraciones naturales en suelos y aguas "limpias" sean muy altas para determinadas sustancias tóxicas (metales pesados).

Holanda tomó la iniciativa en el desarrollo y promulgación de guías para ayudar en tal decisión, publicando en 1983 una Guía de Limpieza del Suelo, con el fin de tratar de una manera uniforme el problema de contaminación de suelo y aguas subterráneas. En esta guía (revisada en 1994 y posteriormente en 2000) se definen unos niveles de referencia, que permiten la evaluación de las concentraciones de contaminantes en suelos y aguas subterráneas. Estos niveles son:

- Nivel objetivo a alcanzar en términos de política de saneamiento, que corresponde a la calidad necesaria para la total funcionalidad del suelo o las aguas, para el sostenimiento de la vida humana, animal y vegetal.
- Nivel de intervención, que corresponde a la contaminación que amenaza con impedir o impide seriamente la funcionalidad del suelo o las aguas. Por encima de este nivel, se considera que existe una contaminación que generalmente requiere alguna forma de saneamiento o medidas de control para reducir los riesgos.

Hasta hace pocos años, se ha utilizado generalmente esta guía holandesa para evaluar la calidad del suelo y el agua subterránea, por ser la más desarrollada y difundida de las existentes. Actualmente algunos países han establecido sus propios valores de referencia¹.

Hay que resaltar que los citados niveles de referencia no tienen una relación cuantificable con algún grado de riesgo, son sólo una ayuda para la toma de decisiones. Sin embargo,

¹ En España se han establecido niveles genéricos de referencia solamente para contaminantes orgánicos en suelos en el *REAL DECRETO 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados*.

los valores de intervención elegidos, representan el resultado de un proceso teórico de evaluación de riesgos.

Los valores de concentración de los principales contaminantes en agua subterránea y suelo para los citados niveles de referencia holandeses se presentan en las Tablas siguientes.

Table 1a: Target values and soil remediation intervention values and background concentrations soil/sediment and groundwater for metals. Values for soil/sediment have been expressed as the concentration in a standard soil (10% organic matter and 25% clay).

	EARTH/SEDIMENT (mg/kg dry matter)			GROUNDWATER (µg/l in solution)			
	national background concentration	target value	intervention value	target value shallow	national background concentration deep	target value deep	intervention value
	(BC)	(incl. BC)			(BC)	(incl. BC)	
I Metals							
antimony	3	3	15	-	0.09	0.15	20
arsenic	29	29	55	10	7	7.2	60
barium	160	160	625	50	200	200	625
cadmium	0.8	0.8	12	0.4	0.06	0.06	6
chromium	100	100	380	1	2.4	2.5	30
cobalt	9	9	240	20	0.6	0.7	100
copper	36	36	190	15	1.3	1.3	75
mercury	0.3	0.3	10	0.05	-	0.01	0.3
lead	85	85	530	15	1.6	1.7	75
molybdenum	0.5	3	200	5	0.7	3.6	300
nickel	35	35	210	15	2.1	2.1	75
zinc	140	140	720	65	24	24	800

Table 1b: Target values and intervention values for soil remediation soil/sediment and groundwater for inorganic compounds, aromatic compounds, PAH, chlorinated hydrocarbons, pesticides and other contaminants. Values for soil/sediment have been expressed as the concentration in a standard soil (10% organic matter and 25% clay).

	EARTH/SEDIMENT (mg/kg dry matter)		GROUNDWATER (µg/l in solution)	
	target value	intervention value	target value	intervention value
II Inorganic compounds				
cyanides-free	1	20	5	1500
cyanides-complex (pH<5) ¹	5	650	10	1500
cyanides-complex (pH ≥5)	5	50	10	1500
thiocyanates (sum)	1	20	-	1500
bromide (mg Br/l)	20	-	0.3 mg/l ²	-
chloride (mg Cl/l)	-	-	100 mg/l ²	-
fluoride (mg F/l)	500 ³	-	0.5 mg/l ²	-
III Aromatic compounds				
benzene	0.01	1	0.2	30
ethyl benzene	0.03	50	4	150
toluene	0.01	130	7	1000
xylenes	0.1	25	0.2	70
styrene (vinyl benzene)	0.3	100	6	300
phenol	0.05	40	0.2	2000
cresols (sum)	0.05	5	0.2	200
catechol(o-dihydroxybenzene)	0.05	20	0.2	1250
resorcinol(m-dihydroxybenzene)	0.05	10	0.2	600
hydroquinone(p-dihydroxybenzene)	0.05	10	0.2	800
IV Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)				
PAH (sum 10) ^{4,14}	1	40	-	-
naphthalene			0.01	70
anthracene			0.0007*	5
phenatrene			0.003*	5
fluoranthene			0.003	1
benzo(a)anthracene			0.0001*	0.5
chrysene			0.003*	0.2
benzo(a)pyrene			0.0005*	0.05
benzo(ghi)perylene			0.0003	0.05
benzo(k)fluoranthene			0.0004*	0.05
indeno(1,2,3-cd)pyrene			0.0004*	0.05

Table 1b(continued): Target values and intervention values for soil remediation soil/sediment and groundwater for inorganic compounds, aromatic compounds, PAH, chlorinated hydrocarbons, pesticides and other contaminants. Values for soil/sediment have been expressed as the concentration in a standard soil (10% organic matter and 25% clay).

	EARTH/SEDIMENT (mg/kg dry matter)		GROUNDWATER (µg/l in solution)	
	target value	intervention value	target value	intervention value
V Chlorinated hydrocarbons				
vinyl chloride	0.01	0.1	0.01	5
dichloromethane	0.4	10	0.01	1000
1,1-dichloroethane	0.02	15	7	900
1,2-dichloroethane	0.02	4	7	400
1,1-dichloroethene	0.1	0.3	0.01	10
1,2-dichloroethene (cis and trans)??	0.2	1	0.01	20
dichloropropane	0.002#	2	0.8	80
trichloromethane (chloroform)	0.02	10	6	400
1,1,1-trichloroethane	0.07	15	0.01	300
1,1,2-trichloroethane	0.4	10	0.01	130
trichloroethene (Tri)	0.1	60	24	500
tetrachloromethane (Tetra)	0.4	1	0.01	10
tetrachloroethene (Per)	0.002	4	0.01	40
chlorobenzenes (sum) ^{5,14}	0.03	30	-	-
monochlorobenzene			7	180
dichlorobenzenes			3	50
trichlorobenzenes			0.01	10
tetrachlorobenzenes			0.01	2.5
pentachlorobenzene			0.003	1
hexachlorobenzene			0.00009*	0.5
chlorophenols (sum) ^{5,14}	0.01	10	-	-
monochlorophenols (sum)			0.3	100
dichlorophenols			0.2	30
trichlorophenols			0.03*	10
tetrachlorophenols			0.01*	10
pentachlorophenol			0.04*	3
chloronaphthalene	-	10	-	6
monochloroaniline	0.005	50	-	30
polychlorobiphenyls (sum 7) ⁷	0.02	1	0.01*	0.01
EOX	0.3		-	

Table 1b(continued): Target values and intervention values for soil remediation soil/sediment and groundwater for inorganic compounds, aromatic compounds, PAH, chlorinated hydrocarbons, pesticides and other contaminants. Values for soil/sediment have been expressed as the concentration in a standard soil (10% organic matter and 25% clay).

	EARTH/SEDIMENT (mg/kg dry matter)		GROUNDWATER (µg/l in solution)	
	target value	intervention value	target value	intervention value
VI Pesticides				
DDT/DDE/DDD ²	0.01	4	0.004 ng/l *	0.01
drins ³	0.005	4	-	0.1
aldrin	0.00006		0.009 ng/l*	
dieldrin	0.0005		0.1 ng/l	
endrin	0.00004		0.04 ng/l	
HCH-compounds ¹⁰	0.01 ⁴	2	0.05 ⁴	1
α-HCH	0.003		33 ng/l	
β-HCH	0.009		8 ng/l	
γ-HCH	0.00005		9 ng/l	
atrazine	0.0002	6	29 ng/l	150
carbaryl	0.00003	5	2 ng/l*	50
carbofuran	0.00002	2	9 ng/l	100
chlorodane	0.00003	4	0.02 ng/l*	0.2
endosulfan	0.00001	4	0.2 ng/l*	5
heptachloro	0.0007	4	0.005 ng/l*	0.3
heptachloro-epoxide	0.0000002	4	0.005 ng/l*	3
maneb	0.002	35	0.05 ng/l*	0.1
MCPA	0.00005#	4	0.02	50
organotin compounds ¹¹	0.001	2.5	0.05*-16 ng/l	0.7
VII Other contaminants				
cyclohexanone	0.1	45	0.5	15000
phthalates (sum) ¹²	0.1	60	0.5	5
mineral oil ¹³	50	5000	50	600
pyridine	0.1	0.5	0.5	30
tetrahydrofuran	0.1	2	0.5	300
tetrahydrothiophene	0.1	90	0.5	5000
tribromomethane	-	75	-	630

Notes to table 1:

1. Acidity: pH (0.01 M CaCl₂). In order to determine whether pH is greater than or equal to 5, or less than 5, the 90 percentile of the measured values is taken.
2. In areas subject to marine influence higher values occur naturally (salt and brackish water).
3. Differentiation by clay content: (F) = 175 = 13L (L = % clay).
4. PAH (sum of 10) here means the total of anthracene, benzo(a)anthracene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene, chrysene, phenantrene, fluoroanthene, indeno(1,2,3-cd)pyrene, naphthalene and benzo(ghi)perylene.
5. 'Chlorobenzenes (sum)' here means the total of all chlorobenzenes (mono-, di-, tri-, tetra-, penta- and hexachlorobenzene).
6. 'Chlorophenols (sum)' here means the total of all chlorophenols (mono-, di-, tri-, tetra- and pentachlorophenol).
7. In the case of the intervention value, 'polychlorobiphenyls (sum)' means the total of PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 and 180. For the target value it refers to the total excluding PCB 118.

8. 'DDT/DDD/DDE' above means the sum of DDT, DDD and DDE.
9. 'Drins' above means the sum of aldrin, dieldrin and endrin.
10. 'HCH compounds' above means the sum of α -HCH, β -HCH, γ -HCH and δ -HCH.
11. The intervention value applies to the sum of the concentrations of organotin compounds encountered.
12. 'Phthalates (sum)' above means the total of all phthalates.
13. 'Mineral oil' is defined in the analysis standard. Where the contamination is due to mixtures (e.g. gasoline or domestic heating oil), then not only the alkane content but also the content of aromatic and/or polycyclic aromatic hydrocarbons must be determined. This aggregate parameter has been adopted for practical reasons. Further toxicological and chemical disaggregation is under study.
14. The values for the sum of polycyclic aromatic hydrocarbons, the sum of chlorophenols and the sum of chlorobenzenes in earth/sediment apply to the total concentration of the compounds belonging to the relevant category. If the contamination is due to only one compound of a category, the value used is the value for that compound. Where there are two or more compounds the value for the total of these compounds applies, etc. For earth/sediment, effects are directly additive (i.e. 1 mg of substance A has the same effect as 1 mg of substance B) and can be tested against an aggregate standard by summing the concentrations of the substances involved. In the case of groundwater, effects are indirectly additive and are expressed as a fraction of the individual intervention values (i.e. 0.5 of the intervention value of substance A has the same effect as 0.5 of the intervention value of substance B). This means that an addition formula must be used to determine whether an intervention value is exceeded. The intervention value for the sum of a group of substances is exceeded if:

$$\sum C_j / I_i \geq 1,$$

where: C_j = measured concentration of a substance in the group of substances in question
 I_i = intervention value for the group.

*numeric value below the detection level/quantification level or measurement method is lacking

These target values have not been tested in HANS. All the other values have been tested in HANS.

^ The individual standards in INS are given in the Fourth Policy Document on Water Management along with the sum standards marked ^.