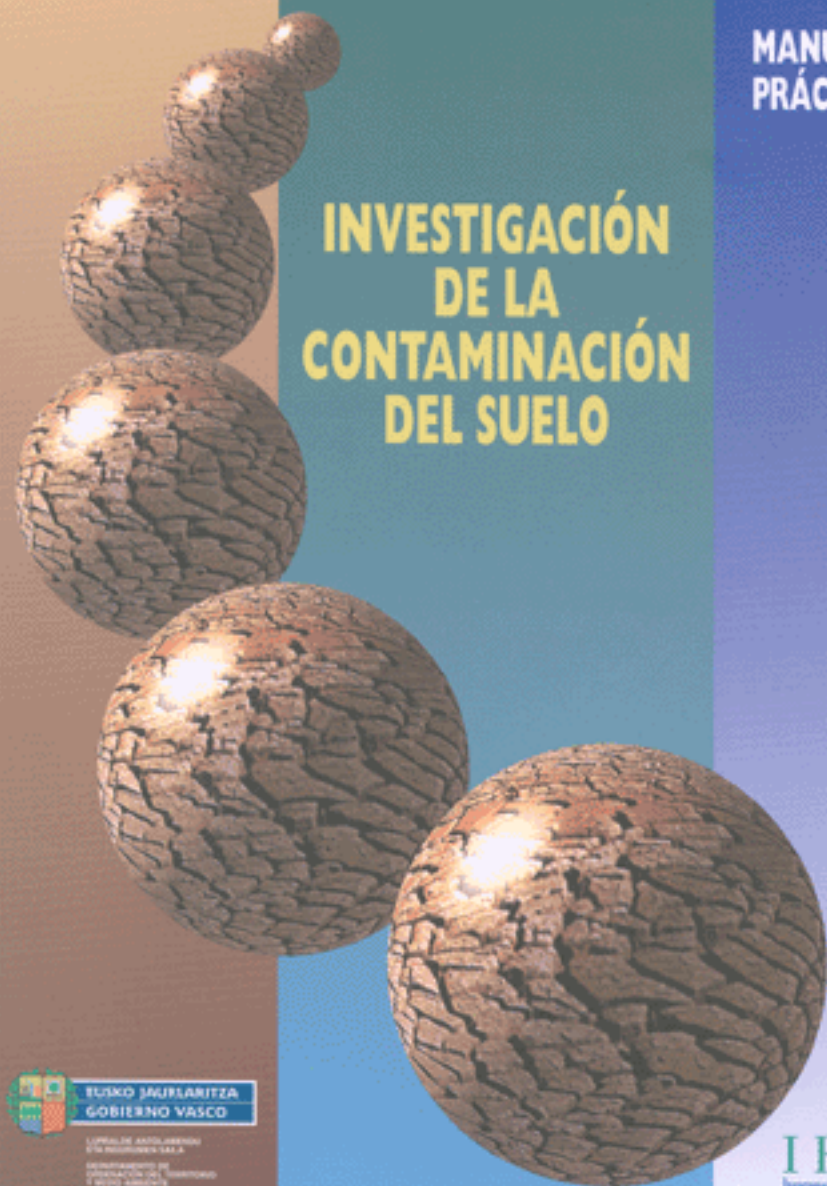


MANUAL
PRÁCTICO

INVESTIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

ERREGLA DE AGROPECUARIO
ETA BOSKALAN
DEPARTAMENTO DE
AGRICULTURA DEL TERRITORIO
Y BOSQUE VASCO



IHOBE
Ikerketan Barne-erakunde Soziala Publikoa
Sociedad Pública Gestión Ambiental

Eusko Jaurlaritzak lurzoru poluituen alorrean laurgeta hamargarreneko hasieran abiarazi zuen politika lehenasunezkoa da gaur egun, hiri-berreskurapenerako prozesu geldietzean ari garen herri honetan. Zein prozesu horiek segurtasun-bermeak eskatzen dituzten, bai pertsonen osasunerako bai ingurumenarako, politzaile izan zitezkeen jardueretarako erabilteko ziren lurak laster batean erabilera senikorrerako berreskurazerakoan.

Politika honen diseinu eta garapenaren hasiera beretik argi izan genuen jarraitide metodologikoez eta prozedurak prestatu behar zirela berez nahiko gai korapilotsua zen lurzoruaren kalitatea aztertzeko eta ebaluatzeko. Kezka horri erantzun nahian, zenbait gidaliburu metodologiko eta teknike argitaratu dira, zipatu eginkizunerako irizpide teknikoak bateratzeko ezin ukatzeko balioa izan dutenak.

Harrezkeroztik kokagune poluituen azterketa eta kudeaketan hartutako esperientziak baliatu gara idatzi tekniko horiek aberasteko eta Euskal Autonomia Erkidegoaren beharretara eta lurzoruaren poluzioaren ondoriozko arazoetara eraginkorrean heltzeko diseinatu den estrategia globalera egokitzeko.

Bakoitzari jarri ahal izango den helburuak betetzeko lanketa-maila nahikoa dutela uste izan den lehenagoko gidaliburu metodologiko eta teknikoekin gain, oraingoan, lurzoruaren poluzioaren ikerketa-prozesuan gidaliburu bakoitzak berariaz garatutako kontzeptuak biltzen dituen Eskuliburu Praktikoak argitaratu dugu. Eusko Jaurlaritzako Lurralde Antolamendu eta Ingurumen Saila lurzoru poluituen politikaren alde apustu egiten jarraitzeko prest dago, eta argitalpen honek gaiaren alderdi teknikoak finkatzen laguntzea espero dugu.



Sabir Inchaurre

Lurralde Antolamendu,
eta Ingurumen Sailburua

Consejero del Departamento de Ordenación
del Territorio y Medio Ambiente

La política de suelos contaminados iniciada por el Gobierno Vasco a principios de los noventa, se ha convertido en estos momentos en una prioridad para un país embarcado en un proceso imparable de regeneración urbana que exige una garantía de seguridad tanto para la salud humana como para el medio ambiente ante la inminente reutilización para usos sensibles de terrenos anteriormente destinados a actividades potencialmente contaminantes.

Ya en los primeros estadios de diseño y desarrollo de esta política se comprendió la necesidad de elaborar directrices metodológicas y procedimientos cuyo objetivo no fuera otra que facilitar la ya en sí difícil tarea de investigar y evaluar la calidad del suelo. Esta inquietud se materializó con la publicación de una serie de guías metodológicas y técnicas que han demostrado una innegable validez en la unificación de los criterios técnicos que deben regir esta tarea.

La experiencia adquirida desde entonces en la investigación y gestión de emplazamientos contaminados ha sido utilizada para enriquecer y ajustar estos documentos técnicos a las necesidades de la Comunidad Autónoma del País Vasco y a la estrategia global diseñada para abordar de una manera eficaz la problemática originada por la contaminación del suelo.

Junto a la edición de las guías metodológicas y técnicas ya publicadas cuyo grado de elaboración se ha considerado suficiente para alcanzar los objetivos que cada una de ellas tenía marcados, ahora se presenta un Manual Práctico que aglutina los conceptos desarrollados específicamente en cada una de las guías en el proceso de investigación de la contaminación del suelo que espero contribuya a

reforzar los aspectos técnicos de esta política de suelos contaminados por la que el Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco está dispuesto a seguir haciendo una apuesta firme.

Lurzoruaren poluzioa ikertzeko Gidaliburu Metodologiko eta Teknikoen bertsio berriak 1998an argitaratu zirenez eta ikerketarako estrategia orokorrari orain beste ikuspegi batetik begiratzen zaionez, Eskuliburu Praktikoaren bertsio berri honek aurrekoa eguneratzeko zegoen beharrari erantzuten dio argi eta garbi. Eskuliburu Praktikoaren aurreko bertsioak guztiz erabilgarria dela erakutsi du. Horregatik, bertsio berri hau garatzeko ere eredu berberari jarraitu zaio.

Eskuliburu Praktikoa lurzorua kalitatearen ikerketaren segimendua egiteko tresna didaktiko eta oinarritzko izan dadin, lehengo berraztertu eta eguneratzea da agiri honen helburua. Baina ez ditu Gidaliburu Metodologiko edo Tekniko guztiak ordezkatzeko. Eskuliburu Praktikoan laburbildurik dagoen informazioa sakondu eta zabaltzeko horietara jo beharko da.

Eskuliburu honekin Lurzoru Poluituen kudeaketan bide egokiena, sistematikoa eta arautua egiteko oinarritzko erreminten multzoa osatuta dago. Gainera, Euskal Autonomia Erkidegoko Ingurumena Babesteko 3/98 Lege Orokorren esparruan garatuko den berariazko legerian, horiek beharrezkoak izango direla aurreikusten da.

Jarduteko prozedura jartzeak orain bete-betean sartuta gauden hirigintza-birmoldaketako prozesu bihurrian eraginkorki jarduteko gaitzen gaitu. Lehenago poluitutako lurzoruen arazoari heltzen badiogu, etorkizuneko lur horien erabilera jasangarria izan dadin bermatuko dugu.

Con la publicación en 1998 de las nuevas versiones de Guías Metodológicas y Técnicas para la investigación de la contaminación del suelo, así como el enfoque actual dado a la estrategia general de investigación, esta nueva versión de Manual Práctico responde a una clara necesidad de actualización. La demostrada utilidad de la versión anterior del Manual Práctico, ha confirmado la misma orientación para el desarrollo de esta nueva versión.

Este documento pretende revisar y actualizar el Manual Práctico existente, como herramienta didáctica y básica que facilite el seguimiento de una investigación de la calidad del suelo, sin que este sustituya a cada una de las Guías Metodológicas o Técnicas que deberán ser consultadas para la aclaración y ampliación de la información resumida en el Manual Práctico.

Este Manual culmina el conjunto de las herramientas básicas necesarias para emprender un camino óptimo, sistemático y regulado en la gestión de los Suelos Contaminados tal y como ya se prevé será necesario establecer en el marco de la Ley 3/98 General de Protección del Medio Ambiente del País Vasco a través de legislación específica a desarrollar.

El establecimiento de un procedimiento de actuación nos habilita para proceder de forma eficaz en el intenso proceso de reconversión urbanística en el que nos vemos involucrados en la actualidad. Abordar el problema de los Suelos Contaminados en el pasado de una forma rigurosa, permitirá garantizar el uso sostenible de esos suelos en el futuro.



Iñaki Erkorra

*Eguneraketa Sailburua
Viceconsejero de Medio Ambiente*

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	5
1.1	INTRODUCCIÓN	5
1.2	OBJETIVOS	6
1.3	ÁMBITO DE APLICACIÓN.....	7
1.4	ESTRUCTURA Y CONTENIDOS DEL MANUAL PRÁCTICO	7
2.	DEFINICIONES	9
3.	INCORPORACIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS POTENCIALMENTE CONTAMINADOS AL PROCESO DE INVESTIGACIÓN.....	13
4.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	17
4.1	INTRODUCCIÓN	17
4.2	ETAPAS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	17
4.2.1	Investigación Exploratoria.....	19
4.2.2	Investigación Detallada.....	20
5.	PRINCIPIOS GENERALES DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN.....	21
5.1	INTRODUCCIÓN	21
5.2	DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN	21
5.2.1	Diseño de la estrategia de muestreo	21
5.2.1.1	Principios generales	22
5.2.1.2	Estrategia de muestreo del suelo.....	25
5.2.1.2.1	Localización de los puntos de muestreo	25
5.2.1.2.2	Profundidad de muestreo	26
5.2.1.2.3	Número de muestras por cada punto de muestreo	27
5.2.1.3	Estrategia de muestreo de las aguas subterráneas	27
5.2.1.3.1	Contexto hidrogeológico.....	28
5.2.1.3.2	Muestreo de las aguas subterráneas	29
5.2.1.4	Estrategia de muestreo del aire intersticial del suelo	30
5.2.1.5	Estrategia de muestreo de otros elementos	31
5.2.2	Diseño del programa de análisis químico	32
5.2.3	Diseño del plan de seguridad	34
5.3	PREPARACIÓN DE LOS TRABAJOS DE CAMPO.....	36
5.3.1	Aspectos generales.....	36
5.3.2	Preparación de la toma de muestras.....	36
5.4	TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS EN LABORATORIO	37
5.4.1	Toma de muestras	38
5.4.1.1	Toma de muestras de matriz sólida.....	38
5.4.1.1.1	Toma de muestras de suelo.....	38
5.4.1.1.2	Toma de muestras de residuos y materiales abandonados	39
5.4.1.1.3	Toma de muestras de elementos constructivos de edificios	40
5.4.1.2	Toma de muestras de matriz líquida	40
5.4.1.2.1	Toma de muestras de aguas subterráneas	40
5.4.1.2.2	Toma de muestras de aguas superficiales	42
5.4.1.2.3	Toma de muestras de residuos líquidos	42
5.4.1.3	Toma de muestras de matriz gaseosa.....	42
5.4.1.4	Toma de otro tipo de muestras.....	43
5.4.2	Registro de los datos de muestreo.....	44

5.4.3	Conservación y transporte de las muestras	44
5.4.3.1	Conservación y transporte de muestras sólidas	44
5.4.3.2	Conservación y transporte de muestras líquidas	45
5.4.3.3	Conservación y transporte de muestras gaseosas	45
5.4.4	Control de calidad del proceso de toma y transporte de las muestras	45
5.5	ANÁLISIS IN SITU	47
5.5.1	Introducción.....	47
5.5.2	Análisis <i>in situ</i> de muestras sólidas	47
5.5.3	Análisis <i>in situ</i> de muestras líquidas	48
5.5.4	Análisis <i>in situ</i> de gases y vapores	49
5.6	OTRAS INVESTIGACIONES Y ENSAYOS	50
5.6.1	Investigaciones geofísicas	50
5.6.2	Ensayos para determinar parámetros hidrodinámicos	52
5.6.2.1	Ensayos de permeabilidad	52
5.6.2.2	Ensayos de bombeo	52
5.7	ANÁLISIS DE LABORATORIO	53
5.7.1	Análisis de muestras de suelo.....	53
5.7.2	Análisis de otro tipo de muestras.....	54
5.7.3	Control de calidad en el laboratorio	54
6.	ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA.....	57
6.1	INTRODUCCIÓN	57
6.2	RECOPIACIÓN PREVIA DE INFORMACIÓN	57
6.2.1	Estudio histórico.....	58
6.2.2	Análisis del medio físico	60
6.2.3	Visita de campo	61
6.3	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA RECOPIACIÓN PREVIA DE INFORMACION.....	63
6.4	INVESTIGACIÓN DE CAMPO	64
6.4.1	Diseño de la estrategia de muestreo.....	64
6.4.1.1	Estrategia de muestreo de suelos	64
6.4.1.2	Estrategia de muestreo de aguas subterráneas	65
6.4.1.3	Estrategia de muestreo del aire intersticial del suelo.....	66
6.4.1.4	Estrategia de muestreo de otros elementos.....	67
6.4.2	Diseño del programa de análisis químico.....	67
6.4.2.1.1	Selección de los parámetros químicos.....	67
6.4.3	Ensayos <i>in situ</i>	70
6.5	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS E INFORME.....	71
6.5.1	Interpretación de resultados.....	71
6.5.1.1	Distribución homogénea de la contaminación.....	72
6.5.1.2	Distribución heterogénea de fuente conocida.....	73
6.5.1.3	Distribución heterogénea de fuente desconocida	73
6.5.2	Informe de la Investigación Exploratoria	73
7.	ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DETALLADA	75
7.1	INTRODUCCIÓN	75
7.2	ADAPTACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL	75
7.2.1	Identificación de los componentes del riesgo.....	75
7.2.2	Diseño de la estrategia de investigación.....	76
7.3	INVESTIGACIÓN DE CAMPO	76
7.3.1	Diseño de la estrategia de muestreo.....	76
7.3.2	Diseño de la estrategia de muestreo del suelo	77

7.3.2.1 Distribución homogénea de la contaminación	78
7.3.2.2 Distribución heterogénea con fuente de contaminación conocida.....	79
7.3.2.3 Estrategia de muestreo de aguas subterráneas	79
7.3.3 Diseño del programa de análisis	80
7.3.3.1 Diseño del programa de análisis químico	80
7.3.3.1.1 Análisis de muestras de suelo	80
7.3.3.1.2 Análisis de muestras de agua subterránea.....	81
7.3.3.2 Diseño del programa de análisis complementarios.....	82
7.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO	82
7.5 EVALUACION DE RIESGOS	83
7.5.1 Introducción	83
7.5.2 Protocolo general de evaluación de riesgos	84
7.5.3 Evaluación de riesgos	85
7.5.3.1 Análisis de la peligrosidad o toxicidad.....	85
7.5.3.2 Análisis de la exposición	87
7.5.3.3 Análisis de riesgos	91
7.5.4 Evaluación de los factores de incertidumbre	93
7.5.5 Interpretación de los resultados de la evaluación de riesgos.....	94
7.6 INFORME DE LA INVESTIGACIÓN DETALLADA	94
8. ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DE RUINAS INDUSTRIALES	97
8.1 INVESTIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE EDIFICIOS	98
8.2 INVENTARIO, CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MATERIALES ABANDONADOS....	99
9. INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS.....	101
9.1 INTRODUCCIÓN	101
9.2 INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS MÁS HABITUALES	101
9.2.1 Investigaciones tendentes a determinar parámetros característicos del medio ..	101
9.2.2 Ensayos a escala de laboratorio o piloto	102
10. BIBLIOGRAFÍA.....	105
ANEXO I: VALORES INDICATIVOS DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO	107

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La determinación de la idoneidad de un emplazamiento para el establecimiento sobre su superficie de un determinado uso pasa ineludiblemente, allí donde exista sospecha de contaminación, por la evaluación de la calidad del suelo. Los riesgos que una alteración grave de la calidad del suelo puede suponer para la salud pública, los ecosistemas, la productividad de las explotaciones y la integridad de edificaciones e infraestructuras, alcanzan en ocasiones una magnitud tal que constituyen razón suficiente para restringir los usos actuales y futuros del terreno.

Las decisiones a adoptar en este sentido requieren efectuar investigaciones sistemáticas que proporcionen datos suficientemente fiables como para asegurar que tales decisiones garanticen:

- la minimización de los riesgos para la salud humana, los ecosistemas y las infraestructuras tanto en el emplazamiento considerado como en los terrenos colindantes;
- la seguridad a largo plazo de los usos ya existentes;
- la maximización de los usos potenciales que en el futuro pueda hacerse del suelo en cuestión.

En 1994 IHOBE, S.A. editó un conjunto de Guías Metodológicas dirigidas a establecer mecanismos y procedimientos para acometer los diferentes aspectos de una investigación de la calidad del suelo. Al mismo tiempo, se consideró oportuno redactar un *Manual Práctico de Investigación de la Contaminación del Suelo* que aglutinara aquellos aspectos clave contenidos en las Guías Metodológicas, proporcionando una visión global del proceso de investigación.

La experiencia acumulada desde la anterior edición de dichos documentos y la reciente elaboración de nuevas Guías han motivado la preparación de la presente edición del *Manual Práctico para la Investigación de la Contaminación del Suelo*.

La Figura 1 adjunta esquematiza las principales etapas de lo que podría denominarse el “ciclo de vida” de un emplazamiento contaminado, desde su identificación inicial hasta la intervención en el mismo (con las medidas y alcances necesarios), pasando por su investigación. La figura muestra además las herramientas más significativas disponibles para actuar en cada una de las fases y la consecuente categorización del emplazamiento a lo largo del proceso.

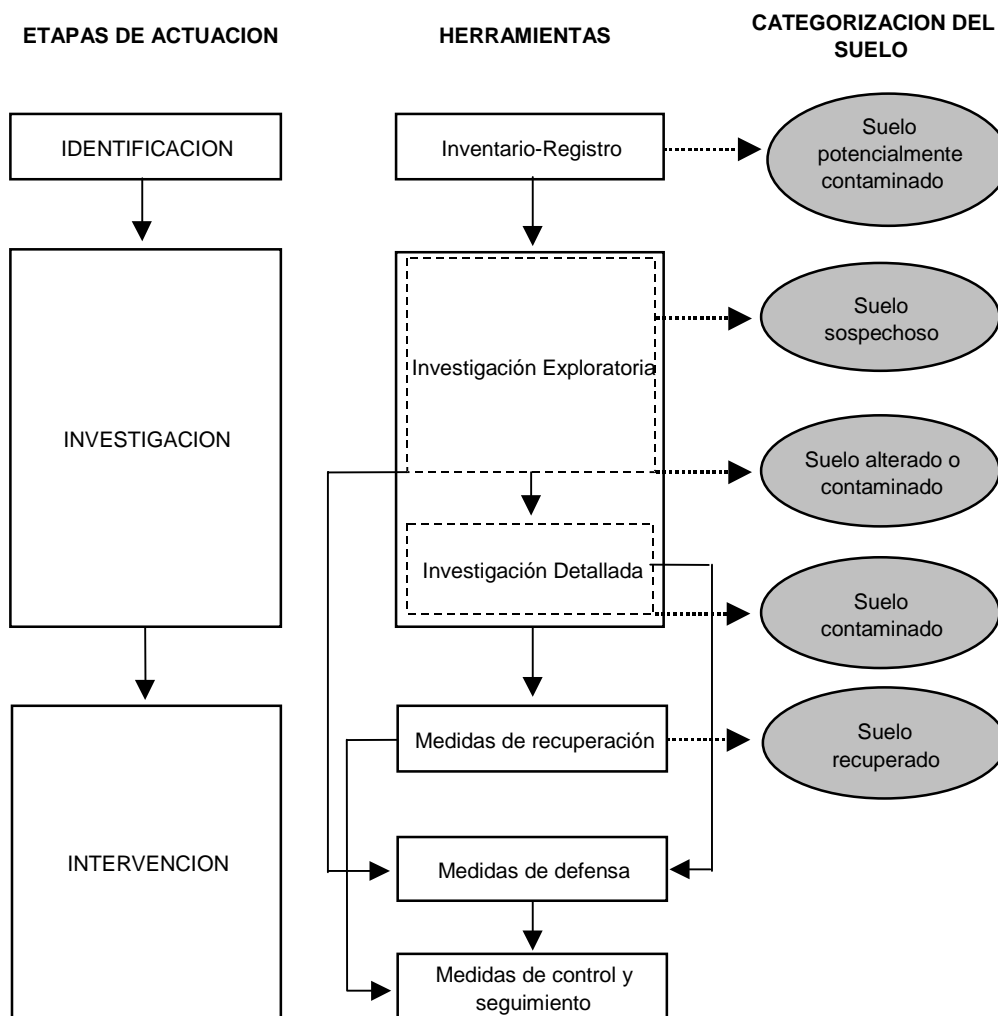


Figura 1: Etapas y herramientas de actuación en un suelo contaminado

1.2 OBJETIVOS

Las Guías Metodológicas y Técnicas para la investigación de la contaminación del suelo elaboradas por IHOBE, abordan con un elevado grado de detalle cada uno de los aspectos de interés en la investigación de la calidad del suelo. Con objeto de sintetizar esta información, el *Manual Práctico para la Investigación de la Contaminación del Suelo* presenta de forma resumida la sistemática del proceso global de estudio de los emplazamientos potencialmente contaminados, haciendo hincapié en aquellos aspectos más relevantes de cada trabajo.

Principales documentos de referencia para la investigación de la calidad del suelo
- <i>Calidad del suelo: Valores indicativos de evaluación (VIE-A, VIE-B, VIE-C)</i>
- <i>Guía Metodológica de estudio histórico y diseño de muestreo</i>
- <i>Guía Metodológica de toma de muestras</i>
- <i>Guía Metodológica de análisis químico</i>
- <i>Guía Metodológica de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas</i>
- <i>Guía Metodológica de análisis de riesgos: migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas</i>
- <i>Guía Técnica de seguridad para la investigación y recuperación de suelos contaminados</i>
- <i>Guía Técnica de criterios ambientales para la recuperación de ruinas industriales</i>
- <i>Guía Técnica de diseño de planes de actuación en vertederos de residuos industriales</i>

Los contenidos del Manual Práctico pretenden unificar las líneas generales y criterios de actuación a la hora de abordar cualquier investigación de la calidad del suelo de un emplazamiento, manteniendo al tiempo la flexibilidad necesaria para considerar las particularidades que cada uno presenta.

1.3 ÁMBITO DE APLICACIÓN

El *Manual Práctico para la Investigación de la Contaminación del Suelo* es de aplicación en el estudio de todos aquellos emplazamientos en los que se sospeche o haya constatado que el suelo ha sufrido alguna alteración de tipo químico de origen antrópico.

En términos generales, las líneas de actuación que se recogen en el Manual Práctico poseen un carácter genérico. No obstante, al tratar algunos aspectos se contemplan las particularidades de ciertos tipos de emplazamientos, en especial, vertederos y ruinas industriales.

Los principales aspectos que se desarrollan en este Manual Práctico son los siguientes:

- identificación de emplazamientos que pudieran estar contaminados y que, en consecuencia, requerirían una investigación de la calidad del suelo;
- recopilación de la información existente relativa al emplazamiento, a través de la realización de un estudio histórico, visitas de inspección y un análisis del medio físico;
- diseño de la estrategia de muestreo y del programa de análisis químico;
- toma, preservación y análisis de las muestras;
- realización de ensayos para la determinación de parámetros característicos del medio físico;
- evaluación de los datos obtenidos en el proceso de investigación;
- evaluación de los riesgos derivados de la situación de contaminación;
- elaboración de los informes de la investigación;
- realización de investigaciones complementarias con carácter previo al diseño detallado de las medidas de recuperación y/o de control y seguimiento.

1.4 ESTRUCTURA Y CONTENIDOS DEL MANUAL PRÁCTICO

Los contenidos del Manual Práctico están básicamente orientados a describir los trabajos de investigación cuyos resultados permiten tomar decisiones acerca del tipo de medidas a adoptar en un suelo potencialmente contaminado. No obstante, la presente edición incorpora además algunas consideraciones sobre las investigaciones complementarias que pueden ser precisas para la definición detallada de tales medidas, sean éstas de recuperación o de control y seguimiento.

Tras la exposición en el capítulo 2 de las definiciones de los términos más importantes utilizados en el Manual Práctico, el capítulo 3 presenta los criterios a seguir para la identificación de emplazamientos potencialmente contaminados y posterior incorporación al proceso de investigación, reservándose el capítulo 4 para desarrollar una descripción general del mismo.

Dicho proceso se apoya en la realización de varias fases progresivas, cada una de las cuales incluye diversas tareas. Dado que algunas de esas tareas (o determinados aspectos de las

mismas) son comunes a todas las fases de investigación, el Manual Práctico presenta en el capítulo 5 los principios generales aplicables para su ejecución. Es el caso de los aspectos básicos relativos al diseño de la estrategia de muestreo, del programa de análisis químico y del plan de seguridad. También es objeto de este capítulo la descripción de determinados trabajos de campo (toma de muestras para análisis en laboratorio, realización de análisis de muestras in situ, investigaciones geofísicas o ensayos para la determinación de parámetros hidrodinámicos), la preparación de los mismos y la ejecución de análisis físico-químicos en laboratorio.

A continuación, el Manual Práctico contiene un capítulo dedicado a describir los aspectos específicos de la fase de Investigación Exploratoria (capítulo 6) y otro a hacer lo mismo para la fase de Investigación Detallada (capítulo 7). El primero de ellos presta particular atención a los trabajos de recopilación de información (estudio histórico, análisis del medio físico y visita al emplazamiento) a efectuar en la Investigación Exploratoria antes de acometer las investigaciones de campo. En el segundo destaca la exposición de los criterios y metodología a utilizar para la evaluación de riesgos.

Dadas las particularidades que presentan los emplazamientos agrupados bajo la denominación de ruinas industriales y las repercusiones que aquéllas tienen en la investigación de las mismas, se ha considerado oportuno reservar el capítulo 8 para describir los aspectos específicos que presenta dicha investigación.

El Manual Práctico finaliza con algunas consideraciones generales acerca de las investigaciones complementarias que, una vez terminado el proceso de investigación propiamente dicho, pueden ser precisas para la definición detallada de las medidas de recuperación y/o de control y seguimiento a adoptar en un suelo contaminado. Dichas consideraciones se exponen en el capítulo 9.

Los contenidos antes señalados se complementan con el capítulo dedicado a las referencias bibliográficas y un anexo en el que se recopilan los Valores Indicativos de Evaluación de la calidad del suelo actualmente establecidos en la Comunidad Autónoma del País Vasco.

2. DEFINICIONES

Se incluyen en este capítulo las definiciones de algunos términos que aparecen a lo largo del Manual Práctico y que se consideran de interés para la comprensión global del mismo:

- **Suelo.** Se entiende por suelo la parte sólida de la corteza terrestre, desde la roca madre hasta la superficie, que incluye tanto sus fases líquida y gaseosa como los organismos que habitan en él, con la capacidad de desempeñar funciones tanto naturales como de uso del mismo (Ley 3/1998 General de Protección del Medio Ambiente del País Vasco).
- **Suelo potencialmente contaminado.** Un suelo será catalogado como potencialmente contaminado cuando, o bien aparezca incluido en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* o bien, a pesar de no haber sido inventariado, existan indicios razonables que señalen una posible alteración de su calidad.
- **Suelo sospechoso.** Un suelo será considerado como sospechoso de estar contaminado cuando los resultados de la recopilación de información (estudio histórico, visita de campo y análisis del medio físico) indiquen que existen indicios razonables de una potencial alteración de la calidad del suelo, siendo necesario efectuar una investigación con muestreo y análisis químico dirigida a confirmar o desechar esta hipótesis.
- **Suelo alterado.** Se define como aquél que presente alguna alteración significativa de sus características químicas que pueda suponer algún condicionante o limitación a las funciones del mismo, siempre y cuando tal circunstancia no conlleve riesgos inaceptables para los usos previstos.
- **Suelo contaminado.** Se define como aquél que presente una alteración de sus características químicas incompatible con sus funciones, debido a que supongan un riesgo inaceptable para la salud pública o el medio ambiente (Ley 3/1998 General de Protección del Medio Ambiente del País Vasco).
- **Investigación Exploratoria.** Es la fase de investigación cuyo objetivo es confirmar, por un lado, la existencia de niveles de contaminación que supongan o puedan suponer un riesgo inaceptable para la salud humana y los ecosistemas y, por otro, la hipótesis de distribución espacial de la contaminación. Los datos obtenidos en esta fase deben permitir el diseño óptimo de la fase de Investigación Detallada.
- **Investigación Detallada.** Es la fase de investigación cuyo objeto reside en recabar toda la información (caracterización espacial -horizontal y vertical- y temporal de la contaminación, receptores potenciales, etc.) que sea necesaria para acometer la evaluación de los riesgos presentes y futuros derivados de la contaminación detectada. La evaluación de riesgos es un elemento esencial de la Investigación Detallada de cara a tomar decisiones sobre posteriores medidas a implantar en el emplazamiento.
- **Valores Indicativos de Evaluación (VIE).** Los Valores Indicativos de Evaluación son niveles cuantitativos de la calidad del suelo que permiten la evaluación genérica de los

emplazamientos en relación con el riesgo que su alteración supone para los objetos protegidos (salud humana y ecosistemas).

- **Valor VIE-A o nivel de referencia.** El nivel de referencia es el valor indicativo de evaluación por debajo del cuál es posible afirmar que el suelo no se encuentra afectado por la contaminación y, en consecuencia, el riesgo es nulo o despreciable. Contrariamente al resto de los valores indicativos de evaluación, cuya derivación se hace en base a criterios de riesgos, el nivel de referencia representa el límite superior del intervalo de concentraciones del contaminante en cuestión que se encuentran en los suelos naturales no antropizados.
- **Valor VIE-B.** Este valor indicativo de evaluación marca el límite inferior de aceptabilidad del riesgo. Concentraciones del contaminante por debajo de este valor pero superiores a VIE-A implican riesgos aceptables, mientras que contenidos mayores que VIE-B pueden llevar asociado, dependiendo de las condiciones locales del emplazamiento, un riesgo inaceptable. Los VIE-B derivados para proteger la salud humana están definidos en función de los usos del emplazamiento.
- **Valor VIE-C o de máximo riesgo tolerable.** Este valor de calidad representa el límite superior de aceptabilidad del riesgo. Su superación implica un peligro grave para el funcionamiento de los ecosistemas. Por su propia definición, la superación de este valor conduce a la necesidad de adoptar medidas que eliminen el riesgo, ya que éste se habría visto incrementado de una manera inaceptable. Sólo existen valores VIE-C para la protección de los ecosistemas.
- **Riesgo.** En el marco de la investigación de suelos contaminados, se define el riesgo en función de la probabilidad de que un suceso adverso ocurra como resultado de la exposición a la contaminación del suelo, y de la magnitud de las consecuencias o impacto de dicho suceso sobre los objetos de protección (salud humana, ecosistemas, otros compartimentos ambientales, explotaciones agrícolas y forestales, infraestructuras, etc.).
- **Modelo conceptual de riesgo.** En el contexto de la evaluación de riesgos, el modelo conceptual es un esquema del emplazamiento y su entorno que incluya de forma cualitativa los posibles focos de contaminación y su naturaleza, así como las potenciales rutas de exposición y/o dispersión para cada uno de los receptores identificados.
- **Evaluación de riesgos.** La evaluación de riesgos constituye un proceso racional de identificación, medida y comparación de diversos parámetros mediante el cual se identifican y evalúan los riesgos potenciales y reales que la presencia de un suelo contaminado comporta para los objetos protegidos. La evaluación de riesgos es la herramienta clave para tomar decisiones sobre la aceptabilidad del riesgo y las consecuentes medidas a adoptar.
- **Medidas de prevención.** Se incluyen dentro de este grupo todas aquellas medidas dirigidas bien a evitar la aparición de fuentes de contaminación, bien a controlar las actividades que pudieran llegar a producir una alteración de la calidad del suelo.

- **Medidas de defensa.** Ante la presencia de una fuente potencial de contaminación del suelo, las medidas de defensa tienen por objeto eliminar o restringir la magnitud de la afección que ésta produce sobre el suelo.
- **Medidas de recuperación.** El objetivo de las medidas de recuperación es la eliminación o minimización del riesgo que supone la alteración del suelo, bien a través de la reducción de las concentraciones de sustancias contaminantes en el medio (medidas de descontaminación) o bien mediante la limitación de la exposición o de las vías de dispersión (medidas de seguridad).
- **Medidas de control y seguimiento.** La adopción de este tipo de medidas supone el seguimiento continuado en el tiempo de las concentraciones de contaminantes tanto en el suelo como en otros medios de contacto. Emplazamientos sometidos a fuentes de contaminación difusa o progresiva (por ejemplo, deposición atmosférica), suelos en los que se han implantado medidas de defensa o terrenos ya recuperados, representan algunas situaciones en las que se pueden aplicar estas medidas.

3. INCORPORACIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS POTENCIALMENTE CONTAMINADOS AL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Las acciones que han podido ocasionar la alteración de las características del suelo provocando su contaminación son variadas. Entre ellas cabe destacar las siguientes:

- almacenamiento y transporte de materias primas, productos elaborados y/o residuos
- deposición de residuos sólidos, líquidos y pastosos
- vertidos accidentales
- derrames, escapes o fugas producidos durante la operación habitual de instalaciones industriales
- aplicación de lodos de depuración
- deposición atmosférica
- aplicación de pesticidas, abonos y fertilizantes en la agricultura

En todo caso, la mera instalación sobre el terreno de determinadas actividades (industriales en su mayor parte) constituye una sospecha suficientemente fundada para considerar el emplazamiento como suelo potencialmente contaminado.

La identificación de un emplazamiento potencialmente contaminado es el mecanismo que pone en marcha el sistema de investigación progresiva descrito en el presente Manual Práctico.

Las circunstancias que habitualmente llevan a la identificación de un emplazamiento como suelo potencialmente contaminado son muy diversas, siendo las más frecuentes las siguientes:

- su inclusión en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo*
- una evaluación medioambiental realizada en el marco de una operación de compraventa
- la inspección de terrenos sometidos a planes de desarrollo urbanístico
- el descubrimiento de materiales sospechosos durante trabajos de demolición y construcción
- denuncias o quejas
- las inspecciones de rutina en instalaciones productoras de residuos industriales
- la inspección de instalaciones industriales sometidas a auditorías ambientales o que hayan recibido denuncias por algún tipo de accidente o vertido
- la inspección de terrenos en los que se localicen efectos ambientales sin causa aparente

Sin detrimento de las otras circunstancias mencionadas anteriormente, la inclusión de un emplazamiento en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* es la principal referencia para considerar a aquél como un suelo potencialmente contaminado y, en consecuencia, justificar el inicio del proceso de investigación del mismo.

El *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* se ha planteado como una recopilación de información sobre aquellos suelos que, debido a los usos a los que han sido sometidos a lo largo del tiempo, pudieran haber visto afectada su calidad hasta extremos en los que los usos potenciales del emplazamiento puedan estar

condicionados debido a los riesgos para la salud humana, el medio ambiente, las infraestructuras o la propia productividad del terreno.

Una vez en vigor la Ley 3/1998, General de Protección del Medio Ambiente del País Vasco, el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* constituye el instrumento clave para facilitar a las administraciones locales la introducción del criterio “calidad del suelo” en la toma de decisiones relacionadas con la gestión urbanística del suelo. La información contenida en el Inventario deberá utilizarse no sólo en el proceso de diseño o revisión del planeamiento, sino que también habrá de ser incorporada a los procedimientos administrativos, tanto de intervención ordinaria como excepcional, que afecten a los terrenos registrados en él.

Uno de los puntos de partida para la elaboración del Inventario ha sido la confección de un listado de actividades potencialmente contaminantes del suelo, que incluye las actividades e instalaciones que se mencionan en el siguiente cuadro:

Actividades e instalaciones potencialmente contaminantes del suelo
1. Extracción de minerales metálicos
2. Lavado, desengrasado, blanqueo y tintado de fibras textiles
3. Preparación, curtido y acabado del cuero
4. Preparación industrial de la madera
5. Refino de petróleo
6. Coquerías
7. Plantas asfálticas
8. Industria química
9. Metalurgia
9.1 Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones
9.2 Producción y primera transformación de metales no féreos
9.3 Fundición de metales
10. Fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo mecánico incluyendo la forja, estampación, embutición, tratamiento y revestimiento de metales
11. Fabricación de armas y municiones
12. Fabricación de material y maquinaria eléctrica y electrónica
13. Fabricación de material de transporte
14. Mantenimiento y reparación de material de transporte
15. Gasolineras
16. Instalaciones de gestión ambiental, incluyendo vertederos
17. Comercio al por mayor de minerales, metales, productos químicos, chatarra y residuos
18. Depósito y almacenamiento de mercancías peligrosas
19. Generación de energía. Centrales térmicas

El diagrama adjunto sintetiza el proceso de identificación de un emplazamiento como suelo potencialmente contaminado.

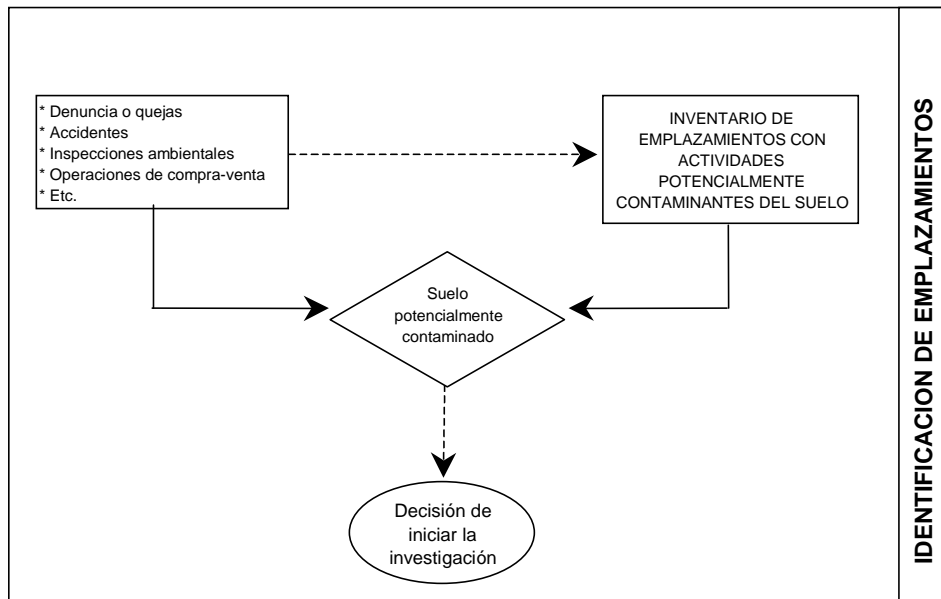


Figura 2: Procesos de identificación de emplazamientos potencialmente contaminados

4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha indicado anteriormente, la identificación de un suelo como potencialmente contaminado constituye la antesala del proceso de investigación propiamente dicho, cuyo objetivo último es la evaluación de los riesgos que plantea el emplazamiento para la salud humana y el medio ambiente, con vistas a tomar las decisiones oportunas sobre las medidas a implantar.

Son tres los factores principales que condicionan la estrategia de investigación de un emplazamiento potencialmente contaminado:

- el objetivo de la investigación;
- la información previa existente sobre el emplazamiento;
- los recursos disponibles (tiempo y dinero) para llevar a cabo la investigación.

La experiencia ha demostrado que la adopción de un esquema de investigación progresiva (por fases) permite optimizar los resultados del conjunto del proceso en relación con los recursos que se le asignan. El esquema de investigación progresiva se apoya en el principio de que la evaluación de los resultados obtenidos en cada una de sus fases debe permitir una toma fundada de decisiones acerca de las actuaciones posteriores, sean éstas de acometer investigaciones más amplias o de implantar medidas de prevención, defensa, recuperación o control y seguimiento del emplazamiento.

4.2 ETAPAS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

La Figura 3 muestra las etapas que, en general, marcan la actuación sobre un suelo potencialmente contaminado, desde su identificación como tal, hasta la intervención en el mismo a través de la implantación de las medidas oportunas, pasando por su investigación. En lo referente a ésta, el esquema adoptado refleja un enfoque progresivo articulado en dos fases:

- La Investigación Exploratoria
- La Investigación Detallada

La figura indica las principales actividades y tareas a desarrollar en cada fase de investigación, así como la calificación del emplazamiento a lo largo del proceso y los criterios adoptados, cuya aplicación determina el paso de una fase a otra.

Un elemento clave de este proceso es la caracterización de la contaminación del suelo, para lo cual se requiere, en aras de la optimización del resultado, de un diseño de muestreo específico y adecuado al caso en estudio, fijando para cada etapa de la investigación un objetivo concreto.

En los siguientes epígrafes se presentan los elementos básicos que caracterizan cada una de las fases de investigación.

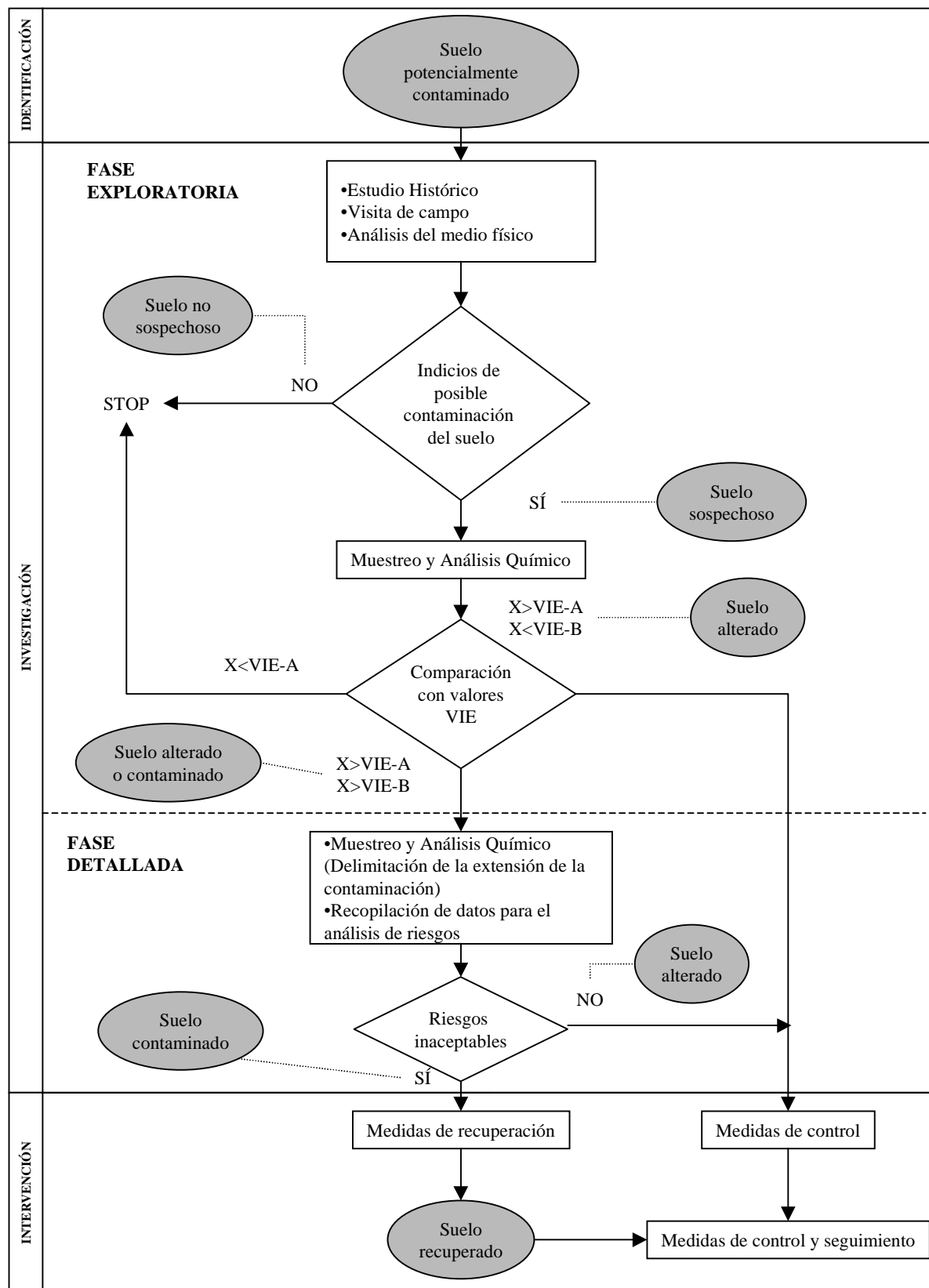


Figura 3: Esquema general de las etapas de actuación en suelos contaminados

4.2.1 Investigación Exploratoria

Esta primera fase de investigación corresponde actualmente al conjunto de trabajos comprendidos bajo las denominaciones Investigación Preliminar e Investigación Exploratoria de la estrategia descrita en la anterior edición del Manual Práctico (1994). Así pues, cabe distinguir dos subfasas dentro de la actual Investigación Exploratoria, cuyos objetivos y actividades se describen a continuación.

En primer lugar, se encuentran los trabajos dirigidos a confirmar o desechar los indicios de una posible contaminación del suelo en el emplazamiento. En esencia, dichos trabajos comprenden la obtención de datos históricos sobre las actividades desarrolladas en el emplazamiento, así como de datos sobre las características relevantes del medio físico en que se ubica aquél. La obtención de la información antes señalada requiere además una visita al emplazamiento. Como resultado de estas tareas se debe elaborar un modelo conceptual inicial de la problemática del emplazamiento que incluya, entre otras cuestiones, una hipótesis preliminar acerca de los posibles contaminantes presentes y su distribución espacial.

La evaluación de los resultados de estos trabajos puede conducir a la conclusión de que no existen indicios fundados de una posible afección del suelo. En tal caso, se paralizará el proceso de investigación, clasificando el emplazamiento como no sospechoso de estar contaminado.

No obstante, en la mayor parte de los emplazamientos será necesario recurrir a la toma de muestras y a su análisis para poder obtener resultados concluyentes acerca de la calidad del suelo. Estos trabajos (que en algunos casos puede ser necesario complementar con otros tendentes a determinar características básicas del medio físico que condicionan las posibilidades de migración de la contaminación) persiguen, por una parte, confirmar la hipótesis de presencia y distribución de la contaminación y, por otra, obtener datos suficientes para permitir el diseño óptimo de la siguiente fase de investigación, en los casos que se revele necesaria.

Los resultados de los análisis efectuados en las muestras de suelo tomadas en el emplazamiento son determinantes para la evaluación en esta fase. Así, como norma general, si ninguna de las concentraciones de las sustancias o grupos de sustancias investigadas como posibles contaminantes supera el nivel de referencia VIE-A (ver documento *Calidad del suelo: Valores Indicativos de Evaluación: VIE-A, VIE-B, VIE-C*), el proceso de investigación se da por finalizado, clasificando el emplazamiento como no sospechoso.

Si, por el contrario, la concentración de alguna de las sustancias superase el nivel VIE-A pero ninguna superase el nivel VIE-B, entonces sería necesario implantar medidas de defensa para prevenir una ulterior contaminación, así como, en algunos casos, medidas de control para hacer un seguimiento de la evolución de la misma.

En caso de que los resultados de esta fase confirmasen la existencia de un posible riesgo significativo para la salud humana o los ecosistemas (manifestado por concentraciones de alguna sustancia superiores a VIE-B), se deberá proceder a ejecutar la siguiente fase de investigación (Investigación Detallada).

Objetivos de la Investigación Exploratoria
<ul style="list-style-type: none">● Recopilar datos históricos que proporcionen indicios fundados sobre la alteración de la calidad del suelo● Elaborar un modelo conceptual inicial de la problemática del emplazamiento, incluyendo una hipótesis sobre posibles contaminantes y su distribución espacial● Confirmar la presencia de contaminación, acotando la lista de contaminantes sospechosos y su posible distribución● Distinguir subáreas o estratos diferenciables dentro de la zona de estudio

4.2.2 Investigación Detallada

El objetivo de la Investigación Detallada es recabar información suficiente para realizar la evaluación de los riesgos actuales y futuros derivados de la contaminación detectada en el emplazamiento. Algunos de los aspectos esenciales a este respecto son la caracterización espacial (horizontal y vertical) y temporal de la contaminación y la evaluación de las posibilidades de migración de la misma dentro y fuera del emplazamiento.

La toma de muestras de suelos y aguas (así como de otros medios, cuando se estime preciso) y su posterior análisis constituyen actividades fundamentales de esta fase de investigación, que es la más intensa a este respecto.

La evaluación de riesgos se configura como la herramienta clave dentro de la Investigación Detallada de cara a tomar decisiones sobre las actuaciones que es preciso acometer en el emplazamiento investigado.

Si las conclusiones de dicha evaluación determinan la existencia de riesgos inaceptables, será necesario implantar medidas de recuperación tendentes a reducir los riesgos hasta niveles aceptables. El tipo de medidas, así como la urgencia de su ejecución, se decidirán teniendo en cuenta factores de índole socioeconómica y las mejores tecnologías disponibles. En general, las medidas de recuperación irán acompañadas de otras de control y seguimiento de la efectividad de aquéllas.

Si, como consecuencia de la evaluación, los riesgos son considerados aceptables, será necesario implantar, en todo caso, medidas de defensa y cuando se estime preciso, medidas de control y seguimiento de los niveles de contaminación.

No obstante lo anterior, la superación por parte de algún contaminante del valor VIE-C establecido para la protección de los ecosistemas, es motivo suficiente para justificar la necesidad de adoptar medidas de recuperación en el emplazamiento.

Objetivos de la Investigación Detallada
<ul style="list-style-type: none">● Caracterizar la naturaleza, concentración y extensión de la contaminación en el emplazamiento● Ajustar el modelo conceptual previo del emplazamiento● Recabar los datos precisos para efectuar la evaluación de riesgos● Evaluar los riesgos que plantea el emplazamiento y el tipo de medidas que, en consecuencia, haya que adoptar

5. PRINCIPIOS GENERALES DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

La experiencia acumulada en estudios de investigación de la calidad del suelo ha dado lugar al actual esquema de estrategia de investigación, que contempla dos fases (la Investigación Exploratoria y la Investigación Detallada), cuya ejecución secuencial permite un acercamiento gradual a la problemática de cada emplazamiento, garantizando la optimización de los recursos (materiales y humanos) asignados a cada caso.

En general, los trabajos de investigación de la contaminación del suelo abarcan un conjunto de tareas, algunas de las cuales son comunes, al menos en su concepto, a las dos fases de investigación mencionadas, mientras que otras son específicas de cada una de ellas. El presente capítulo desarrolla los principios que deben regir la ejecución de las tareas comunes a ambas fases de investigación, que se concretan en las siguientes:

- Diseño de la estrategia de investigación
- Preparación de los trabajos de campo
- Toma de muestras para análisis en laboratorio
- Ejecución de análisis in situ
- Ejecución de otras investigaciones y ensayos
- Realización de análisis en laboratorio

5.2 DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

Antes de iniciar cualquier trabajo de investigación en un emplazamiento es necesario definir de la forma más precisa posible la estrategia de investigación a seguir. El diseño de una estrategia de investigación acorde con los objetivos de la misma y con las características del emplazamiento constituye un elemento esencial para optimizar los recursos asignados a la investigación en relación con los resultados de la misma.

La estrategia de investigación comprende una serie de aspectos que pueden agruparse en los siguientes:

- Estrategia de muestreo de los medios a investigar
- Programa de análisis químico de las muestras obtenidas
- Plan de seguridad, con la definición de las medidas que permitan gestionar anticipadamente los riesgos inherentes a todo trabajo de investigación

5.2.1 Diseño de la estrategia de muestreo

El objetivo del diseño del muestreo es asegurar la obtención de información relevante de acuerdo con los objetivos de cada fase de investigación y con una fiabilidad conocida. Dicha información se referirá, en primer lugar, a la existencia y concentración en el emplazamiento de determinados contaminantes y, en segundo lugar, a la delimitación de las subáreas que puedan diferenciarse en función del tipo y grado de contaminación esperado.

La rentabilización de la investigación (coste mínimo con fiabilidad máxima) y la aproximación por etapas, determinan que la información previa disponible juegue un papel

preponderante en la optimización del diseño; de ahí la necesidad de hacer especial hincapié en la obtención de esta información.

No existe una única fórmula para el diseño del programa de muestreo, ya que la diversidad de emplazamientos determina la necesidad de ajustar a cada caso la estrategia a seguir. Será el modelo conceptual esbozado con la información obtenida a la finalización de las primeras tareas de la Investigación Exploratoria (estudio histórico, análisis del medio físico y visita de campo) el que sirva para la optimización del diseño del muestreo en lo que se refiere a sus aspectos esenciales.

5.2.1.1 Principios generales

Los elementos que se deben contemplar en el diseño de toda estrategia de muestreo son los mencionados en el cuadro adjunto.

Factores a considerar en el diseño de la estrategia de muestreo
a) Medios a muestrear
b) Número de etapas de muestreo
c) Localización de los puntos de muestreo (modelo de distribución)
d) Número de puntos de muestreo
e) Profundidad de muestreo
f) Número de muestras por punto de muestreo
g) Tamaño de la muestra
h) Técnicas de muestreo

A continuación se desarrollan los aspectos del diseño de la estrategia de muestreo que, por su carácter genérico, son aplicables a cualquier medio y fase de investigación.

a. Medios a muestrear. Considerando que para la evaluación de riesgos (objetivo final de la investigación de emplazamientos contaminados) se precisan no sólo datos relativos a la concentración de contaminantes en el suelo sino también en los medios de contacto y dispersión de los contaminantes y en los receptores del riesgo, puede ser necesario muestrear todos o algunos de los siguientes medios:

- suelo y polvo
- aguas superficiales
- agua del suelo (zona no saturada) y subterránea
- fases líquidas no acuosas (por ejemplo, hidrocarburos)
- aire (del suelo o de la atmósfera general del emplazamiento)
- vegetación y fauna (incluyendo especies de aprovechamiento agrícola y ganadero)
- población humana (sangre, orina, cabello, dientes, etc.)

Los usos del emplazamiento y los objetos a cuya protección se dirija la investigación determinarán los medios a muestrear en cada caso.

b. Número de etapas de muestreo. El número de etapas de muestreo a ejecutar en cada fase de investigación dependerá fundamentalmente de los resultados de las etapas precedentes, de la exactitud con que se haya fijado la estrategia de investigación y de la disponibilidad de tiempo para llevar a cabo el estudio. Básicamente existen dos formas de afrontar el muestreo:

- **Muestreo en una etapa.** Esta aproximación es adecuada para aquellos casos en los que el objetivo de la investigación está perfectamente definido, no existiendo posibilidad de modificaciones en función de los resultados que se van obteniendo. Es la estrategia que, en general, se aplica en la Investigación Exploratoria.
- **Muestreo en etapas sucesivas.** Esta aproximación permite modificar el diseño del muestreo en función de los resultados obtenidos en las etapas anteriores incluidas dentro de la misma fase de investigación. La flexibilidad que proporciona el muestreo en etapas sucesivas, junto con el grado de ajuste a los objetivos que permite, hacen que ésta sea la aproximación más adecuada en muchos casos. Es la estrategia que, en general, se aplica en la Investigación Detallada.

Por otra parte, en algunos casos (como, por ejemplo, terrenos que generan lixiviados o emiten gases tóxicos o inflamables) puede ser necesario efectuar tomas de muestras a intervalos de tiempo regulares durante los cuales pueden producirse variaciones en las concentraciones de contaminantes.

c. Localización de los puntos de muestreo. La localización de los puntos de muestreo depende en gran medida tanto del medio a muestrear como de los objetivos particulares de la fase de investigación en la que se va a producir la toma de muestras. Por tanto, las recomendaciones al respecto se desarrollan en epígrafes posteriores.

d. Número de puntos de muestreo. El número de puntos de muestreo está determinado fundamentalmente por el objetivo de la investigación, dependiendo en su conjunto de factores como el tamaño del emplazamiento, la calidad de la información previa disponible, la hipótesis de distribución espacial de la contaminación y el grado de confianza requerido. Así mismo, para una fase de investigación dada, el número de puntos de muestreo varía mucho, en general, en función del medio que se pretende muestrear.

En ocasiones, pueden presentarse restricciones de carácter económico o temporal que obliguen a reducir el número de puntos de muestreo en uno o varios de los medios objeto de investigación. En tal caso, se recomienda adoptar propuestas razonables elaboradas en base al juicio experto o, si es posible, diseñar un muestreo flexible por etapas que facilite la incorporación de modificaciones en función de los resultados previos obtenidos.

e. Profundidad de muestreo. La distribución de los contaminantes en los distintos medios objeto de investigación varía tanto en sentido horizontal como vertical. La toma de muestras en un mismo punto de muestreo a diferentes profundidades debe decidirse a la vista de los objetivos particulares de la fase de investigación y teniendo en cuenta la movilidad de los contaminantes implicados en cada medio concreto a muestrear.

Como pauta general, la toma de muestras a distintas profundidades en un mismo punto de muestreo es práctica habitual durante la Investigación Detallada en lo que se refiere al suelo y las aguas subterráneas, siendo infrecuente en el muestreo de otros medios.

f. Número de muestras por cada punto de muestreo. Resulta difícil establecer *a priori* el número de muestras que habrán de tomarse en cada punto de muestreo para caracterizar la contaminación en el sentido vertical. Una vez más, dependerá del medio concreto a

muestrear y de la movilidad en el mismo de los contaminantes implicados. En epígrafes posteriores se proporcionan algunas recomendaciones a este respecto, en particular para el suelo y las aguas subterráneas.

g. Tamaño de la muestra. El tamaño de la muestra vendrá determinado por dos factores: en primer lugar, deberá ser el necesario para considerarse representativo de la composición del medio en el que ha sido tomada; en segundo lugar, deberá satisfacer las exigencias del análisis específico, para lo que habrá que consultar al analista.

Como norma general, se considera necesario tomar un volumen de muestra superior al estrictamente necesario, en previsión de que la evolución de la investigación exigiera la realización de determinaciones analíticas adicionales a las inicialmente previstas (análisis de contraste, análisis de muestras individuales integrantes de muestras mixtas, etc.). A este respecto, conviene recordar que siempre es más barato tomar una cantidad de muestra en exceso que volver a ejecutar la toma de muestras por disponer de insuficiente cantidad para realizar análisis adicionales.

h. Técnicas de muestreo. La elección de las técnicas de perforación y de toma de muestras vendrá determinada por los siguientes aspectos:

- accesibilidad y orografía del terreno
- medios a muestrear
- tipo de terreno y materiales a muestrear
- columna estratigráfica, litológica y profundidad del nivel freático
- presencia de soleras de hormigón
- tamaño de la muestra
- necesidad de instalación de pozos de control
- naturaleza de los compuestos a investigar

Para una campaña de muestreo dada, enmarcada en una determinada fase de investigación de un emplazamiento, el plan de muestreo debe incluir, al menos, los aspectos que se citan en el cuadro adjunto.

Contenido mínimo del plan de muestreo de un emplazamiento contaminado
<ul style="list-style-type: none">- Descripción del objetivo de la campaña de muestreo- Medios a muestrear- Localización de los puntos de muestreo en un mapa del emplazamiento a escala adecuada, proporcionando una estimación de la profundidad de muestreo- Número estimado de muestras y profundidad aproximada de cada una, incluyendo muestras tomadas fuera del emplazamiento (para determinar el grado de dispersión o el nivel de fondo local), duplicados y blancos (de limpieza, de viaje, etc.)- Tamaño de las muestras- Técnicas de muestreo a utilizar

Además de las consideraciones recogidas en este Manual Práctico, se recomienda consultar la *Guía Metodológica de Estudio Histórico y Diseño de Muestreo* para obtener información más detallada acerca del diseño de la estrategia de muestreo en cada fase de investigación y medio. Así mismo, han de tenerse en cuenta los principios de aseguramiento de la calidad descritos en la *Guía Metodológica de Análisis Químico*.

5.2.1.2 Estrategia de muestreo del suelo

La estrategia de muestreo del suelo se encuentra estrechamente relacionada con la hipótesis elaborada acerca de la distribución de la contaminación y, por tanto, es específica para cada fase de investigación. En todo caso, la estrategia a seguir debe asegurar la obtención de información que permita confirmar o matizar dicha hipótesis, así como determinar la existencia y concentración de los contaminantes implicados.

Se incluyen a continuación algunas consideraciones sobre aquellos factores que necesariamente y de forma específica deben contemplarse en el diseño de la estrategia de muestreo del suelo.

5.2.1.2.1 Localización de los puntos de muestreo

La localización de los puntos de muestreo se basa fundamentalmente en la información previa disponible que permite establecer las hipótesis relativas a la distribución espacial de la contaminación, tanto en sentido horizontal como vertical. Esta información preliminar permitirá definir si el muestreo debe ser **simple** (es decir, homogéneo en toda la extensión del emplazamiento) o **estratificado**, con subáreas caracterizadas por hipótesis diferentes de distribución espacial (ver Figura 4).

La localización de los puntos de muestreo del suelo dentro de las diferentes áreas o subáreas se adapta habitualmente a uno de los siguientes modelos (ver Figura 4):

- a) **Distribución al azar** de los puntos de muestreo que como su propia denominación indica, localiza los puntos de muestreo mediante la utilización de técnicas que definen posiciones aleatorias en toda la superficie a muestrear.
- b) **Distribución sistemática** de los puntos de muestreo, que a su vez puede subdividirse en:
 - b.1) Sistemática al azar.** Cuando no existe suficiente información histórica, el emplazamiento puede ser dividido en subáreas de superficie similar, dentro de las cuales se aplica un sistema aleatorio de localización de los puntos de muestreo. Este método combina las ventajas del muestreo al azar y las de las estrategias sistemáticas, por lo que es utilizado en múltiples ocasiones.
 - b.2) Sistemática regular.** Este método sitúa los puntos de muestreo sobre una malla cuyo espaciado dependerá del tamaño del emplazamiento y del grado de fiabilidad requerido, entre otros factores. Las mallas rectangulares y las alternadas o al tresbolillo son las más habitualmente utilizadas en la caracterización de suelos contaminados.
 - b.3) Sistemática en gradiente.** Cuando se sospecha una distribución heterogénea en gradiente de la contaminación, se recomienda tomar las muestras de suelo a lo largo de ejes trazados en la dirección de máxima variación de la concentración de los contaminantes.

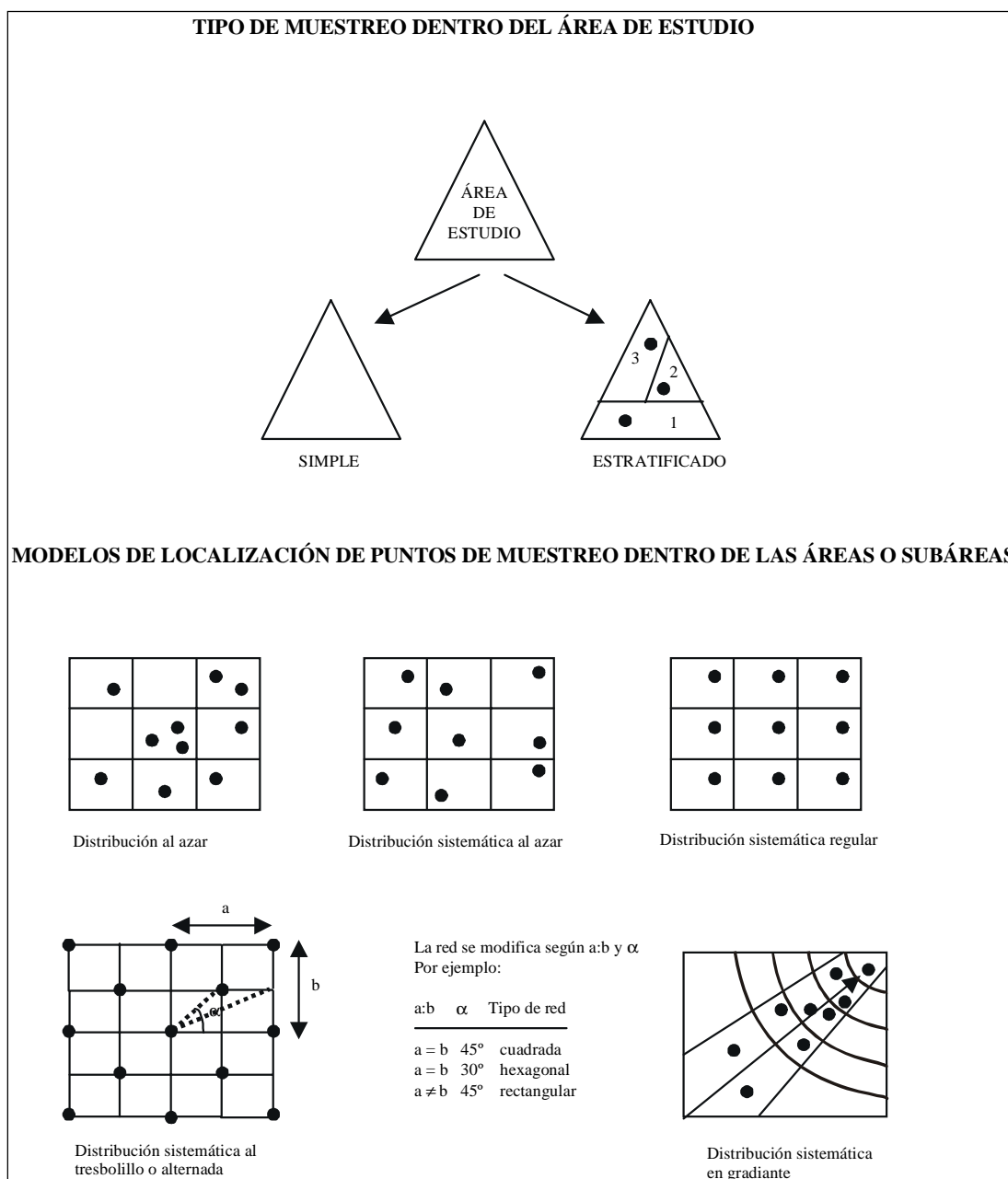


Figura 4: Tipos de muestreo y modelos de localización de puntos de muestro del suelo

5.2.1.2.2 Profundidad de muestreo

La elección de las muestras de suelo debe considerar la distribución de los contaminantes tanto el plano horizontal como el vertical. La profundidad de muestreo depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- naturaleza de la contaminación
- tipo de suelo
- objeto de protección
- uso actual o previsto del emplazamiento

En general, resulta complicado establecer a priori la profundidad mínima a alcanzar para garantizar la ausencia de contaminación. No obstante, es posible proporcionar algunas

indicaciones partiendo de la información existente sobre el uso del emplazamiento y los objetos de protección, de forma que se puedan obtener resultados significativos para el posterior análisis de riesgos.

Las profundidades de muestreo del suelo recomendadas en relación con el objeto a proteger y el uso del emplazamiento se indican en el cuadro adjunto.

Uso del suelo	Objeto a proteger/Profundidad de muestreo		
	Organismos del suelo	Plantas	Agua
Cultivos hortícolas	0-máx 20 cm	Horizonte Ap o profundidad de arado (0-30 cm)	0-30 cm
Prado/erial	Horizonte Ah/0-10 cm	Horizonte Ah/0-10 cm	0-30 cm
Masa arbustiva	Horizonte Ah/0-10 cm	Rizosfera (0-30 cm)	0-30 cm
	Ser humano		
Superficies urbanas y de recreo sin vegetación	0-2 cm		
	0-10 cm		
Superficies urbanizadas y de recreo con vegetación	0-5 cm		
	5-10 cm		
Huertas	0-10 cm		

5.2.1.2.3 Número de muestras por cada punto de muestreo

Aunque es difícil establecer *a priori* el número de muestras de suelo que habrán de tomarse en cada punto de muestreo para caracterizar la contaminación en el sentido vertical, puede ser de gran utilidad al respecto la reinterpretación de los datos de cualquier fuente (principalmente información geotécnica). Cuando no se posea esta información es recomendable ejecutar un sondeo de referencia (ligero) que permita describir de forma aproximada la estructura del suelo.

En todo caso, y como norma general, se recomienda tomar al menos dos muestras en cada perforación aunque, siempre que sea posible detectar estratos diferenciados, cada uno de ellos deberá ser muestreado independientemente.

5.2.1.3 Estrategia de muestreo de las aguas subterráneas

La investigación de la contaminación del suelo debe considerar sistemáticamente las afecciones que se pueden producir en medios íntimamente relacionados con aquél, como las aguas subterráneas. Para ello, en cada fase de investigación es preciso obtener información suficiente (y acorde con los objetivos de la fase en cuestión) sobre dos aspectos básicos:

- el contexto hidrogeológico del emplazamiento y su entorno;
- la calidad de las aguas subterráneas potencialmente afectadas

La investigación de la calidad de las aguas subterráneas exige la toma de muestras y análisis de las mismas, que debe realizarse de acuerdo con una estrategia predefinida. En la definición de esta estrategia de muestreo hay que tener en cuenta no sólo las características de los focos de contaminación sino también el previsible comportamiento de los distintos contaminantes implicados en el contexto hidrogeológico del emplazamiento y su entorno.

5.2.1.3.1 Contexto hidrogeológico

En general, el conocimiento del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento requiere obtener información sobre los siguientes aspectos:

- a. **Aspectos geológicos.** El reconocimiento geológico tiene por objeto identificar las diferentes unidades estratigráficas presentes en el subsuelo, así como su disposición, con el fin de evaluar la posibilidad de migración de los contaminantes. Los resultados deben ilustrarse en forma gráfica (planta y perfil) a la escala adecuada al caso.
- b. **Aspectos hidrogeológicos.** Los más destacables son los siguientes:
 - el régimen de flujo regional de las aguas subterráneas, identificando las zonas de recarga y descarga, el comportamiento hidrogeológico básico de cada formación (acuífero, acuitardo, etc.) y las posibles relaciones hidráulicas entre los acuíferos identificados y otros sistemas hídricos relacionados (ríos, lagos, embalses, etc.);
 - el régimen local de flujo (velocidad y sentido) de las aguas subterráneas, ilustrado en planta y perfil, para las diferentes unidades hidrogeológicas, incluyendo los coeficientes de permeabilidad (K) y los gradientes hidráulicos;
 - el análisis de la influencia que el foco contaminante (o, en general, cualquier instalación superficial o subsuperficial) puede tener sobre el flujo de las aguas subterráneas;
 - la evaluación de los impactos previsibles sobre las aguas superficiales y subterráneas debidos a la migración de la contaminación desde el foco.
- c. **Aspectos hidrogeoquímicos.** Con vistas a determinar la influencia del emplazamiento investigado en la calidad de las aguas subterráneas, es preciso conocer las características químicas naturales que dichas aguas tienen en la zona, en lo relativo tanto a componentes mayoritarios (aniones, cationes, etc.) como minoritarios. Los valores obtenidos servirán para caracterizar las concentraciones de base, usadas como referencia para la posterior delimitación de las afecciones debidas al emplazamiento.

Además de la oportuna consulta y recopilación de datos bibliográficos, para obtener la información que permita caracterizar el contexto hidrogeológico del emplazamiento pueden utilizarse diferentes métodos y técnicas, cuya aplicación puede estar o no relacionada con la ejecución de otros trabajos de campo (en particular, ejecución de sondeos para toma de muestras de suelo, instalación de pozos de control de aguas subterráneas, etc.), cuestión que es imprescindible prever en el diseño conjunto de dichos trabajos. A este respecto, se recomienda la consulta de la *Guía Metodológica de Toma de Muestras* y de la *Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y Seguimiento de Contaminantes en el Suelo y en las Aguas Subterráneas*.

Entre las técnicas más habituales destinadas a obtener información geológica e hidrogeológica cabe citar el reconocimiento de la parte superficial del suelo mediante catas de poca profundidad, la realización de investigaciones geofísicas, los sondeos de reconocimiento, los ensayos de permeabilidad y bombeo, los ensayos con trazadores, etc. La obtención de información hidrogeoquímica suele pasar por el muestreo y análisis de puntos de agua, bien existentes (pozos, manantiales, etc.), bien habilitados a tal efecto.

5.2.1.3.2 Muestreo de las aguas subterráneas

El diseño del muestreo de las aguas subterráneas en una determinada fase de investigación debe responder a los objetivos establecidos para la misma y tener en cuenta el contexto hidrogeológico del emplazamiento y su entorno. En todo caso, tal diseño ha de garantizar la representatividad de las muestras, para la cual son determinantes tanto su ubicación como las técnicas y equipos de muestreo a aplicar.

En general, pueden ser objeto de muestreo tanto las aguas subterráneas de la zona no saturada como las de la zona saturada.

El movimiento de los contaminantes en la **zona no saturada** es de capital importancia en la investigación de la contaminación: por una parte, es en ella dónde los procesos físicos, químicos y biológicos son más activos y, por otra, esta zona constituye la primera barrera a la progresión de la contaminación hacia la zona saturada, pudiendo contener paquetes de materiales de muy baja permeabilidad que juegan un papel primordial en la migración de la contaminación (ver *Guía Metodológica de Toma de Muestras y Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y Seguimiento de Contaminantes en el Suelo y en las Aguas Subterráneas*).

El alcance del muestreo en la zona no saturada depende de las características del emplazamiento, su comportamiento hidrogeológico y los objetivos marcados para la fase de investigación en cuestión. En general, se acomete sólo en investigaciones detalladas o complementarias, con el fin de obtener información adicional a la disponible sobre las afecciones de la zona saturada.

Siendo la delimitación del penacho de contaminación de las aguas subterráneas de la **zona saturada** uno de los objetivos principales de la investigación de un suelo potencialmente contaminado, el diseño de la estrategia de muestreo de dichas aguas constituye un elemento esencial para garantizar un diagnóstico fiable.

A este respecto, la consecución de muestras representativas de la distribución de los contaminantes en este medio es una condición básica que exige localizar correctamente, en el espacio y en el tiempo, las muestras a partir del conocimiento disponible sobre el flujo de las aguas subterráneas y el comportamiento en las mismas de los contaminantes implicados.

La localización espacial de las muestras tiene dos componentes: ubicación en planta y profundidad de la muestra. Para ambos, los criterios de diseño están fuertemente condicionados, entre otros factores, por los objetivos de la investigación (confirmación de contaminación o delimitación de la misma).

En términos generales, cuando se trate de confirmar presencia o ausencia de contaminantes (objetivo implícito en la fase de Investigación Exploratoria), puede adoptarse un número reducido de puntos de muestreo en pozos con amplia longitud de rejilla (cada muestra es representativa de toda la columna de agua), mientras que en investigaciones de delimitación espacial de la contaminación (Investigación Detallada), el número de puntos de muestreo se incrementará sensiblemente, debiéndose tomar muestras a varias profundidades en cada punto.

Estos aspectos condicionan además la posibilidad de aprovechar pozos o piezómetros existentes en el emplazamiento o sus alrededores, así como el diseño de los nuevos pozos de control a instalar y las técnicas y equipos de muestreo apropiados, por lo que es imprescindible un enfoque integrado a la hora de concretar la estrategia.

Un elemento añadido a los anteriores es la variación temporal de la distribución de los contaminantes en las aguas subterráneas, que (sobre todo para la zona saturada) debe considerarse en el diseño de la estrategia de muestreo. En general, será preciso acometer varias campañas de muestreo a lo largo del tiempo para obtener información fiable a este respecto. El número de puntos de muestreo, muestras por punto y frecuencia del muestreo vendrán determinados por las características hidrogeológicas del emplazamiento y su entorno, así como por las características de los contaminantes implicados (movilidad, degradabilidad, etc.).

Para obtener información detallada referente a estas cuestiones se recomienda la consulta de la *Guía Metodológica de Toma de Muestras* y de la *Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y Seguimiento de Contaminantes en el Suelo y en las Aguas Subterráneas*.

5.2.1.4 Estrategia de muestreo del aire intersticial del suelo

La toma de muestras de fase gaseosa abarca tanto el aire intersticial del suelo como el aire ambiente. El muestreo de aire ambiente posee condicionantes y factores específicos, efectuándose en caso de existir fundadas sospechas de afección a la salud humana como consecuencia de la migración de contaminantes en fase gaseosa desde el foco a zonas sensibles (por ejemplo, ambientes interiores de edificios) o en caso de producirse significativas emisiones de contaminantes gaseosos a la atmósfera como consecuencia de reacciones químicas en depósitos incontrolados de ciertos residuos.

En la zona no saturada del suelo, los contaminantes se distribuyen en tres fases: absorbidos en las partículas de suelo, disueltos en el agua y disueltos en el aire intersticial. La distribución entre las fases citadas depende de las características físico-químicas del contaminante en cuestión, así como de las del propio suelo. En los casos donde la contaminación incluye la presencia de sustancias volátiles y/o semivolátiles (por ejemplo hidrocarburos ligeros, disolventes clorados, etc.), buena parte de aquélla se aloja en fase gaseosa.

En estos casos, suele incluirse en el programa de investigación el muestreo y análisis del aire intersticial del suelo, ya que ofrece una aproximación a la entidad y distribución de la contaminación del suelo propiamente dicho (e incluso de las aguas subterráneas, si se encuentran próximas a la superficie del terreno). De esta forma se puede optimizar el posterior muestreo del suelo, orientándolo en función de los resultados de la investigación del aire intersticial. No obstante, hay que tener en cuenta que a menudo es difícil establecer buenas correlaciones entre las concentraciones de un contaminante en el aire intersticial y en la fase sólida del suelo, por lo que la información aportada por la investigación del primero debe considerarse como orientativa para desarrollar la del segundo.

En cualquier caso, la efectividad de esta técnica depende de las características específicas de los contaminantes implicados y requiere un suelo de suficiente porosidad para permitir la extracción de las muestras.

Un caso particular de investigación del aire intersticial del suelo es el de los vertederos dónde se han depositado residuos orgánicos degradables y/o con componentes volátiles. En estos vertederos, la toma de muestras de aire intersticial aporta información útil para acotar las zonas activas y efectuar una evaluación preliminar de las posibilidades de migración de los gases al entorno del emplazamiento, con los consecuentes riesgos de inhalación y/o explosión.

Salvo que existan razones que aconsejen lo contrario, el muestreo del aire intersticial suele diseñarse trazando una malla sensiblemente regular sobre la planta del emplazamiento. Las dimensiones de esta malla dependen de los objetivos concretos de la investigación, la extensión del propio emplazamiento y las características del suelo.

El muestreo del aire intersticial se extiende a profundidades que no suelen superar los 5 metros, aunque los objetivos concretos de la investigación, las características del suelo y de los contaminantes implicados pueden aconsejar limitar el muestreo a profundidades menores (como, por ejemplo, para evaluar las emisiones procedentes de vertederos). En todo caso, no es aconsejable muestrear el aire intersticial a profundidades inferiores a 0,5 metros.

Por lo expuesto anteriormente, el muestreo del aire intersticial suele tener mayor utilidad durante las primeras fases de investigación de un emplazamiento, es decir, dentro de la Investigación Exploratoria.

La *Guía Metodológica de Toma de Muestras* contiene información adicional para orientar el diseño del muestreo del aire intersticial del suelo.

5.2.1.5 Estrategia de muestreo de otros elementos

Los medios contemplados en los epígrafes anteriores (suelo, aguas subterráneas y aire intersticial del suelo) son los que habitualmente concentran gran parte de las labores de toma de muestras dentro de la investigación de suelos contaminados. No obstante, en ocasiones es necesario contemplar y diseñar el muestreo de otros elementos, siendo los casos más frecuentes a este respecto los siguientes:

- **La investigación de vertederos u otros emplazamientos en los que se han depositado residuos.** En estos emplazamientos suele procederse al muestreo de residuos y lixiviados, a fin de obtener datos que permitan caracterizar la fuente del problema. Por su propio objetivo, el muestreo de estos elementos tiene lugar preferentemente en las primeras fases de investigación del emplazamiento. La *Guía Técnica de diseño de planes de actuación en vertederos de residuos industriales* proporciona criterios para el diseño del muestreo de dichos elementos, en especial durante la Investigación Exploratoria.
- **La investigación de ruinas industriales,** en las cuales pueden estar presentes residuos, materiales o instalaciones abandonadas, así como elementos constitutivos de edificios afectados por la contaminación. En este caso, el muestreo de los mismos tiene como

finalidad obtener información sobre sus características que permita, por un lado, identificar focos de contaminación y, por otro lado, decidir la posterior gestión de los residuos en el marco de una actuación de recuperación. El cumplimiento del primer objetivo citado (y el muestreo respectivo) corresponde esencialmente a la Investigación Exploratoria, mientras que el segundo se aborda habitualmente durante la Investigación Detallada y las investigaciones complementarias previas a la redacción del proyecto de recuperación. La *Guía Técnica de criterios ambientales para la recuperación de ruinas industriales* contiene recomendaciones específicas para el diseño del muestreo y caracterización de materiales abandonados y elementos constitutivos de edificios.

- La investigación de emplazamientos en los que existan indicios suficientes de afección de los ecosistemas y/o de la salud humana a través de la cadena trófica, en cuyo caso se incluirá el muestreo de aquellos elementos (vegetales, pastos, etc.) potencialmente afectados, con el fin de obtener la información necesaria para aplicar la metodología de evaluación de riesgos. En consecuencia, este tipo de muestreo tiene lugar preferentemente en el seno de la Investigación Detallada.

El número de puntos de muestreo y muestras de los elementos señalados, así como la localización de las mismas, dependen en gran medida de las características específicas de cada emplazamiento y fase de investigación. Como principio general para el diseño del muestreo, cabe indicar que debe guiarse por el objetivo de obtener datos suficientemente representativos del objeto a caracterizar, dentro de las limitaciones temporales y presupuestarias inherentes a la investigación.

5.2.2 Diseño del programa de análisis químico

El diseño de un programa de análisis químico en el ámbito de la investigación de la contaminación del suelo debe desarrollarse fundamentalmente de acuerdo a la fase de investigación en curso. El objetivo de la etapa de investigación junto con la información previa disponible determinarán la estrategia analítica, que requiere de la consideración de los siguientes aspectos:

- Selección de los parámetros químicos
- Selección de los métodos analíticos

El programa de análisis químico, en lo que respecta a la selección de los parámetros químicos que han de ser determinados, debe ajustarse al objetivo de cada fase de investigación y efectuarse en base a la información existente así como a las hipótesis establecidas. No así la selección de métodos analíticos que, si bien estará influida por el grado de exactitud requerida por cada etapa de estudio, responde generalmente a la disponibilidad de, por una parte, la normativa adecuada y, por otra parte, el equipamiento exigido para la aplicación de la norma.

De acuerdo a las necesidades prácticas, los procedimientos de medida en materia de análisis químico en emplazamientos contaminados pueden dividirse en los siguientes grupos:

a. Medidas de campo

En la mayoría de las investigaciones, las muestras son enviadas al laboratorio pero en algunos casos se recomienda la aplicación de ensayos in-situ, de naturaleza cuantitativa o semicuantitativa, cuyos resultados, no obstante, no pueden ser utilizados para el posterior análisis de riesgos. La determinación y evaluación inicial de contaminantes, propiedades del suelo o el análisis rápido del suelo durante una excavación, son algunos de los casos en los que se pueden efectuar ensayos in-situ.

b. Métodos globales

Los métodos de laboratorio de amplio espectro o globales son aquellos que se utilizan para la determinación de parámetros representativos de un grupo de sustancias que comparten propiedades similares en algún sentido (por ejemplo, aceite mineral, EOX o índice de fenoles). Estos métodos proporcionan una herramienta útil en las primeras fases de la investigación o cuando la información histórica resulta insuficiente para diseñar un programa detallado de análisis. Esta es una manera de determinar el tipo de contaminación presente evitando los altos costes que conllevaría una aproximación al problema en base a la cuantificación de contaminantes individuales. Este tipo de análisis, proporcionan únicamente una información aproximada acerca de la gravedad de la contaminación y no siempre es fácil valorar los resultados obtenidos.

c. Métodos para compuestos específicos

A pesar de la indudable utilidad de las medidas de campo y de los métodos globales, son las medidas de laboratorio para compuestos específicos las que aportan una mayor información cuantitativa a la investigación de la calidad del suelo.

En la actualidad existen publicados una gran variedad de métodos analíticos que permiten la determinación de los contaminantes investigados en las matrices de interés. No obstante, antes de seleccionar el método a utilizar habrá que comprobar que cumpla los siguientes requisitos:

- ser capaz de alcanzar un grado aceptable de exactitud y reproducibilidad;
- poseer un límite de detección apropiado para la cuantificación de concentraciones inferiores al nivel de referencia;
- tener una respuesta conocida a posibles especies interferentes;
- ser factible en términos de tiempo de realización y coste.

Para la realización de los análisis químicos, se recomienda aplicar métodos normalizados, aunque es posible la utilización de metodologías no estandarizadas, siempre y cuando hayan sido adecuadamente validadas. A este respecto, la *Guía Metodológica de Análisis Químico* proporciona información detallada acerca de los métodos de análisis disponibles en el marco de la protección del suelo y de aquellos recomendados para su aplicación en la Comunidad Autónoma del País Vasco.

Es importante recordar que el empleo de métodos normalizados de análisis no garantiza por sí solo la obtención de resultados de la calidad adecuada, entendida ésta como cercanía al

valor verdadero del contenido de analitos buscados. Puesto que los resultados erróneos pueden producirse por multitud de causas (efectos de matriz imprevistos en la muestra, mal funcionamiento y/o calibración del equipo utilizado, errores humanos, etc.) *es recomendable que el 10 % de las muestras sean tomadas por duplicado para un análisis de contraste en un laboratorio acreditado para la cuantificación de los analitos objeto de interés empleando la técnica analítica de referencia.*

Si bien los tres tipos de procedimientos indicados son comúnmente utilizados en la investigación de la contaminación, el alcance y calidad de los resultados determina la aplicabilidad de uno u otro método individual o conjuntamente.

5.2.3 Diseño del plan de seguridad

Los aspectos de seguridad en los trabajos de investigación y recuperación de suelos contaminados pueden y deben gestionarse de forma anticipada y estructurada a través de un enfoque integrado y de una planificación y seguimiento de actuaciones al respecto. A tal fin, se plantean dos instrumentos básicos: el Programa de Seguridad y el Plan de Seguridad. A efectos prácticos es el segundo el que debe elaborarse de forma específica para el programa de trabajo y emplazamiento a investigar y/o recuperar. En él se concretan y adaptan los términos del Programa de Seguridad a la vista de las características de los trabajos a realizar.

Los contenidos mínimos que debe contemplar y desarrollar un Plan de Seguridad se sintetizan en el siguiente cuadro.

Contenidos del Plan de Seguridad
1. Antecedentes del emplazamiento relevantes para la seguridad
2. Descripción del programa de trabajos a realizar
3. Evaluación de riesgos
4. Organización del personal en el trabajo
5. Organización espacial del trabajo
6. Medidas de seguridad colectiva
7. Equipos de protección individual
8. Formación y entrenamiento específico del personal
9. Procedimientos generales y específicos de trabajo
10. Instrucciones específicas para el manejo de materiales y equipos
11. Procedimientos de descontaminación
12. Control y seguimiento de condiciones ambientales
13. Plan de actuación en situaciones de emergencia
14. Programa de revisiones médicas

La evaluación de riesgos es uno de los ejes centrales de la gestión de la seguridad en trabajos específicos de investigación y recuperación de suelos contaminados y constituye un elemento esencial de los futuros Planes de Seguridad. El método simplificado de evaluación de riesgos en trabajos de investigación y recuperación de suelos contaminados se estructura en las siguientes etapas:

1. Identificación de situaciones de trabajo
2. Identificación de factores de riesgo relevantes para cada situación de trabajo
3. Identificación de riesgos específicos asociados a cada situación de trabajo
4. Evaluación de riesgos específicos asociados a cada situación de trabajo
5. Elaboración del diagnóstico de seguridad

Como consecuencia del diagnóstico de seguridad se deben definir actuaciones relativas a:

- **Aspectos personales y organizativos:** contemplan un conjunto de recomendaciones y requisitos cuyo objetivo es integrar los factores de índole personal (físicos, psicológicos, de formación, etc.) y organizativos (métodos y tipos de trabajo, exigencias temporales y plazos, turnos y ritmo de trabajo) de modo que para cada situación de trabajo el personal implicado sea el más adecuado, minimizando de este modo el riesgo de accidentes. No obstante este tipo de consideraciones tienen un carácter cualitativo y relativamente genérico, dependiendo su puesta en práctica de las características de cada trabajo de investigación.
- **Medidas de seguridad:** están destinadas a la reducción y/o eliminación de los riesgos que los trabajos en el emplazamiento puedan suponer para investigadores y trabajadores como colectividad, así como para terceras personas ajenas a la obra. Dentro de este grupo se contemplarán:
 - medidas generales, como control de acceso al emplazamiento o la organización y distribución de áreas especiales
 - medidas para el uso seguro de equipos y maquinaria
 - medidas a adoptar en actividades específicas
 - medidas ante riesgos específicos
 - procedimientos de descontaminación
- **Equipos de protección:** su objetivo es suministrar al usuario protección y/o aislamiento frente a peligros de origen físico, químico y biológico que pueden encontrarse en cualquier tipo de emplazamiento durante la realización de un trabajo de investigación o de recuperación de un suelo contaminado. Los equipos de protección pueden clasificarse en dos grandes grupos:
 - equipos de protección colectiva
 - equipos de protección individual (EPI)
- **Actuación en caso de emergencia:** para combatir eficazmente una situación de este tipo es esencial disponer de un Plan de Emergencia que permita anticiparse, protegiendo la salud de los trabajadores y de las personas ajenas al emplazamiento. En el Plan deben establecerse las pautas y procedimientos para responder a estas situaciones generalmente provocadas por causas relacionadas con los trabajadores o con las condiciones del lugar de trabajo. Es importante que el Plan de Emergencia contemple los siguientes aspectos:
 - personales
 - de formación
 - de comunicación (interna, externa)
 - organizativos (distancias de seguridad y refugios, rutas y procedimientos de evacuación)
 - equipos de emergencia
 - procedimientos de descontaminación de emergencia, etc.

Los aspectos relacionados con la protección de la salud y la seguridad de investigadores y trabajadores en emplazamientos contaminados están desarrollados en detalle en la *Guía Técnica de Seguridad para la Investigación y Recuperación de Suelos Contaminados*.

5.3 PREPARACIÓN DE LOS TRABAJOS DE CAMPO

La ejecución de los trabajos de campo diseñados en toda campaña de investigación de un emplazamiento contaminado requiere contemplar, con carácter previo al inicio de los mismos, una serie de aspectos prácticos esenciales para garantizar la ejecución de aquéllos de forma eficiente.

Se recomienda documentar en lo posible las tareas de preparación de los trabajos de campo, de modo que todos los miembros de los distintos equipos humanos implicados posean la información que precisan para cumplir sus funciones respectivas. Además, dicha documentación se incorporará posteriormente al informe de la investigación.

5.3.1 Aspectos generales

El documento descriptivo del plan de trabajos de campo debe reflejar sucintamente la forma de llevar a cabo la investigación en el campo y en el laboratorio, incluyendo al menos los siguientes aspectos:

- descripción del objetivo de la investigación, en particular del programa de muestreo y análisis
- mapa del área a investigar a escala adecuada
- medios a muestrear
- localización de los puntos de muestreo, incluyendo las profundidades a las que deben tomarse *a priori* las muestras
- técnicas requeridas para la perforación y la toma de muestras
- número estimado de muestras, incluyendo los duplicados y las muestras tomadas en los terrenos colindantes al emplazamiento contaminado
- procedimientos estándar de trabajo previstos, incluyendo el protocolo de limpieza recomendado para el instrumental de perforación y muestreo
- análisis *in situ* y en laboratorio a realizar en las distintas muestras
- otras investigaciones y ensayos a realizar *in situ*
- explicitación de la necesidad de llevar a cabo ensayos específicos de lixiviación, biodisponibilidad o especiación
- discusión general sobre la exactitud y precisión requeridas en el análisis
- descripción de las responsabilidades de investigadores y trabajadores en el campo
- descripción de las principales previsiones del plan de seguridad elaborado para la ejecución de la investigación

5.3.2 Preparación de la toma de muestras

Por su trascendencia, la toma de muestras requiere una preparación específica previa a su inicio. Entre los preparativos a realizar antes del traslado de los equipos al emplazamiento cabe destacar los siguientes:

- **representación de la situación de los puntos de muestreo en un plano a escala adecuada** (mínimo 1:2000), en el que además se indiquen los posibles riesgos y la localización de las redes de servicios (energía eléctrica, agua, saneamiento, gas, teléfono, etc.) en funcionamiento;

- **elaboración de fichas de registro** específicamente diseñadas para la anotación de la descripción del perfil de los testigos y los datos representativos de cada muestra;
- **elaboración de las etiquetas para los recipientes** que contendrán las muestras. Estas etiquetas deberán diseñarse de manera que permitan registrar el código de cada muestra, el cual ha de hacer referencia a su origen, medio muestreado y posición en el emplazamiento, tanto en sentido horizontal como vertical. Un buen diseño del código de muestra permitirá su fácil reconocimiento en mapas, fichas de registro, informes analíticos, etc.;
- **preparación de los recipientes** de muestreo. Los recipientes en los que posteriormente se recogerán las muestras deberán someterse a procedimientos de limpieza acordes con los parámetros a analizar. Si fuera necesario, se introducirán en los recipientes los productos químicos requeridos para la conservación de las muestras (fundamentalmente para muestras de agua).

Una vez en el emplazamiento y previamente al inicio de la toma de muestras, habrá que considerar los siguientes aspectos:

- los vehículos y el equipamiento se estacionarán lejos de los puntos de muestreo con el fin de evitar la contaminación del material y recipientes de muestreo con aceite, gasolina u otros compuestos procedentes del tubo de escape;
- allí donde se prevea la realización de perforaciones, se procederá a limpiar el suelo eliminando cualquier resto de residuos, escombros, material de demolición, etc.;
- cada punto de muestreo se indicará de forma visible, marcando en el suelo un código de referencia predefinido. En caso de que se produjeran variaciones en la localización de los puntos de muestreo respecto a la estrategia diseñada, las nuevas localizaciones habrán de ser registradas inmediatamente en el plano.

Información mínima de la etiqueta de los recipientes de muestreo
- Proyecto en el que se enmarcan las muestras
- Naturaleza de la muestra
- Localización del punto de muestreo (horizontal y vertical)
- Fecha y hora de la toma de muestra
- Instrucciones para la manipulación del recipiente
- Indicaciones acerca de cualquier necesidad especial para la conservación o el análisis de la muestra

5.4 TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS EN LABORATORIO

La descripción de las labores de toma de muestras se aborda diferenciando las distintas matrices que pueden ser objeto de muestreo, dado que, en general, requieren distintos procedimientos de actuación y equipos. No obstante, el Manual Práctico no pretende realizar una exhaustiva descripción de todos los sistemas, equipos y métodos de toma de muestras de las diferentes fases o medios que se pueden encontrar durante una investigación. Para ello, se recomienda consultar la *Guía Metodológica de Toma de Muestras*. Aquí se proporciona un resumen de los mismos, así como unas directrices generales de actuación a poner en práctica durante la toma de muestras, con particular énfasis en aquellas que se van a analizar posteriormente en laboratorio.

5.4.1 Toma de muestras

5.4.1.1 Toma de muestras de matriz sólida

Las muestras de matriz sólida que más habitualmente se toman durante la investigación de emplazamientos contaminados son las de suelo. Además de ellas, hay que mencionar las de residuos, materiales abandonados y elementos constructivos de edificios, que se toman en la investigación de determinados tipos de emplazamientos.

5.4.1.1.1 Toma de muestras de suelo

Los principales sistemas de tipo intrusivo que permiten la toma de muestras de suelo y que se utilizan en investigaciones de emplazamientos contaminados son las siguientes:

- Calicatas
- Sondeos manuales
- Sondeos ligeros o semimecánicos
- Sondeos mecánicos

La mayor parte de los trabajos de investigación de suelos contaminados se desarrollan en los niveles superficiales/subsuperficiales del terreno (orientativamente, hasta 10-15 m de profundidad), para los cuales pueden ser válidos los sondeos manuales y/o ligeros. Sin embargo, cuando es necesario alcanzar profundidades mayores, se deben utilizar los sondeos mecánicos.

Por otra parte, los sondeos manuales y ligeros imponen serias limitaciones a la posterior instalación de pozos de control, debido básicamente a los reducidos diámetros de perforación que permiten. Además, muchos de los equipos de toma de muestras de agua subterránea exigen requisitos en cuanto a la configuración de los pozos que sólo proporcionan los sondeos mecánicos.

Así pues, la elección de las técnicas de perforación y muestreo del suelo debe realizarse a la vista de los objetivos específicos de la campaña de muestreo, de las características del terreno a investigar y de otros condicionantes (necesidad de instalar pozos de control o de realizar ensayos específicos en la perforación, etc.). Los equipos y procedimientos de perforación y toma de muestras de suelo se encuentran descritos detalladamente en la *Guía Metodológica de Toma de Muestras*.

Se adjunta a continuación un cuadro comparativo de los principales sistemas, en el que se resumen las principales ventajas e inconvenientes de cada uno, así como su aplicabilidad.

Principales sistemas de perforación y toma de muestras de suelo				
Sistema	Aplicabilidad	Ventajas	Limitaciones	Observaciones
Calicatas	Delimitación superficial y horizontal	Costes reducidos, rapidez de investigación	Profundidad (hasta 4-5 m), representatividad de muestras	Utilizada como herramienta previa o complementaria
Sondeos manuales	Suelos cohesivos y no cohesivos	Facilidad manejo, reducido peso, costes bajos	Profundidad (hasta 1 m). Suelos duros	Presentan multitud de diseños ante distintos suelos a muestrear
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	Agrupar numerosas técnicas de perforación diferentes, en continua evolución

Aunque los sistemas de perforación, debido a sus diferentes características, tienen asociadas distintas técnicas de muestreo, pueden realizarse algunas consideraciones generales para todos ellos. Como norma general, las muestras deben tomarse de forma que se extraiga, de toda la profundidad de muestreo o de toda la potencia del estrato u horizonte objeto de estudio, una porción de suelo representativa, evitando en lo posible la alteración de su estructura y características físicas.

Recomendaciones generales para la toma de muestras de suelo
<ul style="list-style-type: none"> - El orden de la ejecución del muestreo debe seguir en la medida de lo posible la secuencia de puntos de menos a más contaminado para evitar una posible contaminación cruzada - Cuando en el perfil de un mismo sondeo se aprecien niveles o estratos bien diferenciados, deberán tomarse muestras separadas representativas de cada estrato; - Deberán ser muestreados aparte aquellos estratos en los que se perciba contaminación (color, olor, zonas removidas, etc.); - El tiempo de contacto de la muestra con el instrumental de perforación ha de ser mínimo; - El material que haya permanecido en contacto con el muestreador debe eliminarse con el fin de evitar la contaminación producida por el arrastre de materiales desde niveles superiores; - La preparación de muestras mixtas o compuestas debe realizarse siempre en el laboratorio y no en el campo; - - Cuando se tome una muestra directamente por debajo de un nivel claramente contaminado, debe colocarse un tubo de revestimiento para evitar que la contaminación progrese en profundidad.

5.4.1.1.2 Toma de muestras de residuos y materiales abandonados

Se entiende por materiales y residuos abandonados aquéllos que, no siendo constitutivos de los edificios, han quedado abandonados en las denominadas ruinas industriales (en muchos casos sin ningún tipo de medidas de contención) y que pueden contener sustancias que supongan riesgos significativos para la salud o el medio ambiente. Esencialmente se trata de materias primas, productos de fabricación (envasados o no), materias auxiliares o residuos y rechazos de fabricación.

Las técnicas y equipos de muestreo a utilizar dependen principalmente del estado físico y previsible composición química de los materiales a muestrear. Para materiales en estado sólido/pastoso se emplean paletas o espátulas, introduciéndose la muestra en un recipiente con cierre hermético; en ocasiones pueden emplearse equipos más simples (sondas Edelman, Riverside, etc.).

En estos muestreos es importante realizar una exhaustiva descripción de la muestra, así como de su estado físico (sólido, pastoso), situación, volumen aproximado, etc. Así mismo, durante la toma de muestras se deben respetar escrupulosamente las medidas de seguridad específicas para cada caso (guantes, máscaras, etc.) impidiendo el contacto directo con el material y la inhalación de vapores.

5.4.1.1.3 Toma de muestras de elementos constructivos de edificios

Las sustancias que más suelen encontrarse en elementos constructivos de edificios contaminados son el amianto (en suelos, paredes, techos, aislamientos, paneles, instalaciones anti-incendios, etc.), los compuestos orgánicos (aceites, alquitranes) y metales, presentes principalmente en superficies.

Las técnicas y equipos de muestreo (ver *Guía Metodológica de Toma de Muestras y Guía Técnica de Criterios Ambientales para la Recuperación de Ruinas Industriales*) a utilizar varían principalmente en función del estado y características físicas del material a muestrear, así como de la capacidad de penetración que posean los contaminantes en los materiales potencialmente afectados, Las técnicas más comunes son las siguientes:

- **Barrido**, en el cual el contaminante (polvo o fibras) se extrae mediante un cepillado y se introduce en el recipiente de muestreo.
- **Cinta de gel**, mediante la cual el polvo o fibras quedan adheridos a la cara que posee el agente adherente.
- **Rascado**, empleado en superficies porosas que no tengan carácter duro. Es similar al barrido pero penetrando en mayor medida el material.
- **Perforación**, mediante coronas de diamante, cuando la superficie es dura y lisa y se sospecha que los contaminantes han penetrado en la masa del material.
- **Secado**, consistente en la aplicación a una superficie determinada de un pañuelo de papel impregnado de un agente absorbente del contaminante.

5.4.1.2 Toma de muestras de matriz líquida

Las muestras de matriz líquida que más habitualmente se toman durante la investigación de emplazamientos contaminados son las de aguas, en especial subterráneas. Además de ellas, hay que mencionar las de residuos líquidos y lixiviados, que pueden tener relevancia en la investigación de determinados tipos de emplazamientos.

5.4.1.2.1 Toma de muestras de aguas subterráneas

La toma de muestras de aguas subterráneas va a menudo precedida de la instalación de un pozo de control. El diseño, instalación y desarrollo de los pozos de control se encuentra descrito en la *Guía Metodológica de Toma de Muestras*. A continuación se resumen algunas prácticas imprescindibles para el correcto muestreo de las aguas subterráneas en los pozos de control.

- **Preparación y mediciones:** antes de comenzar el muestreo propiamente dicho se debe abrir el sistema de protección del pozo (arquetas, tubos y tapas de cierre, etc.). A continuación se mide el nivel de agua en el pozo y se calcula el volumen de la columna

de agua existente en su interior. El nivel de agua se mide desde un punto de referencia (por ejemplo, la boca del pozo), que en caso de no existir, debe ser señalado para futuras mediciones. Se realiza además un croquis indicando la situación del punto de referencia, la altura de la boca del pozo sobre el nivel del suelo, etc.

- **Purgado del pozo:** se realiza con el objetivo de que la muestra sea representativa y consiste en la extracción del agua contenida en el mismo y la inmediatamente adyacente a éste (zona de influencia). Aunque el pozo hubiera sido limpiado tras su instalación, el tiempo transcurrido hasta la toma de muestras aconseja proceder siempre al purgado. El volumen purgado del pozo depende de las condiciones hidrogeológicas del área; como norma general, se considera necesario extraer al menos un volumen de 3 veces la columna de agua contenida en el pozo.

Una vez realizadas las operaciones anteriores, se puede llevar a cabo la toma de muestras de agua subterránea, para la cual puede utilizarse un amplio abanico de métodos y equipos, que se clasifican en:

- *Sistemas manuales de depósito*, tales como tomamuestras de válvula o bola, denominados comúnmente “bailers”
- *Sistemas de bombeo* de diversos tipos, en función de los materiales utilizados, profundidad de muestreo, sistema requerido, etc.

En ocasiones se toman muestras de aguas subterráneas sin instalar previamente pozos de control (por ejemplo, mediante penetrómetros cónicos o en sondeos ligeros no equipados que alcanzan el nivel freático). En estos casos, hay que recordar que las muestras no son totalmente representativas de la calidad de las aguas subterráneas, por lo que, de proceder a su análisis, los correspondientes resultados deben considerarse como meramente orientativos.

En ciertas casuísticas de la contaminación del suelo (como por ejemplo, las ocasionadas por escapes de hidrocarburos derivados del petróleo o disolventes clorados) es habitual encontrar contaminantes más o menos densos que el agua formando una capa de significativo espesor en la parte superior o inferior, respectivamente, del manto freático, una vez se han superado las concentraciones de saturación en agua. Es lo que suele denominarse contaminación en fase libre.

Para la medición del espesor real de fase libre se utilizan sondas de interfase, complementadas con la aplicación de fórmulas o ensayos empíricos (como el denominado test “bail-down”). El muestreo de los productos presentes en fase libre debe realizarse en los pozos de control, con la ayuda de muestreadores tipo “bailer” o similares.

Un caso distinto es la toma de muestras del agua contenida en la zona no saturada del suelo. Los equipos y técnicas más habitualmente utilizadas para ello son lisímetros, tomamuestras de succión, etc. La *Guía Metodológica de Toma de Muestras* y la *Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y Seguimiento de Contaminantes en el Suelo y en las Aguas Subterráneas* proporcionan información detallada acerca de los mismos.

Recomendaciones para la toma de muestras de agua subterránea

- Se habrá logrado la limpieza del pozo una vez se establezca el pH y la conductividad eléctrica, parámetros cuya medida se realiza *in situ* con instrumental portátil o analizadores en continuo;
- Siempre que sea posible, la muestra de agua se tomará una vez que el acuífero haya recuperado el equilibrio (aproximadamente una semana después de la limpieza del pozo);
- Para evitar el riesgo de contaminación cruzada, el instrumental que haya permanecido en contacto con la muestra ha de ser limpiado exhaustivamente. Se recomienda la utilización de mangueras de polietileno (PE) o politetrafluoroetileno (PTFE) de un único uso;
- Las muestras de agua subterránea deben ser filtradas en el campo a través de un filtro de 0,45 μm , en condiciones anaerobias;
- Cuando se tome la muestra por medio de bombas, deberá purgarse el dispositivo de extracción con una cantidad de agua dependiente de la permeabilidad de la formación (como mínimo, dos o tres veces el volumen del dispositivo de extracción);
- Cuando vaya a determinarse en las muestras de agua compuestos volátiles, debe reducirse la turbulencia en la medida de lo posible.

5.4.1.2.2 Toma de muestras de aguas superficiales

El muestreo de aguas superficiales se realiza normalmente durante la investigación de emplazamientos en los que se sospecha la afección de las mismas por migración de contaminantes procedentes de aquél. Dicha migración puede producirse por diversos mecanismos, siendo los más habituales el arrastre de partículas por la escorrentía superficial o la descarga a cauces superficiales de aguas subterráneas contaminadas.

Los equipos de muestreo de las aguas superficiales utilizados con mayor frecuencia son las botellas Kemmerer, los muestreadores Van Dorn, las bombas Bacon o las botellas lastradas. La *Guía Metodológica de Toma de Muestras* proporciona información detallada acerca de estos equipos y los correspondientes sistemas de muestreo.

5.4.1.2.3 Toma de muestras de residuos líquidos

Para el muestreo de residuos líquidos abandonados en bidones y tanques es aconsejable utilizar un tomamuestras tipo “bailer” o, en su defecto, un tubo de vidrio que se introduce en el líquido y cuyo extremo superior se cierra, ejerciendo un efecto pipeta. En ocasiones también se emplean muestreadores Coliwaso o bombas Bacon.

Siempre es aconsejable emplear equipos de muestreo de un solo uso, no añadir reactivos para evitar riesgos de reacciones imprevistas y extremar las precauciones durante la toma de muestras. Para ello, se deben realizar mediciones con un explosímetro, posponiendo el muestreo en caso de detectarse niveles superiores al 25% del límite inferior de explosividad (LEL), hasta que aquéllos disminuyan por debajo del 10% del LEL.

5.4.1.3 Toma de muestras de matriz gaseosa

El muestreo de la matriz gaseosa en las investigaciones de contaminación de emplazamientos puede comprender tanto el muestreo de la fase gaseosa o aire intersticial del suelo como el muestreo del aire ambiente. En los últimos años se han desarrollado numerosos métodos, tanto para la toma de muestras como para la detección y caracterización de gases y vapores.

El muestreo de aire ambiente difiere en sus características del muestreo del aire intersticial y suele realizarse al hilo de casuísticas en las que puede existir afección de la salud humana (por ejemplo, en ambientes interiores) como consecuencia de la migración de gases o compuestos volátiles desde el emplazamiento a su entorno.

El objetivo de la toma de muestras de aire intersticial del suelo es obtener muestras representativas de la composición y concentración de los gases presentes a la profundidad del suelo a la que se han tomado las mismas. Para asegurar su representatividad, los equipos de muestreo deben purgarse, recomendándose además extremar las medidas de limpieza de los equipos.

El muestreo del aire intersticial puede llevarse a cabo mediante:

- **Sistemas pasivos:** consistentes fundamentalmente en materiales o medios absorbentes que se insertan en el suelo (usualmente varillas impregnadas de carbón vegetal o de algún elemento absorbente específico) por un periodo de tiempo determinado (desde días a semanas). La varilla o elemento colector es posteriormente recuperado y analizado en laboratorio.
- **Sondas de muestreo:** método consistente en introducir sondas hasta la profundidad del suelo deseada, desde donde se extrae la muestra mediante una bomba para trasvasarla posteriormente a un recipiente o medio absorbente adecuado (tubos Tenax, tubos de carbón activo, bolsas Tedlar, etc.) que se envía al laboratorio o se analiza en campo mediante analizadores o detectores portátiles.

También es posible muestrear la fase gaseosa en pozos de control contruidos especialmente para tal fin o para gas y agua subterránea. En estos pozos de control sólo es posible el muestreo de compuestos volátiles. Dichos pozos son similares a los realizados para aguas subterráneas en cuanto a los materiales con que se equipan (filtros de grava, sellado, etc.), aunque suelen ser de diámetro menor (2,5-5 cm). El muestreo en ellos se realiza normalmente mediante bombas de vacío.

5.4.1.4 Toma de otro tipo de muestras

En ocasiones se requiere la toma de muestras de naturaleza diferente a las descritas. En la mayor parte de los casos, se trata de microorganismos y de flora y/o fauna macroscópica.

Para el muestreo de microorganismos deben utilizarse técnicas microbiológicas adecuadas, que reduzcan una posible contaminación accidental y permitan la obtención de especies representativas. Las muestras de suelo para el análisis microbiológico deben tomarse directamente de perfiles recién abiertos, mediante espátulas o tomamuestras esterilizados. Como norma general, se obtendrán muestras de todos los horizontes supuestamente contaminados sin olvidar que las poblaciones microbianas son siempre mayores en las proximidades de la superficie del suelo.

Las muestras de flora macroscópica se toman habitualmente cortando con tijeras la porción vegetal de interés (raíces, tallos, hojas, etc.), efectuándose una descripción detallada de los especímenes, y evitando en todo momento la destrucción de cualquier tipo de vegetación. El muestreo de fauna, tanto de vertebrados como de invertebrados, debe realizarse por captura.

5.4.2 Registro de los datos de muestreo

Toda la información recogida durante la toma de muestras deberá ser registrada correctamente en el campo, anotando en especial los siguientes datos:

- descripción del **perfil del sondeo**, incluyendo la estructura general del suelo e indicando la profundidad y la potencia de cada estrato, la profundidad a la que se encuentra el agua y la posición de cualquier instalación subterránea que se detecte;
- **registro** de la posición, horizontal y vertical, a la que se toma cada muestra, incluyendo una descripción detallada de la muestra (color, olor, etc.);
- **observaciones generales**, incluyendo un reportaje fotográfico con cada una de las perforaciones.

Información mínima sobre las muestras a registrar en el campo	
-	Código de identificación de la muestra
-	Proyecto en el que se enmarca la muestra
-	Localización exacta del punto de muestreo
-	Fecha y hora del muestreo
-	Condiciones meteorológicas
-	Parámetros de toma de muestra (profundidad, dimensiones, etc.)
-	Referencia del instrumental y método utilizado en el muestreo
-	Descripción sumaria (de visu) de la muestra
-	Nombres del personal que ha tomado parte en la operación
-	Incidentes ocurridos durante el muestreo
-	Cualquier otra información relacionada con la muestra o el muestreo

5.4.3 Conservación y transporte de las muestras

5.4.3.1 Conservación y transporte de muestras sólidas

A pesar de que las muestras sólidas son en general más estables que las líquidas, es preciso conservarlas de forma que mantengan su integridad química. Teniendo este aspecto en cuenta, el material de envasado se elegirá considerando siempre que las características de las muestras no han de sufrir alteración alguna. Los fenómenos que se pretenden evitar con el envasado correcto de las muestras son los siguientes:

- contaminación de la muestra;
- pérdida de alguno de los contaminantes por difusión a través del material de envasado;
- modificación de algunas características de la muestra debido a la introducción de aire o la alteración de la estructura del suelo.

Como norma general, las muestras en las que se vayan a determinar compuestos inorgánicos deben envasarse en recipientes de material plástico, mientras que aquellas en las que se requiera el análisis de compuestos orgánicos se almacenarán en recipientes de vidrio o metálicos.

Se recomienda transportar las muestras refrigeradas a aproximadamente 4°C, especialmente cuando los compuestos o las propiedades a determinar puedan verse afectadas por la actividad microbológica (por ejemplo pH, contenido de nitratos, contenido de nitritos, etc.).

Puede obtenerse una información más detallada en esta materia en la *Guía Metodológica de Análisis Químico*.

5.4.3.2 Conservación y transporte de muestras líquidas

Las muestras de agua y otros líquidos se deterioran más rápidamente que las sólidas después de haber sido tomadas. Para evitar este deterioro, las muestras deben preservarse adecuadamente. Si el análisis no va a ser inmediato debería ser suficiente, para la conservación de las muestras líquidas, la adición en el campo o en el laboratorio de un agente químico estabilizante. Sin embargo, este tratamiento no siempre es el más adecuado ya que la adición de sustancias extrañas a la solución acuosa puede producir la precipitación de parte de la materia insoluble, forzando de esta forma la necesidad de filtrar la muestra antes del análisis. Además algunos de estos agentes estabilizantes pueden reaccionar con la materia insoluble de la muestra liberando sustancias a la disolución y originando de esta manera probables desviaciones de los resultados analíticos. Por todas estas razones, el procedimiento general más efectivo es el traslado y almacenamiento de las muestras a una temperatura entre 4 y 6° C hasta que se realiza el análisis, cosa que debe hacerse inmediatamente (ver *Guía Metodológica de Análisis Químico*).

5.4.3.3 Conservación y transporte de muestras gaseosas

La detección y caracterización de gases se realiza habitualmente *in situ*. No obstante, los equipamientos disponibles no siempre son capaces de alcanzar los objetivos de identificación requeridos por lo que las muestras deben ser trasladadas a un laboratorio cualificado para su análisis.

Un aspecto fundamental de la manipulación de las muestras gaseosas es la elección del recipiente óptimo para su conservación que elimine cualquier posibilidad de fuga o contaminación. Normalmente se utilizan para la mayoría de los gases y vapores, contenedores metálicos que pueden estar presurizados si se considera necesario. No se recomienda el uso de recipientes de materiales plásticos básicamente por dos razones: son relativamente permeables a muchos gases y además tienen tendencia a absorber vapores.

Cuando los gases han sido tomados en los recipientes adecuados, no se requiere ningún tipo de medidas especiales para su transporte al laboratorio.

5.4.4 Control de calidad del proceso de toma y transporte de las muestras

Para asegurar la calidad del proceso de toma de muestras, será necesario tomar las siguientes precauciones:

- el material necesario para la operación debe ser limpiado y comprobado cuidadosamente antes de la salida;
- la localización de los puntos de muestreo debe ser registrada en un plano de forma inequívoca;
- las muestras deben ser extraídas siguiendo rigurosamente el protocolo de muestreo, tanto en los aspectos referentes a la toma en sí, como en lo relativo a la limpieza del material;
- los criterios de eliminación de materiales extraños (piedras, trozos de vidrio, etc.) deberán ser claros y preestablecidos con antelación;
- cualquier operación realizada con la muestra deberá ser rigurosamente documentada, siguiendo los protocolos al efecto;

- los recipientes que contienen las muestras deben ser etiquetados con claridad y de forma indeleble, con el código de identificación de la muestra;
- las muestras no son inertes por lo que la demora hasta el momento del análisis debe ser reducida al mínimo;
- debe comprobarse que todos los materiales utilizados en la toma de muestras no producirán interferencias en el análisis de las mismas. Para ello es preciso emplear blancos de campo (ver cuadro final de este apartado);
- la información asociada a cada muestra debe ser registrada en el campo.

Asimismo, para que el **transporte y la manipulación** de las muestras se realice de forma que se garantice la posterior identificación y se evite cualquier pérdida o alteración de la misma, se tomarán las precauciones que se enumeran a continuación:

- debe asegurarse el mantenimiento del tratamiento de conservación (refrigeración, aditivos, ...) durante el tiempo que dura el transporte;
- los envases con las muestras individuales serán introducidos en recipientes mayores estancos y resistentes, preferiblemente de madera o metal;
- dentro de estos recipientes, las muestras serán empaquetadas con un material de relleno aislante que las inmovilice;
- las muestras mantendrán la orientación en la que fueron tomadas;
- los recipientes en los que se realice el traslado deberán estar clara y visiblemente identificados, de forma indeleble;
- cada lote dispondrá de un documento con toda la información referida a las muestras que lo integran;
- deberá mantenerse en todo momento la integridad de la cadena de custodia;
- las condiciones de transporte se evaluarán mediante el empleo de blancos de viaje (ver cuadro adjunto).
- Todos estos aspectos se desarrollan más detalladamente en la *Guía Metodológica de Análisis Químico*.

Tipos de blancos

- **Blanco de viaje.** Este tipo de blanco se utiliza para detectar posibles contaminaciones debidas a las migraciones, fundamentalmente de compuestos orgánicos volátiles que se introducen en la muestra a través del septum o del sello de los viales. El blanco de viaje consiste en una muestra de agua bidestilada envasada de forma similar a las muestras de suelo. El blanco, preparado en el laboratorio, debe transportarse con los frascos de muestra al campo y debe retornarse al laboratorio una vez finalizada la toma de muestras. Las muestras blanco de viaje, cuyo código de identificación no debe diferir de las muestras reales, no han de abrirse hasta que comiencen los análisis.
- **Blanco de campo.** El blanco de campo se utiliza para asegurar que los procedimientos de toma de muestras y de limpieza del material de campo no producen una contaminación cruzada de las muestras. Como el blanco de viaje, el blanco de campo es una muestra de agua bidestilada que se transporta al campo y es analizada con el resto de las muestras. El blanco de campo, sin embargo, se abre una vez en el campo y se manipula como se haría con una muestra real (por ejemplo, se vierte sobre el equipo de muestreo previamente limpiado o se trasvasa de frasco a frasco).
- **Blanco de calibración o comprobación.** Este tipo de blanco se utiliza para detectar posibles contaminaciones del instrumental de medida o del agua bidestilada, que se inyecta directamente sin haber sido tratada con los reactivos empleados en el análisis de las muestras reales.
- **Blanco de reactivos o de método.** Este blanco consiste en el tratamiento de agua destilada mediante el procedimiento al que se someten las muestras de suelo. Resultados positivos en el análisis de este blanco indican o bien la contaminación de los reactivos o bien la contaminación del material de vidrio.

5.5 ANÁLISIS IN SITU

5.5.1 Introducción

En la mayoría de las investigaciones, las muestras tomadas se envían al laboratorio para someterlas al programa de análisis diseñado previamente. Sin embargo, en algunas circunstancias puede tener interés complementar los análisis de laboratorio con determinaciones realizadas *in situ* con la ayuda de equipos portátiles. Estas determinaciones, de naturaleza cualitativa, semicuantitativa, o cuantitativa, se orientan con mayor frecuencia a las siguientes cuestiones:

- determinación y evaluación inicial de contaminantes (como gases tóxicos o inflamables) detectados durante la visita de reconocimiento y que pueden suponer un riesgo para los trabajos que posteriormente se realicen sobre el emplazamiento;
- determinación de propiedades del suelo o concentraciones de contaminantes que cambien rápidamente en el tiempo una vez que la muestra ha sido tomada, como pueden ser el pH, el oxígeno disuelto o la turbidez de las muestras líquidas;
- análisis rápido de suelo o materiales de relleno excavados durante la recuperación de un emplazamiento, con objeto de determinar su destino final.

Sea cual sea su finalidad, estos análisis son muy útiles, ya que permiten obtener resultados y tomar decisiones en un breve plazo. No obstante, dado el bajo grado de resolución que normalmente ofrecen, deben entenderse como técnicas auxiliares y complementarias de las determinaciones de laboratorio.

5.5.2 Análisis *in situ* de muestras sólidas

Las muestras sólidas son, en general, más estables que las líquidas, lo que implica que los análisis *in situ* de este tipo de matrices se llevarán a cabo normalmente en aquellos casos en que se pretende obtener rápidamente resultados acerca del material. En muchos casos el análisis *in situ* de muestras sólidas se realiza con el fin de optimizar las determinaciones analíticas de laboratorio, seleccionando las muestras que se envían al mismo por ser más probable encontrar en ellas los contaminantes objeto de estudio.

Para estas determinaciones in-situ se suelen utilizar los siguientes equipos:

- Detectores de metales por espectroscopía de fluorescencia por rayos X (XRF).
- Detectores de fotoionización (PID) o detectores de ionización por llama (FID), que pueden detectar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles.
- Tubos de detección.

En el cuadro adjunto se resumen las principales características, aplicaciones, ventajas e inconvenientes de cada uno de estos equipos.

Equipos más frecuentes de análisis <i>in situ</i> de muestras sólidas					
Instrumento de medida	Principio de funcionamiento	Aplicación	Tipo de determinación	Ventajas	Limitaciones
XRF	Espectroscopía de fluorescencia por rayos X	Metales pesados	Cuantitativa	Gran número de muestras/día (200-400)	No aplicable a Hg y Be. Límite de detección variable según modelo, compuesto, interferencias, densidad de la matriz, etc.
PID	Fotoionización	Orgánicos volátiles, vapores inorgánicos	Cualitativa o semicuantitativa	Gran número de muestras/día. No destruye la muestra. Precisa poca cantidad de muestra.	No identifica compuestos individuales. No detecta gases tóxicos (CCl ₄ , HCN, etc.). Coste del equipo elevado
FID	Ionización de llama	Orgánicos volátiles Hidrocarburos de bajo peso molecular Gases tóxicos (CCl ₄ , HCN)	Cualitativa o semicuantitativa	Rango amplio de compuestos en concentraciones que varían en función del compuesto (0,1-2000 ppm). No se ve afectado por vapor de agua. Algunos modelos pueden funcionar en modo cromatógrafo de gases	Destruye la muestra. Coste del equipo elevado.
Tubos de detección	Inmunoensayo	Compuestos orgánicos (PAH's, pesticidas, PCB's, herbicidas, hidrocarburos derivados del petróleo) Hg Metales	Semicuantitativa	Alto rendimiento (30 ensayos/hora). Fácil aprendizaje. Costes reducidos. El equipo más utilizado	Tiempo de vida media de los anticuerpos limitado. Alta especificidad de las determinaciones.

5.5.3 Análisis *in situ* de muestras líquidas

Para el análisis *in situ* de muestras líquidas cabe distinguir, por una parte, las determinaciones de carácter general y, por otra, las determinaciones específicas de contaminantes o grupos de contaminantes.

Respecto a la caracterización general, se utilizan habitualmente analizadores portátiles de lectura directa, basados generalmente en propiedades electroquímicas. Estos equipos pueden ser utilizados para cuantificar algunas propiedades que cambian rápidamente una vez la muestra ha sido extraída y expuesta a la atmósfera. Entre las propiedades que se determinan de esta manera se encuentran el pH, la conductividad, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y la concentración de amonio. Los instrumentos de medida (conductivímetros, pHmetros, oxímetros, etc.) son de diversa índole y complejidad, existiendo equipos capaces de determinar varios de estos parámetros simultáneamente.

Al contrario de lo que ocurre con la medición de gases *in situ*, en este caso los resultados obtenidos mediante estas técnicas pueden llegar a ser más exactos que los obtenidos para muestras que han sido estabilizadas *in situ* para ser posteriormente analizadas en el laboratorio, siempre que se preste una especial atención a la selección y al uso del equipo. En consecuencia, estas determinaciones deberán realizarse *in situ* siempre que sea posible.

Respecto a la detección de contaminantes o grupos de contaminantes, también es posible la realización de análisis *in situ* de muestras líquidas, utilizando para ello los instrumentos descritos en el apartado anterior.

Los equipos empleados para realizar este tipo de mediciones son los mismos que para el análisis *in situ* de muestras sólidas. Mediante espectroscopía de fluorescencia por rayos X (XRF), es posible detectar metales pesados en líquidos (por ejemplo, plomo en gasolina), elementos ligeros (por ejemplo fósforo, azufre, cloro en soluciones orgánicas), metales pesados en efluentes líquidos industriales, PCBs en aceites de transformadores, etc. Su mayor limitación es que requiere normalmente la preconcentración de la muestra.

Mediante los detectores de fotoionización (PID) e ionización por llama (FID) es posible detectar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles de manera cualitativa y semicuantitativa.

5.5.4 Análisis *in situ* de gases y vapores

Debe concederse una atención especial a la determinación *in situ* de la composición gaseosa, tanto de la atmósfera general como del propio aire del suelo, haciendo uso de instrumentación portátil. Los análisis *in situ* de gases o vapores también pueden dirigirse a la detección de compuestos con especiales características de peligrosidad.

Estas técnicas permiten detectar diferentes tipos de gases, tales como el sulfhídrico, metano o vapores explosivos, y proporcionan información que puede aplicarse al diseño del programa de muestreo de suelos y aguas. Esta práctica es la más comúnmente utilizada aunque, cuando se requiera la medida y monitorización en lugar de únicamente la detección, también es posible analizar gases *in situ* desplazando hasta el emplazamiento un laboratorio móvil.

Los instrumentos más comúnmente utilizados para el análisis *in situ* de gases y vapores son los que se indican en la siguiente tabla, en la que se resumen las principales características, aplicaciones, ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Equipos más frecuentes de análisis <i>in situ</i> de gases y vapores					
Instrumento de medida	Principio de funcionamiento	Aplicación	Tipo de determinación	Ventajas	Limitaciones
Explosímetro	Sensor catalítico	CO, SH ₂ , NO ₂ , SO ₂ , Cl ₂ , CH ₄ , O ₂ y N ₂	Cualitativa	Versátil y de fácil uso. Respuesta inmediata.	Detección selectiva de compuestos según los sensores seleccionados
Detector de gas de vertedero	Absorción en el espectro infrarrojo	Gases de vertedero (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , N ₂)	Cualitativa	Medidas instantáneas. Fácil uso y reducido tamaño.	Detección selectiva de compuestos según los sensores seleccionados
Cromatógrafo de gases	Cromatografía de gases	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, pesticidas, PCB's, herbicidas, hidrocarburos derivados del petróleo	Cuantitativa	Límites de detección bajos (hasta ppb).	Costes elevados. Requiere personal especializado. No totalmente portátil.
Tubos colorimétricos	Adsorción	Compuestos volátiles y semivolátiles	Cualitativa	Zonas amplias de estudio en tiempos reducidos	Detección limitada de compuestos según tubos empleados

Recomendaciones para la toma de muestras de aire intersticial y análisis in-situ de gases

- Prestar especial atención a la afección que las condiciones ambientales (humedad del suelo, temperaturas extremas, etc.) u otros factores (presencia de campos eléctricos, interferencias de ondas de FM) puedan provocar sobre los detectores.
- Llevar a cabo rigurosamente la calibración de los instrumentos mediante los procedimientos estándar de calibración para cada instrumento
- Conocer las interacciones y limitaciones que presenta cada técnica, ya que los contaminantes pueden verse absorbidos por compuestos inorgánicos del suelo o disueltos en los componentes orgánicos de éste
- Limpiar la sonda de muestreo con regularidad. Un problema frecuente es la obstrucción de la sonda, que es detectable por el cambio en el sonido de la bomba de extracción de la muestra

5.6 OTRAS INVESTIGACIONES Y ENSAYOS

Además de las descritas en los epígrafes anteriores, existen otras investigaciones y ensayos que, en mayor o menor medida, suelen formar parte de los trabajos de campo diseñados para diagnosticar la problemática de un emplazamiento contaminado. Entre ellas, cabe diferenciar dos grandes grupos:

- Las investigaciones basadas en técnicas geofísicas
- Los ensayos para determinar parámetros hidrodinámicos

5.6.1 Investigaciones geofísicas

Los métodos de investigación geofísica agrupan un conjunto de técnicas no intrusivas que miden diferencias en propiedades físicas tales como la conductividad eléctrica, la densidad o la velocidad de las ondas sísmicas, por lo que pueden ser utilizadas para detectar superficies límites (vertederos, depósitos o bidones enterrados, etc.) cuando se produce un cambio claro en la propiedad física medida a ambos lados de la anomalía.

Las más utilizadas son la sísmica de refracción, la resistividad eléctrica y la magnetometría, siendo frecuentes también la prospección electromagnética y el radar penetrante o georadar. No siempre es posible detectar la superficie límite debido a que a menudo, las propiedades físicas varían gradualmente en una zona de transición y no en un punto determinado. Los mejores resultados se obtienen cuando las condiciones del suelo de cada formación son uniformes, existiendo a la vez grandes variaciones en las propiedades físicas de las diferentes formaciones.

Por estas razones, los métodos geofísicos poseen un valor limitado en la investigación de suelos contaminados, recomendándose en general su utilización como método complementario de investigación. No obstante, en determinadas circunstancias pueden proporcionar información muy valiosa a un coste reducido en comparación con otras técnicas.

En la tabla adjunta se reflejan los principales métodos de investigación geofísica utilizados en la investigación de emplazamientos contaminados, indicando sus principales aplicaciones, ventajas e inconvenientes.

Principales técnicas de prospección geofísica para la investigación de emplazamientos contaminados				
Método	Fundamento	Aplicación	Ventajas	Inconvenientes
Reflexión y/o refracción sísmica	Determina cambios en la velocidad de propagación de ondas sísmicas debidos a la litología del subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación de recursos hídricos subterráneos - Perfiles geotécnicos - 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 la calidad de las aguas subterráneas	<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 muy 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 y cavidades 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 féreos enterrados	<ul style="list-style-type: none"> - Localización de objetos féreos enterrados - Detección de los límites de vertederos que contengan objetos féreos - Localización de estratos rocosos con minerales féreos 	<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 en hierro del objeto enterrado - Díficil resolución de resultados en zonas urbanas - Aplicación limitada en ambientes húmedos - Complicada interpretación de resultados en zonas con corrientes magnéticas naturales - Profundidad de penetración limitada a unos 20 m.

5.6.2 Ensayos para determinar parámetros hidrodinámicos

La evaluación de la movilidad de los contaminantes a través de los flujos de aguas subterráneas es determinante de las posibilidades de migración de la contaminación desde el foco de origen hacia su entorno. Para poder realizar cualquier estimación a este respecto, es preciso disponer de datos sobre los parámetros hidrodinámicos que caracterizan al medio subterráneo en cuestión. Entre dichos parámetros destacan el gradiente hidráulico, la permeabilidad, la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento, etc.

La investigación hidrogeológica ha puesto a punto diversos ensayos de campo que permiten la obtención de datos a partir de los cuales pueden derivarse los citados parámetros. Entre dichos ensayos, los más frecuentemente utilizados son los de permeabilidad y los de bombeo.

5.6.2.1 Ensayos de permeabilidad

Al hilo de la ejecución de sondeos para muestreo y/o instalación de pozos de control de las aguas subterráneas, es posible llevar a cabo ensayos que proporcionen información acerca de las características hidráulicas de las formaciones atravesadas.

Algunos de los ensayos más empleados en las investigaciones de suelos contaminados son los ensayos de permeabilidad. La permeabilidad o conductividad hidráulica refleja la facilidad con la cual un material deja pasar el agua a su través. Los ensayos de permeabilidad realizados durante la perforación de sondeos representan las condiciones del acuífero en las proximidades de la zona abierta de la perforación, aunque debe considerarse para su posterior interpretación que pueden verse afectados por múltiples factores tales como el tipo de sistema de perforación empleado, la utilización o no de lodos de perforación, el tipo de acuífero, la heterogeneidad de los materiales circundantes, etc.

Los ensayos de permeabilidad más tradicionales son el Lugeon (apto para sustratos rocosos consolidados), el Gilg-Gavard (adecuado para terrenos de permeabilidad media o baja), el Lefranc (utilizado preferentemente en terrenos no consolidados) y los “slug-test” (para formaciones de baja permeabilidad). Los principios y desarrollo práctico de cada uno de ellos se encuentran detallados en la *Guía Metodológica de Toma de Muestras*.

5.6.2.2 Ensayos de bombeo

Los pozos de control de las aguas subterráneas instalados durante la investigación de campo, junto con otros preexistentes (si es el caso), se pueden aprovechar para realizar ensayos de bombeo, dirigidos a determinar los parámetros hidrodinámicos de las formaciones presentes en el emplazamiento (coeficientes de permeabilidad, de almacenamiento, transmisividad) y la interrelación hidráulica entre las mismas.

Normalmente, los ensayos de bombeo se realizan de forma escalonada, procediendo a bombear agua en un pozo de referencia y observando la evolución de los niveles piezométricos en los demás pozos/puntos de observación. Durante los ensayos de bombeo se registran datos relativos a caudales de agua bombeados, tiempos de bombeo, niveles piezométricos, etc.

Una vez finalizado el bombeo, se suele registrar la evolución de los niveles estáticos a lo largo del tiempo de recuperación. Estos datos son posteriormente evaluados mediante diferentes modelos, aplicables según el tipo de formación acuífera que se trate.

5.7 ANÁLISIS DE LABORATORIO

5.7.1 Análisis de muestras de suelo

Se recomienda para el análisis en muestras de suelo de los parámetros tanto químicos como físicos exigidos por el programa analítico diseñado para la caracterización de un emplazamiento contaminado, la utilización de la normativa que se indica en la siguiente tabla. Otros protocolos estándar pueden ser utilizados siempre que hayan sido adecuadamente validados. Para el análisis de otros parámetros no indicados en dicha tabla, se recomienda la utilización de normativa ISO cuando ésta esté disponible. En su defecto podrán utilizarse otros estándares siempre y cuando hayan sido correctamente validados.

Normativa de referencia para el análisis de muestras de suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco		
Parámetro	Norma	Título de la norma de referencia
Conservación de muestras de suelo	NEN 5742	Bodem. Monsterneming van grond en sediment ten behoeve van de bepaling van metalen, anorganische verbindingen, matig-vluchtige organische verbindingen en fysisch-chemische bodemkenmerken Suelo. Toma de muestras de suelos y sedimentos para la determinación de metales, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos semivolátiles y propiedades físicoquímicas.
	NEN 5743	Bodem. Monsterneming van grond en sediment ten behoeve van de bepaling van vluchtige verbindingen Suelo. Toma de muestras de suelos y sedimentos para la determinación de compuestos volátiles
Conservación de muestras de agua subterránea	NEN 5744	Bodem. Monsterneming van grondwater ten behoeve van de bepaling van metalen, anorganische verbindingen, matig-vluchtige organische verbindingen en fysisch-chemische eigenschappen Suelo. Toma de muestras de agua subterránea para la determinación de metales, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos semivolátiles y propiedades físicoquímicas.
	NEN 5745	Bodem. Monsterneming van grondwater ten behoeve van de bepaling van vluchtige verbindingen Suelo. Toma de muestras de agua subterránea para la determinación de compuestos volátiles.
Acondicionamiento de las muestras	ISO/DIS 11464	Soil quality. Pretreatment of samples for physico-chemical analysis Calidad del suelo. Acondicionamiento de las muestras para el análisis físico químico
Humedad y peso seco	ISO 11465	Soil quality. Determination of dry matter and water content on a mass basis-Gravimetric method Calidad del suelo. Determinación del peso seco y del contenido de agua en masa-Método gravimétrico.
PH	ISO/DIS 10390	Soil quality. Determination of pH Calidad del suelo. Determinación del pH
Materia orgánica		«Carbono orgánico oxidable». Métodos oficiales de análisis del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (1986)
Arcilla	ISO/DIS 11277	Soil quality. Determination of particle size distribution in mineral soil material- Method by sieving and sedimentation Calidad del suelo. Determinación de la distribución del tamaño de partícula en suelo-Método de tamizado y sedimentación.
Extracción de metales	ISO/DIS 11466	Soil quality. Extraction of trace elements soluble in aqua regia. Calidad del suelo. Determinación de elementos traza solubles en agua regia
Cadmio, cobalto, cobre, cromo, níquel, plomo, zinc	ISO/CD 11047	Soil quality. Determination of heavy metals by flame and flameless atomic absorption spectrometry Calidad del suelo. Determinación de metales pesados por espectrometría de absorción atómica de llama y sin llama.
Arsénico	NEN 5760	Bodem. Bepaling van het gehalte aan arseen in grond met behulp van atomaire-absorptiespectrometrie (hydridegeneratie techniek) na ontsluiting met salpeterzuur en zoutzuur. Suelo. Determinación del contenido de arsénico por espectrometría de absorción atómica (técnica de generador de hidruros) tras digestión con ácido nítrico y ácido clorhídrico.
Mercurio	NEN 5764	Bodem. Bepaling van het gehalte aan kwik in grond met behulp van atomaire-absorptiespectrometrie na ontsluiting met salpeterzuur in een PTFE-destructievat by 140 °C onder druk Suelo. Determinación del contenido de mercurio en suelos por espectrometría de absorción atómica en vaso de digestión de PTFE a 140 °C y a presión.
Pesticidas organoclorados y PCBs	NEN 5734	Bodem. Gaschromatografische bepaling van de gehalt aan organochloor-bestrijdingsmiddelen (OCB's) en polychloorbifenylen (PCB's) in grond Suelo. Determinación por cromatografía de gases del contenido de pesticidas organoclorados y policlorobifenilos en suelos
	EPA 8080	Organochlorine Pesticides and PCBs
Aceite Mineral	NEN 5733	Bodem. Bepaling van het gehalte aan minerale oile in grond met behulp van infraroodspectrofotometrie en gaschromatografie. Suelo. Determinación del contenido de aceite mineral en suelo mediante espectrofotometría infrarroja y cromatografía de gases.
Hidrocarburos aromáticos	NEN 5731	Bodem. Bepaling van de gehalten aan tien polycyclische aromatische koolwaterstoffen met behulp van hogedruk-vloeistof-chromatografie.

Normativa de referencia para el análisis de muestras de suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco		
Parámetro	Norma	Título de la norma de referencia
policíclicos		Suelo. Determinación de la concentración de diez hidrocarburos aromáticos policíclicos mediante cromatografía líquida de alta presión.
EOX	NEN 5735	BODEM Bepaling van het halogeengehalte afkomstig van niet-vluchtige,mete acetone en petroleumether extraheerbare organohaloeenverbindingen (EOX) Suelo. Determinación del contenido de halógenos procedentes de compuestos organohalogenados (EOX) no volátiles extraíbles en acetona y éter de petróleo.
Compuestos orgánicos volátiles	EPA 5030	Purge and trap Purga y trampa
	EPA 8021A	Halogenated volatiles by gas chromatography using photoionization and electrolytic conductivity detectors in series: capillary column technique. Determinación de compuestos halogenados volátiles por cromatografía de gases con detectores de fotoionización y conductividad electrolítica en serie. Técnica de columna capilar
	EPA 8260A	Volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS): capillary column technique. Determinación de compuestos orgánicos volátiles por cromatografía de gases/espectrometría de masas (GC/MS): técnica de columna capilar
Índice de fenoles		Extracción. Según metodología consensuada por el equipo redactor de esta guía metodológica
	ISO 6439	Determinación. Water Quality. Determination of Phenol Index. Calidad del agua – Determinación del índice de fenoles
Fenoles individuales	EPA 8040	Phenols by gas chromatography. Fenoles por cromatografía de gases

5.7.2 Análisis de otro tipo de muestras

Tanto para el análisis de muestras de agua como de gases, residuos y material biológico existen disponibles metodologías desarrolladas en ámbitos diferentes a la investigación de suelo contaminado que pueden ser igualmente utilizados en este campo.

Para el análisis de aguas, tanto subterráneas como superficiales, existe numerosa normativa de referencia (nacional /internacional) de probada eficacia en la determinación y cuantificación de los principales grupos de contaminantes y compuestos individuales. La mayoría de los laboratorios efectúan los análisis de aguas de acuerdo a procedimientos o métodos standard.

Se recomienda consultar el documento *Guía Metodológica de Análisis Químico* para obtener información detallada acerca del análisis de otro tipo de muestras diferentes a las de suelo tomadas en emplazamientos contaminados.

5.7.3 Control de calidad en el laboratorio

El empleo de métodos normalizados de análisis, no garantiza, por sí solo, la obtención de resultados de la calidad adecuada, entendida ésta como cercanía al valor verdadero del contenido de los analitos buscados. Los resultados erróneos pueden producirse por multitud de causas, entre las que cabe conceder una importancia clave a los efectos de matriz imprevistos en la muestra, al mal funcionamiento y/o calibración del equipo utilizado, así como a los errores cometidos por personas que lleven a cabo el análisis. Por ello, la incorporación y adherencia a las prácticas de control de calidad en cualquier laboratorio analítico resultan indispensables.

En un laboratorio de análisis químico el programa de control de calidad debe particularizarse para cada una de las determinaciones de dicho laboratorio que quiera contemplar o definir como *sujetas a control de calidad*, y ha de incluir todas las acciones referentes a la manipulación y determinación de las muestras sujetas a análisis, desde su entrada hasta la expedición final de los resultados.

Elementos básicos del programa de Control de Calidad

- El desarrollo y la estricta adherencia a los principios de «*Buenas Prácticas de Laboratorio*»
- El uso congruente y continuado de «*Procedimientos Estándar de Operación*»
- El establecimiento y adherencia a protocolos cuidadosamente diseñados para determinaciones específicas
- El uso congruente y continuado de personal cualificado
- El uso de un equipamiento fiable y en buen estado de mantenimiento
- El uso de procedimientos de calibración y estándares adecuados
- La supervisión estricta de todas las operaciones por parte de personal altamente cualificado pero no directamente implicado en los trabajos que supervisa

6. ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA

6.1 INTRODUCCIÓN

La Investigación Exploratoria constituye la primera fase dentro del proceso de caracterización de la contaminación en el suelo, y tiene como objetivos principales:

- Confirmar niveles de contaminación que supongan o puedan suponer un riesgo inaceptable para la salud humana y los ecosistemas.
- Confirmar la hipótesis de distribución espacial de la contaminación y la obtención de datos relevantes que permitan el diseño óptimo de la siguiente fase.

Para la consecución de los objetivos definidos en esta fase de investigación, se han de llevar a cabo dos tipos de actividades, diferenciadas tanto por su naturaleza como por su ámbito de desarrollo:

- en primer lugar, aquéllas dirigidas a recopilar toda la información relativa al emplazamiento que pudiera ser de interés para la confirmación de los indicios de contaminación;
- en segundo lugar, las actividades que implican la toma y el análisis de las muestras recogidas en el emplazamiento.

Puesto que estas últimas pueden resultar costosas, es necesario en todos los casos realizar una buena recopilación de aquellos datos relevantes acerca del emplazamiento en estudio, siendo recomendable realizar un esfuerzo considerable en la recopilación y evaluación de la información disponible. En casos excepcionales, estos resultados pueden conducir a la paralización de la investigación y en consecuencia a la clasificación del emplazamiento como no sospechoso de estar contaminado cuando no se hayan detectado indicios fundados de una potencial afección al suelo.

Por otro lado la calidad y el éxito de la caracterización de un determinado emplazamiento, tiene como elemento clave la definición de una estrategia de muestreo clara en cuanto a su alcance (número de puntos de muestreo, ubicación y medios a muestrear) y objetivos (obtención de información fidedigna acerca de la existencia y concentración de determinados compuestos o elementos químicos).

6.2 RECOPIACIÓN PREVIA DE INFORMACIÓN

Ya se ha mencionado la importancia que las actividades iniciales de recopilación de información tienen sobre la marcha y resultados de las sucesivas fases de investigación. En todo proceso de recopilación de información tres son los grupos de tareas que deben llevarse a cabo:

- **estudio histórico** dirigido a la recopilación de datos históricos del emplazamiento a través de consulta en diversas fuentes de información (mapas, fotografías, archivos, entrevistas, etc.)
- **análisis del medio físico** que permitirá obtener una primera visión de las posibles vías de dispersión de la contaminación a considerar en la elaboración de un modelo conceptual del emplazamiento en lo que a riesgos de exposición y dispersión se refiere.

- **visita de campo** con el fin de confirmar y/o completar la información recopilada e inspeccionar la situación actual del emplazamiento;

El desarrollo de las tareas mencionadas debe permitir cumplir con los objetivos genéricos de toda fase de recopilación de información que a continuación se indican:

- comprobar y confirmar los indicios que definieron al emplazamiento como potencialmente contaminado, indicando en la medida de lo posible la naturaleza y distribución de la contaminación;
- proporcionar la información necesaria para diseñar correctamente la estrategia de muestreo y análisis de la siguiente fase de investigación;
- identificar aquellas circunstancias que puedan poner en peligro la salud y la seguridad de investigadores, trabajadores y terceras personas ajenas a la investigación con el fin de determinar los procedimientos y precauciones especiales durante las operaciones a desarrollar en el emplazamiento.

6.2.1 Estudio histórico

El estudio histórico constituye, sin duda alguna, una tarea fundamental dentro del proceso de investigación de la calidad de suelo ya que va a marcar desde un principio la calidad de los resultados finales de la investigación. Por ello, resulta de extrema importancia planificar adecuadamente al inicio de esta etapa de la fase de investigación exploratoria, la dedicación que será necesaria para la obtención de la mayor cantidad posible de información relativa a la evolución histórica de los usos habidos en el emplazamiento objeto de estudio.

El estudio histórico persigue conocer en profundidad la evolución cronológica de los usos del suelo hasta el momento de inicio de la investigación y su interrelación con las posibles alteraciones de la calidad del mismo con el objetivo de:

- Confirmar los indicios previos que convierten al emplazamiento en sospechoso de estar contaminado
- Acotar las zonas a investigar en aras a dirigir más certeramente el diseño de muestreo
- Definir en la medida de lo posible la naturaleza de la contaminación simplificando la tarea de decidir sobre los contaminantes a analizar de las muestras extraídas
- Realizar una primera aproximación a los problemas que pueden representar la contaminación del suelo

Antes de dirigirse a las diferentes fuentes de información que se indican más adelante, es necesario reflexionar y plantearse claramente la estrategia a seguir en el estudio histórico, que dependerá en gran medida del tipo de emplazamiento a investigar (emplazamientos industriales, vertederos y puntos de vertido, tanques de almacenamiento subterráneo, ruinas industriales, etc.), considerando en cada caso los aspectos específicos de cada uno de ellos. La figura adjunta indica la información que se considera necesario recopilar para cada tipo de emplazamiento a fin de afrontar con garantías el estudio histórico.



Figura 5: Aspectos generales a recopilar según el tipo de emplazamiento en estudio

La siguiente tabla resume los aspectos más sobresalientes que deben considerarse durante el estudio histórico, sin diferenciar de forma específica los tipos de emplazamiento. En todo caso, se recomienda consultar la *Guía Metodológica de Estudio Histórico y Diseño de Muestreo* para obtener mayor información al respecto.

Antecedentes generales
<ul style="list-style-type: none"> - Ubicación geográfica - Orografía anterior a la implantación de la actividad - Superficie (libre y edificada) - Uso/s anteriores del solar y de las zonas adyacentes - Detalles de propietarios y usuarios - Actividades productivas - Permisos/licencias de vertidos o relleno - Usos previstos del emplazamiento - Inventario de surgencias (manantiales) y pozos de abastecimiento - Usos de las aguas subterráneas y superficiales - Estudio geotécnico del proyecto de construcción de las instalaciones (si existe)
Distribución del emplazamiento (tanto a nivel superficial como subterráneo)
<ul style="list-style-type: none"> - Localización cronológica de edificios, instalaciones, canalizaciones, tanques subterráneos, etc., tanto actuales como ya inexistentes - Localización de los procesos productivos - Identificación de áreas diferenciadas de especial importancia en cuanto a la contaminación del suelo (subestaciones eléctricas, zonas de depósito de residuos, áreas de trasvase de materiales, etc.)
Sucesos relevantes
<ul style="list-style-type: none"> - Accidentes e incidentes (fugas, incendios, emanaciones de gases, etc.) - Zonas de almacenamiento temporal - Paradas forzosas de la producción - Denuncias e inspecciones
Procesos productivos
<ul style="list-style-type: none"> - Análisis del proceso productivo - Características principales, composición química y cantidades de materias primas, reactivos, productos elaborados y residuos - Naturaleza de las emisiones gaseosas - Gestión de los residuos procedentes de la actividad productiva

En lo relativo a las fuentes de información a consultar, se incluye una relación de las más importantes y empleadas habitualmente en los estudios de investigación de la calidad del suelo, que en el caso de la CAPV corresponden mayoritariamente a emplazamientos industriales y vertederos. No es posible indicar exactamente los pasos a seguir en cada caso de investigación, pero si es aconsejable seleccionar aquellas fuentes cuya consulta resulte más productiva en cuanto a la calidad de los datos que proporcionen y a la relación de éstos con el coste y tiempo empleados.

El *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* constituye la fuente principal y una de las primeras que debe consultarse en cualquier investigación de la calidad del suelo, siendo recomendable la consulta de los inventarios específicos según la tipología de emplazamiento (vertederos, ruinas industriales, etc.).

Fuentes de información más importantes para la realización del Estudio Histórico
- Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo
- Catastro
- Registro de la propiedad
- Registro mercantil
- Cámaras de Comercio y Navegación
- Archivos municipales
- Registro industrial
- Servicios cartográficos (mapas y fotografías multitemporales, aéreas y terrestres)
- Documentación propia de las empresas
- Hemerotecas
- Inventarios y censos de vertederos
- Documentación administrativa
- Entrevistas directas

El análisis de la información recopilada debe permitir establecer una hipótesis para cada una de las zonas identificadas y su problemática asociada, empleándose si se considera necesario documentos síntesis (cuadros y planos resumen) de localización de puntos y zonas potencialmente contaminadas.

6.2.2 Análisis del medio físico

El objetivo principal del conjunto de tareas enmarcadas dentro del “análisis del medio físico” es recopilar información de naturaleza diversa (geológica, hidrogeológica, usos del agua, usos del suelo, vegetación, parámetros climatológicos, etc.) que permita alcanzar un conocimiento óptimo del emplazamiento y sus alrededores, con el fin de elaborar un “modelo conceptual” que recoja a nivel cualitativo el comportamiento de los potenciales contaminantes definidos en el Estudio Histórico.

La elaboración del modelo conceptual para el análisis de riesgos requiere la recopilación de datos generales relativos a diversos aspectos con incidencia directa sobre los medios preferenciales de dispersión de la contaminación así como sobre las rutas de exposición. En este sentido, no es posible definir de forma concisa la información a recopilar, pues las características de cada emplazamiento (intrínsecas y derivadas de las actuaciones realizadas en el mismo) determinan el enfoque que ha de darse, incidiendo de forma particular en aquellos aspectos estrechamente relacionados con las vías preferenciales de dispersión.

No obstante, se incluyen a continuación los datos generales que se estima importante considerar, para cuya recopilación se consultarán diversas fuentes (bases de datos, mapas

temáticos, etc.), completándose los datos precisos mediante visitas de campo, durante las cuales no se procederá generalmente a la toma de muestras o realización de análisis específicos.

Datos relevantes del análisis del medio físico
- Geología regional y local a escala adecuada
- Geomorfología
- Hidrogeología
- Meteorología local
- Vegetación
- Edafología (mapas de suelos de la Comunidad Autónoma del País Vasco)
- Localización de áreas de interés paisajístico y naturalístico o especialmente protegidas
- Geografía (usos del territorio, asentamientos, etc.)

Los resultados de esta tarea, sintetizados en el modelo conceptual propuesto, se utilizarán para ajustar el diseño de muestreo en la fase de investigación en campo.

6.2.3 Visita de campo

Antes de comenzar con el diseño del trabajo de campo es esencial que el personal encargado de la investigación se familiarice con el emplazamiento, para lo que se requiere una visita de inspección cuyo alcance y objetivos son los siguientes:

- confirmación de la información obtenida en el estudio histórico y análisis del medio físico;
- registro de aquellos datos no contemplados en las mencionadas tareas
- actualización de las condiciones del emplazamiento;
- evaluación «*in situ*» de la situación con el fin de comprobar si el estado real del emplazamiento constituye un riesgo inminente para la salud pública o el medio ambiente;
- identificación de posibles fuentes de contaminación en el entorno del emplazamiento;
- reconocimiento de las rutas de acceso y otras características, para el posterior diseño de la investigación;
- identificación de posibles puntos de muestreo de acuerdo a los propuestos en el modelo conceptual y consideración de otros adicionales;
- obtención de datos semicuantitativos sobre contaminantes volátiles, radioactividad y explosividad dirigidos al diseño de las medidas de seguridad para investigadores, trabajadores y terceras personas.

Es conveniente que la visita al campo se efectúe una vez se haya recopilado suficiente información sobre el histórico de actividades desarrolladas en el emplazamiento, así como sobre el medio físico, con el fin de optimizar resultados y evaluar la necesidad de reconsiderar algunos aspectos sobre los que es necesario reincidir una vez se dispone de datos actualizados. Es recomendable por otro lado, estudiar detalladamente la información recopilada antes de llevar a cabo la inspección, de forma que se pueda planificar la visita de la forma más adecuada y adoptar las medidas de seguridad que pudieran ser necesarias. Se incluye a continuación algunos aspectos a tener en cuenta en la planificación de la visita de campo.

Procedimiento general de la visita de campo
<ul style="list-style-type: none">• Planificar previamente, sobre los planos y mapas disponibles, la ruta a seguir durante la visita que se hará en su integridad y siempre que sea posible, a pie• Anotar en la ficha de campo todos los aspectos relevantes:<ul style="list-style-type: none">- Afección a los medios (estado del suelo, afección a las aguas, presencia de olores significativos, alteración de la vegetación, etc.).- Estado de las estructuras y edificaciones superficiales y subterráneas- Presencia de materiales de relleno, residuos y maquinaria abandonada- Ubicación y estado de funcionamiento de los servicios (telefónicos, eléctricos, aguas, etc.)- Cualquier modificación con relación a la información recopilada en el estudio histórico• Localizar las vías de acceso al emplazamiento para la posterior investigación• Localizar un área apropiada para el establecimiento temporal de las instalaciones durante la investigación y la recuperación del suelo• Localizar un punto de abastecimiento de agua apropiado• Registrar el teléfono y los servicios de emergencia más cercanos

En el caso de emplazamientos industriales y ruinas industriales cuya demolición sea inminente, es recomendable que la visita sea efectuada en compañía de personal técnico conocedor de la actividad productiva en el caso de las primeras y de la evolución productiva en el caso de las segundas, pues permitirá recoger aquellos aspectos específicos no contemplados en el estudio histórico. En el caso particular de las ruinas industriales con planes de demolición, se recomienda señalar claramente en un plano de detalle aquellas zonas que pudieran constituir un foco de interés en las siguientes etapas de investigación (zonas de acumulación de residuos y/o materiales abandonados con planes de uso distintos a los actuales, edificios con planes de demolición, etc.), ya que una vez desmanteladas las instalaciones aumentan sensiblemente las dificultades de identificación de las áreas problemáticas. La consulta de la *Guía Técnica de criterios ambientales para la recuperación de ruinas industriales* permitirá obtener mayor información sobre los aspectos a considerar en la visita de campo.

La información recogida durante la visita debe registrarse en una ficha de campo (ver modelo en la *Guía Metodológica de Estudio Histórico y Diseño de Muestreo*), que ha de contener todos los datos acerca de los aspectos más relevantes relacionados con el estado del emplazamiento y de los terrenos colindantes.

Datos generales de la Ficha de Suelos
<ul style="list-style-type: none">- Características del suelo en estudio (pavimentación, color, textura, ...)- Estado de edificaciones, instalaciones y accesos- Presencia de residuos, materiales y maquinaria abandonada- Estudio de conservación de canalizaciones y desagües- Posibles rutas de exposición- Alteraciones de las propiedades del suelo- Alteración de la vegetación- Calidad de las aguas superficiales- Calidad de las aguas subterráneas (surgencias)

Para los vertederos (en particular, los que acogen residuos industriales), se dispone de una ficha específica de recogida de datos (ver *Guía Técnica de diseño de planes de actuación en vertederos de residuos industriales*), parte de la cual se puede cumplimentar durante la visita de campo.

Aunque no es uno de sus objetivos esenciales, durante la visita de campo se pueden realizar mediciones y análisis *in situ* (normalmente con la ayuda de aparatos portátiles) siempre que se considere necesario. Los resultados obtenidos de esta manera servirán para diseñar las medidas de seguridad a adoptar durante la investigación, proporcionando a la vez datos adicionales para la elaboración de la estrategia de muestreo y análisis químico. No obstante, los resultados de estas mediciones deben ser interpretados cuidadosamente ya que datos negativos no siempre son una prueba concluyente de la ausencia de riesgo mientras que los datos positivos pueden no proporcionar suficiente información cuantitativa como para evaluar el riesgo.

6.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA RECOPIACIÓN PREVIA DE INFORMACION

Una vez finalizadas las tareas correspondientes a la recopilación previa de información, ésta debe analizarse minuciosamente desde una perspectiva de conjunto que integre todos los aspectos contemplados. El resultado de esta evaluación puede conducir a dos supuestos:

- a. **No existen indicios de potencial contaminación en el suelo.** En este caso, el suelo es catalogado como no sospechoso y en consecuencia no se requiere continuar con la investigación. Esta hipótesis puede ser formulada exclusivamente cuando la calidad de la información recopilada es muy buena.
- b. **Existen indicios de potencial contaminación en el suelo.** En este supuesto se deberá continuar con la fase de investigación en campo, tomando como punto de partida la elaboración de una hipótesis sobre la distribución espacial de la contaminación, identificando en la medida de lo posible subáreas diferenciadas.
En este último caso, pueden establecerse tres supuestos considerando la distribución de la contaminación en el propio emplazamiento y/o la identificación de la fuente potencial de dicha contaminación:
 - b.1 **Distribución homogénea.** en el plano horizontal, la distribución de la contaminación en el plano vertical no es habitualmente homogénea. Este tipo de distribución espacial puede ser originada por la deposición de partículas contaminantes desde la atmósfera, por la utilización de compuestos químicos en la agricultura o por la aplicación sobre el suelo de sedimentos o tierra contaminada, entre otras causas.
 - b.2 **Distribución heterogénea de fuente conocida.** Se considera como fuente potencial de contaminación a todas aquellas subáreas del emplazamiento que, de acuerdo a la información recopilada poseen una probabilidad significativa de estar contaminadas y de ser causa de contaminación. (por ejemplo tanque subterráneos para almacenamiento de combustible, zonas de vertido, etc.).
 - b.3 **Distribución heterogénea de fuente desconocida.** Este es el caso que se presenta cuando a pesar de conocer la existencia de fuentes de contaminación, la información disponible no permite su localización.

Además de establecer la hipótesis inicial de distribución espacial de la contaminación, la interpretación de los resultados de la recopilación de información debe conducir a la elaboración de un modelo conceptual esquemático en el que se detallen aspectos importantes para fases posteriores, como los medios a muestrear (suelo, agua, aire, vegetación, etc.),

naturaleza de los contaminantes más probables, rutas de exposición y potenciales receptores del riesgo.

6.4 INVESTIGACIÓN DE CAMPO

En términos generales, la investigación de campo en esta fase está orientada a la toma de muestras de varios medios para su posterior análisis en laboratorio, si bien suele ir acompañada de otros trabajos (análisis in situ, instalación de pozos de control, ensayos de permeabilidad y/o bombeo, investigaciones geofísicas, etc.) que pueden aportar información valiosa para la necesaria toma de decisiones a la conclusión de la Investigación Exploratoria.

6.4.1 Diseño de la estrategia de muestreo

En esta fase de investigación no se dispone de datos relativos a la concentración de los contaminantes en el emplazamiento, por lo que no existe un método teórico para el cálculo del número de puntos de muestreo del suelo fundamentado en la estadística. Ello hace necesario aceptar propuestas razonables basadas en el criterio experto. Así, el número de puntos de muestreo para esta fase de investigación debe calcularse teniendo en cuenta que debe ser proporcional al área de estudio, seleccionándose aquellos puntos de muestreo con mayor probabilidad de contaminación. La evaluación de los resultados de la recopilación previa de información servirá para elaborar este diseño.

6.4.1.1 Estrategia de muestreo de suelos

Una vez que un suelo ha sido catalogado como sospechoso en base a la información proporcionada por la recopilación previa de información, es objeto de esta fase de investigación confirmar la existencia de contaminación, a la vez que comprobar la hipótesis de distribución espacial formulada en base a estos mismos datos. Será, por lo tanto, la calidad de la información previa existente, junto con la hipótesis de distribución espacial de la contaminación, lo que determine la estrategia de muestreo en esta fase de investigación. En función de estos dos factores es posible clasificar los diferentes casos que pueden presentarse tal como indica el cuadro adjunto.

Hipótesis de distribución espacial de la contaminación	
CASO 1	Sin conocimiento previo
CASO 2	Con conocimiento previo fiable sobre la zona de estudio
Caso 2A	Distribución espacial homogénea
Caso 2B	Distribución espacial heterogénea de fuente conocida
Caso 2B1	Heterogeneidad de fronteras definidas
Caso 2B2	Heterogeneidad en gradiente
Caso 2C	Distribución espacial heterogénea de fuente desconocida.

La estrategia de muestreo para cada uno de los casos debe ajustarse a los principios recogidos en la Figura 6, teniendo siempre en consideración los conceptos globales de la fase de Investigación Exploratoria indicados en el siguiente cuadro.

Estrategia de muestreo del suelo en la Investigación Exploratoria	
Medios a muestrear	Suelo, agua subterránea, aire del suelo y residuos
Número de etapas de muestreo	Una
Localización de los puntos de muestreo	Según el caso de hipótesis de distribución espacial de la contaminación
Números de puntos de muestreo	Según el caso de hipótesis de distribución espacial de la contaminación
Profundidad mínima de muestreo	Profundidad estimada de alcance de la contaminación
Número de muestras por punto de muestreo	Una por estrato contaminado

No debe olvidarse al diseñar la campaña de toma de muestras en la fase de Investigación Exploratoria que ésta tiene un carácter dilucidativo en relación a la presencia de contaminación por lo que deberá estar enfocada hacia el muestreo de aquellos puntos en los que la probabilidad de detectar contaminación es mayor.

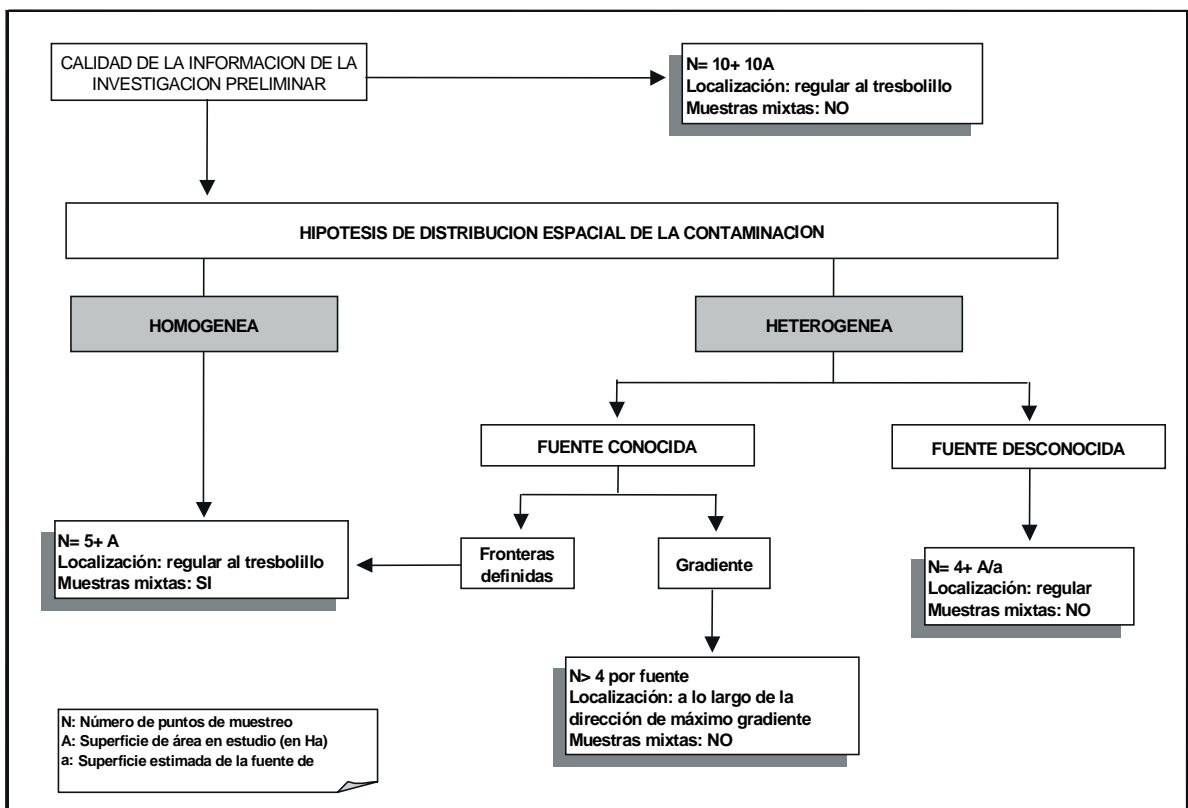


Figura 6: Parámetros básicos para el diseño del muestreo del suelo en la Investigación Exploratoria

6.4.1.2 Estrategia de muestreo de aguas subterráneas

La definición de la estrategia de muestreo de las aguas subterráneas en la Investigación Exploratoria debe responder al objetivo prioritario de confirmar la presencia o ausencia de afección sobre las mismas atribuible al emplazamiento en estudio.

Para ello, es requisito previo imprescindible conocer las pautas básicas del funcionamiento hidrogeológico del emplazamiento y su entorno próximo, en particular los niveles estratigráficos que con significativa capacidad de almacenamiento y transmisión de agua y las respectivas direcciones del flujo de ésta en el subsuelo. Aún en el caso de disponer de

información a este respecto recopilada en las anteriores fases de investigación, se considera necesario ejecutar dentro de la Investigación Exploratoria, al menos un sondeo de reconocimiento que atraviese la serie estratigráfica de interés.

La obtención de otros datos hidrogeológicos básicos también es objeto de esta fase de investigación, si bien para tal fin se utilizan técnicas diferentes al muestreo (ver epígrafe 6.4.3).

A partir de la información obtenida sobre las características hidrogeológicas del emplazamiento, en general se preverá la toma de un reducido número de muestras (procedentes, en especial, de la zona saturada), cuya localización debe responder al objetivo antes señalado. Para ello, serán necesarias, como mínimo, dos muestras (una aguas arriba y otra aguas abajo del emplazamiento) situadas en las proximidades del foco contaminante. En caso de existir varios acuíferos potencialmente afectados, se debe dar prioridad a aquél que, desde el punto de vista hidrogeológico, sea más vulnerable a la contaminación procedente del foco (normalmente, el más superficial).

En todo caso, se recomienda considerar sistemáticamente la posibilidad de tomar muestras en pozos o puntos de agua preexistentes en las proximidades del emplazamiento, siempre y cuando posean características constructivas que garanticen la representatividad de los resultados analíticos posteriores.

En esta fase de investigación no resulta habitual realizar más de una campaña de muestreo de las aguas subterráneas, por no ser prioritario disponer de datos acerca de la variación temporal de la distribución de la potencial contaminación.

Para obtener información más detallada sobre el muestreo de las aguas subterráneas se recomienda consultar la *Guía Metodológica de Toma de Muestras* y la *Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y Seguimiento de Contaminantes en el Suelo y en las Aguas Subterráneas*.

6.4.1.3 Estrategia de muestreo del aire intersticial del suelo

El muestreo del aire intersticial del suelo en la Investigación Exploratoria suele plantearse en aquellos emplazamientos donde se sospecha que, debido a la presencia de contaminantes volátiles o semivolátiles, existen concentraciones significativas en la fase gaseosa del suelo, pudiendo darse además la migración de dichos contaminantes hacia zonas sensibles del entorno.

En la mayor parte de los casos, este tipo de muestreo se utiliza en la Investigación Exploratoria con el objetivo de obtener una primera aproximación a la extensión de la contaminación del suelo propiamente dicho, que permita optimizar el posterior muestreo del mismo (un caso típico es la investigación de emplazamientos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo).

En los vertederos mixtos con significativa presencia de residuos orgánicos biodegradables, el muestreo del aire intersticial (y la cuantificación del contenido en metano) constituye una herramienta útil, tanto para identificar zonas con distintos grados de actividad como para evaluar las posibilidades de migración del biogás al entorno próximo.

En todos los casos, la estrategia de muestreo más habitual se traduce en una malla regular en planta, en cuyos vértices se sitúan los puntos de muestreo. Las dimensiones de la malla pueden variar mucho en función de las del propio emplazamiento, tipo de suelo y contaminantes implicados. A título meramente orientativo, mallas de entre 25 y 50 metros de lado pueden ser útiles en vertederos de mediana y gran entidad. En emplazamientos de pequeñas dimensiones (por ejemplo, estaciones de servicio) el tamaño de la malla debe reducirse considerablemente.

En la componente vertical, el muestreo del aire intersticial suele realizarse a escasa profundidad, aunque depende del tipo de emplazamiento, situación de los focos de contaminación, profundidad del nivel freático, etc. A este respecto son habituales profundidades en torno a 1 metro y no suele muestrearse a más de 5 metros.

6.4.1.4 Estrategia de muestreo de otros elementos

La Investigación Exploratoria puede incluir el muestreo de otros elementos aparte de los anteriormente mencionados. Habitualmente, es el caso de residuos o materiales abandonados (por ejemplo, en ruinas industriales) o el de lixiviados en vertederos.

La finalidad de tales muestreos es obtener información básica acerca de las características de los residuos (en el caso de las ruinas), con vistas a decidir la forma de retirada y gestión adecuada de los mismos, o con vistas a acotar el tipo de afección previsible del suelo y/o las aguas subterráneas, en el caso de los vertederos. Como norma general, se recomienda evitar la toma de muestras compuestas en ambos casos y limitar el muestreo a aquellos residuos presentes en cantidades significativas y de los que no se posea información acerca de su composición y características.

En cualquier caso, el alcance del muestreo de estos elementos durante la Investigación Exploratoria suele ser limitado.

El muestreo de elementos bióticos durante la Investigación Exploratoria es excepcional.

6.4.2 Diseño del programa de análisis químico

El objetivo de la Investigación Exploratoria es doble: por un lado, confirmar la sospecha de contaminación formulada en base a datos previos disponibles y, por otro, elaborar la estrategia de la Investigación Detallada. Dada la trascendencia de estos dos objetivos en el proceso global de investigación, la preparación de un programa de análisis químico a este nivel debe hacerse de forma minuciosa.

6.4.2.1.1 Selección de los parámetros químicos

La selección de los parámetros químicos a analizar en esta fase irá dirigida hacia aquellos compuestos que con mayor probabilidad pueden encontrarse en el suelo en concentraciones anormalmente altas.

La selección de los contaminantes a determinar se hará en base a la información proporcionada durante la recopilación previa de información, y más concretamente por el

estudio histórico y las observaciones sensoriales realizadas durante la visita de campo. Al igual que ocurría en el diseño de la estrategia de muestreo, la calidad de esta información previa disponible permite la diferenciación de dos casos:

- emplazamientos para los que se dispone de información previa fiable
- emplazamientos para los que la información previa es insuficiente

La aproximación adoptada para la selección de los contaminantes a analizar es completamente diferente en ambos casos. Cuando se dispone de información histórica suficiente es posible relacionar las actividades desarrolladas sobre el emplazamiento con las sustancias químicas potencialmente presentes en el suelo (ver tabla siguiente), mientras que cuando los datos previos son insuficientes, el programa analítico debe abarcar un espectro predefinido de parámetros tanto individuales como globales (EOX, aceite mineral, etc.) que asegure una probabilidad suficiente de detección de cualquier posible contaminación. En el caso de que la determinación de alguno de los parámetros de amplio espectro condujera a la obtención de concentraciones superiores al nivel de referencia VIE-A (ver el documento *Calidad del Suelo: Valores Indicativos de Evaluación*), la investigación de laboratorio debería continuar hasta definir la naturaleza concreta de la contaminación.

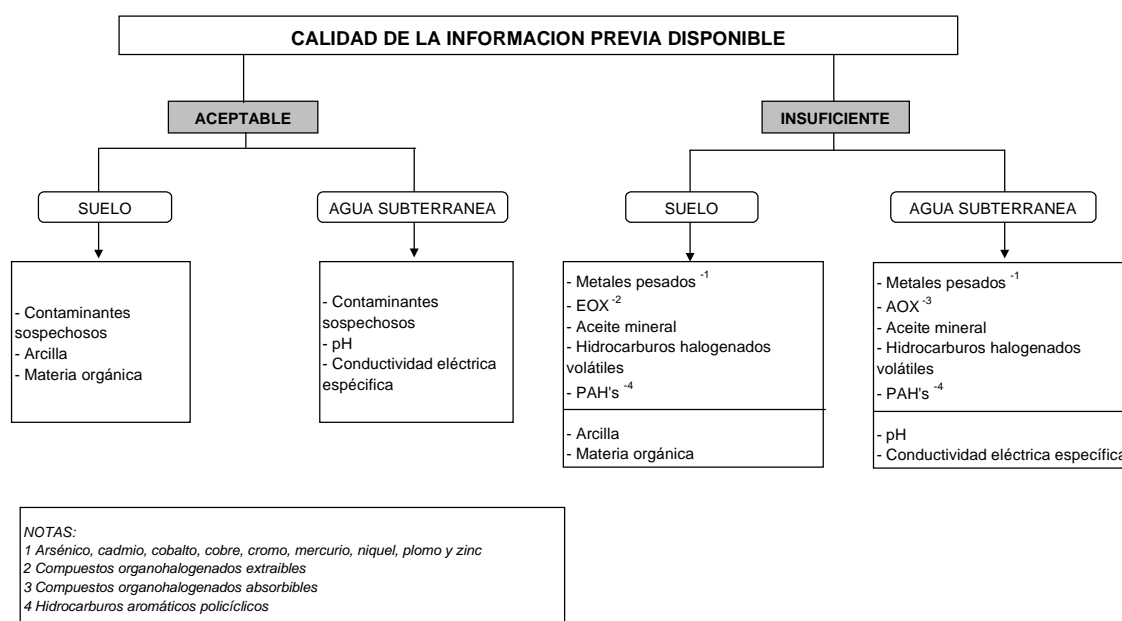


Figura 7: Selección de los parámetros a determinar en la Investigación Exploratoria

Se incluyen en la siguiente tabla, a modo de ejemplo, los contaminantes que con mayor probabilidad aparecen en suelos de algunas actividades industriales. No obstante, esta información es meramente orientativa y complementaria a la realización del estudio histórico y no excluye la posibilidad de que otros tipos de contaminantes puedan existir y, en definitiva, ser investigados.

Sector industrial, emplazamientos tipo y contaminantes probables del suelo		
Industria	Ejemplos de emplazamientos	Contaminantes probables
Química	Fabricación de ácidos/bases Fabricación de tintes Fabricación de fertilizantes y pesticidas Fabricación de productos farmacéuticos Fabricación de pintura Tratamiento de la madera	Ácidos; bases; metales; disolventes (e.g. tolueno, benceno); fenoles, compuestos orgánicos específicos
Petroquímica	Refinerías de petróleo Pacios de tanques Depósitos de almacenamiento de combustibles Destilerías de alquitrán	Hidrocarburos; fenoles; ácidos; bases y asbestos
Producción y transformación de metales	Primera producción de hierro Fabricación de acero Fundiciones Anodizado y galvanizado Construcción y desguace de barcos Chatarrerías	Metales; especialmente Fe, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd y Pb; asbestos,
Transporte	Garajes, fábricas de vehículos y talleres de mantenimiento Cocheras del ferrocarril	Combustibles; hidrocarburos; asbestos
Energía	Fábricas de gas Estaciones eléctricas	Combustibles (ej. carbón y polvo de coque); fenoles; cianuros; compuestos de azufre; asbestos
Extracción de minerales.	Minas	Metales (e.g. Cu, Zn, Pb); gases (e.g. metano); lixiviados.
Varios	Puertos, muelles y embarcaderos Curtidurías Fábricas de caucho	Metales compuestos orgánicos; metano; sustancias tóxicas, inflamables o explosivas

Nota: Pueden considerarse como contaminantes ubicuos los hidrocarburos, policlorobifenilos (PCBs), asbestos, sulfatos y algunos metales usados en pigmentos y recubrimientos. Estos pueden estar presentes en la mayor parte de los emplazamientos.

Además del conocimiento de los usos pasados del emplazamiento, el uso previsto es otro de los factores que juega un papel, aunque de menor importancia, en la definición del programa analítico. Como se observa en la siguiente tabla, es posible establecer una relación entre la naturaleza de los compuestos contaminantes y el peligro que su presencia puede suponer para los objetos de protección. Así, si se conoce el uso previsto, se recomienda diseñar la estrategia de análisis químico teniendo siempre en cuenta que el análisis de riesgos requiere datos cuantitativos que permiten relacionar en la medida de lo posible, concentraciones de contaminantes y el riesgo asociado a su presencia. Se incluyen en la siguiente tabla los riesgos asociados a algunos usos del suelo y los análisis que sería recomendable efectuar.

Relación entre algunos posibles usos del suelo y contaminantes a analizar		
Usos del suelo	Riesgo (nota 1)	Análisis propuestos
Jardines domésticos, áreas recreativas	Ingestión directa de suelo contaminado (niños)	- arsénico - cadmio - cromo - mercurio - cianuro libre - PAHs - fenoles - sulfato
Jardines domésticos, huertas y suelo agrícola	Absorción de contaminantes por los cultivos (nota 2)	- cadmio (nota 3) - plomo (nota 3)
Cualquier uso que permita el cultivo	Fitotoxicidad (notas 2 y 3)	- cobre - níquel - zinc
Áreas residenciales, edificios comerciales e industriales	Ataque a materiales de construcción e infraestructuras	- sulfato - sulfuro - cloruro - sustancias oleaginosas y bituminosas - fenoles - aceites minerales - amonio
Cualquier uso relacionado con la construcción de edificios	Fuego y explosión	- metano - azufre - materiales potencialmente combustibles (polvo de carbón, aceite, alquitrán, brea)
Peligros a corto plazo a investigadores y trabajadores en el emplazamiento	Contacto con los contaminantes durante los trabajos de demolición, limpieza y construcción	- PAHs - fenoles - asbestos - sustancias oleaginosas y bituminosas - materiales radiactivos
Cualquier uso que pueda producir la contaminación del agua	Contaminación de agua superficial y subterránea (nota 2)	- fenoles - cianuro - sulfato - metales solubles

Nota 1: Los peligros listados no son excluyentes mutuamente. Podría ser necesario tener en consideración las combinaciones de varios de ellos.

Nota 2: Debe medirse el pH del suelo, ya que afecta a la magnitud de estos peligros.

Nota 3: La absorción de metales perjudiciales o fitotóxicos para las plantas depende de la forma en que estén presentes estos elementos en el suelo. Puede ser necesario determinar las formas específicas si las concentraciones totales presentes indican la existencia de un posible riesgo.

6.4.3 Ensayos *in situ*

Durante la Investigación Exploratoria puede ser necesario ejecutar determinados ensayos tendientes a aportar información adicional sobre diversas características del emplazamiento, entre las cuales las más frecuentes son las siguientes:

- Localización y delimitación de focos contaminantes enterrados.
- Características hidrogeológicas del emplazamiento, determinantes de la posible afección de las aguas subterráneas y del potencial de dispersión de la contaminación a través de las mismas.

Para alcanzar el primer objetivo, las técnicas geofísicas de investigación (en particular, la resistividad eléctrica, la reflexión y refracción sísmica y el radar penetrante) pueden ser herramientas útiles (ver epígrafe 5.6.1).

En cuanto a las características hidrogeológicas básicas del emplazamiento, la Investigación Exploratoria debe culminar con un conocimiento suficientemente preciso del balance hídrico, las direcciones dominantes del flujo subterráneo y los valores que caracterizan la

capacidad de movimiento del agua en los distintos niveles del subsuelo (especialmente, la permeabilidad y transmisividad).

Aparte de los datos aportados a este respecto por la información bibliográfica recopilada y por los sondeos ejecutados con el fin de reconocer el terreno, tomar muestras y/o instalar pozos de control, es habitual tener que realizar durante esta fase de investigación ensayos *in situ*, entre los que cabe destacar los de permeabilidad y bombeo (ver epígrafe 5.6.2).

6.5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS E INFORME

6.5.1 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en la fase de Investigación Exploratoria deben ser interpretados con el fin de confirmar las hipótesis formuladas en base a la recopilación previa de información en relación a las siguientes cuestiones:

- la presencia de contaminación en el suelo del emplazamiento
- el tipo y la distribución espacial de la contaminación.

La Investigación Exploratoria, tal y como se diseña en cuanto al número de muestras tomadas y analizadas, permite confirmar o desechar la hipótesis de existencia de contaminación en el suelo. Sin embargo, pueden producirse casos que requieran una *investigación suplementaria* si se desea probar la hipótesis de distribución espacial de la contaminación con un grado de fiabilidad aceptable.

En esta fase de investigación, la interpretación y evaluación de los resultados correspondientes a las muestras de suelo se realiza exclusivamente por comparación de éstos con los Valores Indicativos de Evaluación (ver *Anexo I*), cuya superación conduce a la necesidad de tomar diferentes acciones.

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Exceder el valor VIE-A (valor de referencia) conlleva la confirmación de la presencia de contaminación en el suelo.- Exceder el valor VIE-B correspondiente al uso considerado, implica la posibilidad de que el estado del suelo suponga un riesgo inaceptable para la salud pública o el medio ambiente por lo que en este caso será perceptivo la realización de una Investigación Detallada.- Exceder el valor VIE-C supone la existencia de un riesgo inaceptable para el funcionamiento de los ecosistemas. En consecuencia, habrá de elaborarse un proyecto de recuperación. |
|---|

En caso de que se hayan analizado compuestos para los que no esté definido el valor VIE correspondiente, se emplearán para la interpretación de los resultados valores derivados o normativa de referencia en otros ámbitos geográficos ampliamente reconocidos (por ejemplo, los niveles guía holandeses para suelos), considerando en todo caso los resultados de esta evaluación como orientativos.

Para la interpretación de los resultados analíticos de muestras de agua, se recomienda acudir a los valores recogidos en la legislación autonómica, nacional y/o internacional relacionada, teniendo siempre en cuenta el tipo de agua implicada (superficial o subterránea) y el uso principal de la misma.

Cuando, como resultado de la evaluación de los resultados, se encuentren discrepancias significativas entre éstos y la hipótesis inicial de distribución de la contaminación (rechazo de la hipótesis) será necesario considerar los siguientes aspectos:

- Revisión del diseño de la Investigación Exploratoria teniendo en cuenta el nivel de detalle de la información proporcionada por la recopilación previa de información. Si fuera necesario debería ampliarse esta recopilación de información.
- Formulación de una nueva hipótesis en base no sólo a la información previa disponible, sino también a los datos obtenidos en la fase de Investigación Exploratoria.
- Ejecución de una nueva campaña de muestreo y análisis diseñada en función de la nueva hipótesis formulada;
- Reinterpretación de los resultados de las dos etapas de Investigación Exploratoria realizadas, si es éste el caso.

A continuación se proporcionan los criterios necesarios para la interpretación de los resultados de la Investigación Exploratoria en función de la hipótesis de distribución espacial.

6.5.1.1 Distribución homogénea de la contaminación

Los parámetros a evaluar para probar la hipótesis de distribución homogénea de la contaminación son dos:

- la concentración media de contaminante;
- la concentración de contaminante en las muestras mixtas.

Estos dos parámetros serán comparados directamente con los correspondientes Valores Indicativos de Evaluación proponiéndose, en base a los resultados de esta comparación, la forma más adecuada de continuar, bien con el proceso de investigación bien con las medidas de recuperación. En el siguiente cuadro se recogen las diferentes posibilidades que pueden producirse en la interpretación de los resultados de la Investigación Exploratoria.

RESULTADOS	INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS
$x_i^* < \text{VIE-A}$	<ul style="list-style-type: none"> - Hipótesis de contaminación rechazada - Finaliza el proceso de investigación
$x_i^{**} < \text{VIE-A}$ $x_i > \text{VIE-A}$	<ul style="list-style-type: none"> - Hipótesis de contaminación aceptada - Hipótesis de distribución espacial homogénea rechazada - Necesario analizar individualmente las muestras integrantes de la/s muestra/s mixtas con $x_i > \text{VIE-A}$ - Probar la hipótesis de distribución espacial heterogénea
$x_i > \text{VIE-A}$ $x_i < \text{VIE-B}$ CV*** bajo	<ul style="list-style-type: none"> - Hipótesis de contaminación aceptada - Hipótesis de distribución espacial homogénea aceptada - Finaliza el proceso de investigación - Adopción de medidas de control y seguimiento
$x_i > \text{VIE-A}$ $x_i > \text{VIE-B}$ CV bajo	<ul style="list-style-type: none"> - Hipótesis de contaminación aceptada - Hipótesis de distribución espacial homogénea aceptada - Necesario la realización de Investigación Detallada

* x_i = concentración de contaminante en las muestras mixtas

** x_i = media de la concentración de contaminante en las muestras mixtas

*** CV = coeficiente de variación

6.5.1.2 Distribución heterogénea de fuente conocida

Cuando se investiga un emplazamiento para el que la información previa ha permitido la localización exacta de la/s fuente/s de contaminación puede esperarse que la concentración del contaminante de interés supere el valor de referencia, VIE-A, en la mayor parte de las muestras analizadas. Cuando éste no sea el caso, es posible que la contaminación se localice en otros puntos o que el grado o extensión de los focos contaminantes sea menor de lo esperado. En estos casos la hipótesis es rechazada total o parcialmente.

Si por el contrario, se detectaran contenidos de contaminante por encima del valor VIE-A en la mayoría de las muestras analizadas, siendo el coeficiente de variación elevado, se aceptará tanto la hipótesis de contaminación como la de distribución heterogénea de la contaminación. Si en ninguno de los puntos muestreados se superara VIE-B, se dará por finalizada la investigación aunque se adoptarán las oportunas medidas de preservación y control.

Finalmente, cuando alguna de las muestras supere el valor VIE-B se exigirá la realización de una Investigación Detallada cuyo diseño se centrará alrededor de los focos de contaminación.

6.5.1.3 Distribución heterogénea de fuente desconocida

Cuando, debido a la insuficiente información previa disponible, se desconozca la localización de la/s fuente/s de contaminación en el emplazamiento investigado, cabe esperar que como resultado de la Investigación Exploratoria únicamente se detecte contaminación en una o unas pocas muestras de suelo. En este caso, la hipótesis inicial de distribución espacial será aceptada. Se exigirá entonces la realización de una Investigación Detallada centrada en la/s zona/s contaminada/s detectada/s.

Si en la mayoría de las muestras la concentración de contaminante supera VIE-A, o bien el área contaminada es más extensa de lo estimado *a priori*, o bien la contaminación se distribuye más homogéneamente que lo esperado, la hipótesis deberá ser revisada.

Cuando no se detecte el contaminante de interés en ninguna de las muestras analizadas, no puede afirmarse con un grado de fiabilidad aceptable que el suelo no esté contaminado. Puede ocurrir que la contaminación se localice en áreas no muestreadas o que la contaminación está causada por una sustancia química no analizada. En este caso, la hipótesis inicial deberá ser igualmente revisada.

6.5.2 Informe de la Investigación Exploratoria

El informe de la Investigación Exploratoria debe contener, al menos, la siguiente información:

- a. Descripción de los objetivos de la Investigación Exploratoria.
- b. Resumen de toda la información relevante recopilada en la fase de recopilación previa de información, incluyendo la división del emplazamiento en zonas diferenciadas y los datos que han permitido la formulación de las distintas hipótesis de distribución espacial.

- c. Descripción de la estrategia de investigación diseñada y ejecutada para probar las hipótesis acerca de la presencia, tipo y distribución espacial de la contaminación. Cuando la estrategia de muestreo o análisis químico difiera de lo recomendado en las correspondientes guías metodológicas, se explicarán las razones que justifiquen esta desviación.
- d. Los resultados de la investigación, incluyendo:
 - mapa del emplazamiento a escala adecuada con orientación (norte geográfico), coordenadas y leyenda;
 - esquema descriptivo del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento;
 - resultados de las observaciones sensoriales;
 - descripción del perfil del suelo en cada uno de los sondeos;
 - breve descripción de las muestras;
 - identificación de las muestras en relación a la posición exacta y profundidad del punto de muestreo;
 - listado de las muestras utilizadas para la preparación de muestras mixtas;
 - listado de las muestras analizadas incluyendo las determinaciones llevadas a cabo en cada una de ellas;
 - resultados de los análisis físicos y químicos realizados;
 - lista de los valores de calidad del suelo utilizados para la interpretación de los resultados;
 - listado de los métodos analíticos, límites de detección y equipamiento utilizado.
- e. Interpretación de los resultados, que debe incluir:
 - Interpretación de los resultados de los análisis (comparación con estándares de calidad);
 - Interpretación de los resultados de la investigación geológica e hidrogeológica;
 - Resultados de la verificación de las hipótesis;
- f. Conclusiones y recomendaciones
- g. Resumen del estudio

7. ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DETALLADA

7.1 INTRODUCCIÓN

La Investigación Detallada se llevará a cabo exclusivamente en aquellos casos en que los datos obtenidos durante la Investigación Exploratoria confirmen la existencia de una posible alteración grave del suelo ($X_i > VIE-B$)¹ y, por tanto, la necesidad de emprender acciones posteriores en este sentido. El objetivo de la Investigación Detallada es la caracterización del emplazamiento en relación a la naturaleza, concentración y extensión de la contaminación con el fin de proporcionar los datos necesarios para la evaluación correcta de los riesgos derivados de la situación de contaminación. La Investigación Detallada debe desarrollarse de forma sucesiva a la fase anterior.

7.2 ADAPTACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual preliminar elaborado durante la fase de Investigación Exploratoria deberá ser adaptado en función de los resultados obtenidos a la finalización de la misma, modificándose y/o incorporándose aquellos aspectos que se considerase oportunos, en especial los relativos a posibles focos de contaminación, tipo y concentración de contaminantes no contemplados, potenciales medios afectados, rutas de exposición y receptores de dicha contaminación.

Si bien durante la fase de investigación precedente, el modelo conceptual elaborado constituía el punto de partida para el diseño de la estrategia a seguir en la campaña de muestreo, durante esta fase el objetivo principal debe ser la identificación de los principales componentes del riesgo:

- los receptores de los riesgos
- las vías de exposición a dichos riesgos
- las rutas de migración o dispersión de la contaminación

7.2.1 Identificación de los componentes del riesgo

Desde un punto de vista general, la evaluación de riesgos debe permitir analizar los siguientes tipos de riesgos:

- Riesgos para la salud humana
- Riesgos para los ecosistemas
- Riesgos de dispersión y afección a otros compartimentos ambientales
- Riesgos para la explotación

Los tres primeros tipos corresponden a los adoptados como definitorios de la calidad del suelo en la CAPV mientras que el último de ellos engloba a todos aquellos elementos distintos de los ya considerados, cuya afección puede tener repercusiones en la rentabilidad y viabilidad del uso considerado. Sin embargo, para cada emplazamiento, los riesgos a evaluar deben concretarse en función de los usos del suelo, las características del

¹ X_i es la concentración del contaminante i en una o varias muestras de suelo

emplazamiento y la naturaleza de la contaminación. Por ello, el proceso de evaluación de riesgos debe iniciarse con la identificación de los posibles receptores sobre los que se enfocará posteriormente el análisis, cuya caracterización se contemplará en el diseño de la estrategia de investigación.

Los grupos habituales de receptores potenciales a considerar son:

- la población humana o segmentos de la misma
- los ecosistemas terrestres y acuáticos y/o poblaciones animales y vegetales específicos
- las aguas subterráneas y aguas superficiales
- bienes y/o servicios, principalmente explotaciones agrarias e infraestructuras

Definidos los receptores, se detallarán para cada uno las vías de exposición y las rutas principales de dispersión o migración de la contaminación.

7.2.2 Diseño de la estrategia de investigación

Definidos los receptores del riesgo, se debe formular la estrategia de investigación a seguir, la cual ha de cumplir un doble objetivo: la caracterización de la contaminación y la obtención de cualquier otra información necesaria para la evaluación de riesgos, información que se definirá específicamente para cada uno de los objetos de protección considerados.

Por tanto, la investigación debe estar enfocada a caracterizar correctamente los distintos elementos implicados en la relación causa-efecto que da lugar a un determinado riesgo. Entre ellos se distinguen:

- el causante: la contaminación, tipo y distribución espacial y temporal
- el receptor del riesgo: posibles objetos afectados, así como su distribución espacio-temporal para la caracterización de la exposición
- la ruta de migración de la contaminación: vía por la que el contaminante llega al receptor del riesgo
- factores locales: por un lado, aquéllos que influyen en el comportamiento ambiental de los compuestos (factores edáficos, climatológicos, hidrogeológicos, etc.), afectando a su disponibilidad y grado de dispersión potencial, y, por otro, los usos del suelo que determinan el grado de exposición real al contaminante.

7.3 INVESTIGACIÓN DE CAMPO

7.3.1 Diseño de la estrategia de muestreo

El objetivo del diseño de muestreo en esta fase se centra en la necesidad de analizar pormenorizadamente aquellas zonas que se encuentran contaminadas en base a la evaluación de los resultados obtenidos en la Investigación Exploratoria. Para este diseño se partirá del modelo conceptual adaptado y se tendrá en cuenta la distribución de las zonas o subáreas contaminadas, y la naturaleza de la contaminación (dato obtenido de los resultados de la fase anterior).

7.3.2 Diseño de la estrategia de muestreo del suelo

En lo que respecta al diseño de la estrategia de muestreo en suelos, la Investigación Detallada se diferencia de la Investigación Exploratoria en cuatro aspectos fundamentalmente:

- La intensidad del muestreo es considerablemente mayor; y depende de los riesgos aceptables en cada caso
- Requiere el muestreo, tanto en horizontal como en vertical, de puntos no contaminados con el fin de delimitar la extensión de la contaminación; es decir, se muestrearán tanto estratos sospechosos como no sospechosos
- Las exigencias del análisis de riesgos delimitarán también la profundidad del muestreo
- No se permite en ningún caso la preparación de muestras mixtas o compuestas para caracterización de la contaminación

La aproximación probabilística al cálculo del número de puntos de muestreo es la que mejor ajusta la investigación al objetivo predefinido y en consecuencia, serán los principios teóricos de esta aproximación los que definan este parámetro. No obstante, pueden presentarse obstáculos en su puesta en práctica (como restricciones económicas o temporales), que obliguen a la reducción del número de puntos.

En esta fase de investigación, las hipótesis de distribución espacial de la contaminación quedan restringidas a dos:

- **A:** Distribución homogénea de la contaminación
- **B:** Distribución heterogénea con fuente de contaminación conocida

La siguiente figura refleja los parámetros básicos a considerar en el diseño de muestreo de la Investigación Detallada.

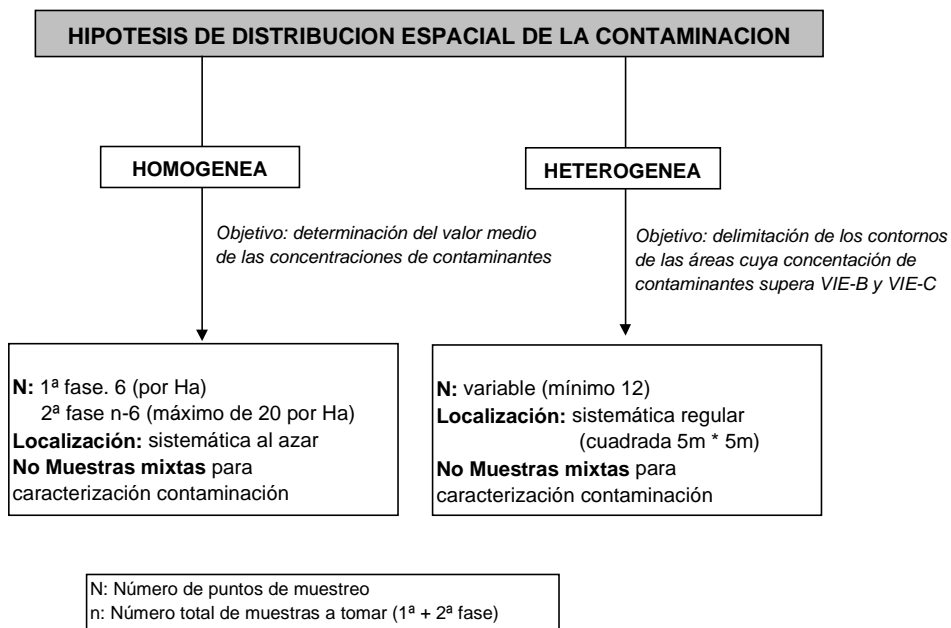


Figura 8: Parámetros básicos para el diseño de muestreo de la Investigación Detallada

Conceptos generales del diseño de muestreo en la Investigación Detallada
--

<i>Medios a muestrear:</i> todos los indicados en el modelo conceptual de riesgos
<i>Número de etapas de muestreo:</i> múltiples
<i>Localización de los puntos de muestreo:</i> dependiente del caso
<i>Número de puntos de muestreo:</i> dependiente del caso
<i>Profundidad mínima de muestreo:</i> al menos 1 m por debajo de la profundidad estimada de la contaminación
<i>Número de muestras por punto de muestreo:</i> una por metro o por estrato apreciable, contaminado o no

7.3.2.1 Distribución homogénea de la contaminación

Confirmada la hipótesis de distribución espacial homogénea de la contaminación, el objetivo de la estrategia de muestreo en esta fase es determinar con un grado de precisión aceptable, el valor medio de la concentración de la/s sustancia/s contaminante/s identificada/s en el área del emplazamiento.

Haciendo uso de los resultados analíticos obtenidos en la fase de investigación anterior, es posible estimar mediante estadística probabilística el número de puntos de muestreo necesarios para satisfacer los requerimientos de la Investigación Detallada, utilizando para ello la siguiente fórmula:

$$n = \frac{t^2}{E^2} \left(\frac{s}{\bar{x}} \right)^2$$

donde:

n: número de PDM (puntos de muestreo)

t: t de Student

E: intervalo de confianza asociado a la media muestral

s: desviación típica muestral

\bar{x} : valor medio muestral

No obstante, la aplicación de esta fórmula lleva en numerosas ocasiones a programas de muestreo inviables, por lo que se recomienda una aproximación a la determinación de la concentración media de los contaminantes mediante dos fases diferenciadas.

- En la primera fase se obtendrán datos que permitirán calcular la concentración media y la desviación típica para cada contaminante detectado y estrato muestreado.
- Mediante estos datos se evaluará la necesidad de emprender una segunda fase en función del grado de precisión de acuerdo a un límite de confianza de los resultados obtenidos que no puede superar el 20% de la concentración media. Se tomará en todo caso como 20 el número máximo de muestras a tomar por hectárea y estado en la Investigación Detallada.

El desarrollo de ambas fases se encuentra ampliamente descrito en la *Guía Metodológica de Estudio Histórico y Diseño de Muestreo*.

7.3.2.2 Distribución heterogénea con fuente de contaminación conocida

En este caso, el objetivo de la estrategia de muestreo en la Investigación Detallada será la caracterización exhaustiva de la naturaleza, concentración y extensión de la contaminación presente en el emplazamiento, tanto en el plano vertical como en el horizontal.

Para ello, el muestreo debe iniciarse en aquellos puntos en que la concentración de los contaminantes investigados durante la Investigación Exploratoria supera el valor VIE-B, avanzando hacia el exterior de forma concéntrica en etapas sucesivas.

En el caso que se expone, no se proporciona ninguna expresión matemática que permita el cálculo teórico del número de puntos de muestreo. Dada la gran diversidad que presentan las situaciones que se engloban dentro de este epígrafe, se ha considerado más adecuada la utilización del denominado criterio STOP definido en el siguiente cuadro.

Criterio STOP	En el plano horizontal: finaliza el muestreo cuando desde el centro de la contaminación hacia afuera, se encuentran dos filas de muestras con concentraciones inferiores al nivel VIE-B. En el plano vertical: finaliza el muestreo cuando se encuentran dos muestras de 1 m de profundidad cada una con concentraciones inferiores al nivel VIE-B.
Reglas de muestreo	
Plano horizontal:	En círculo: alrededor de los puntos de muestreo en los que se detectó contaminación en la fase de investigación exploratoria. En línea dentro de la malla: si la concentración en un punto supera el nivel VIE-B, se muestrearán, en la dirección de la malla, los dos puntos de intersección siguientes. Si no se supera el nivel VIE-B se muestreará un único punto. En las diagonales: cuando la concentración en una muestra supere el nivel VIE-B, se muestrearán las intersecciones de la malla, más próximas en diagonal.
Plano vertical	Cada perforación debe extenderse hasta que dos muestras consecutivas, de 1 m de profundidad, presenten concentraciones inferiores al nivel VIE-B.

7.3.2.3 Estrategia de muestreo de aguas subterráneas

Además de la delimitación de la extensión de la contaminación del suelo, es objeto de la Investigación Detallada acotar el penacho de agua subterránea contaminada. Para la correcta determinación de los límites de la posible mancha contaminante es necesario instalar pozos de control tanto dentro como en las proximidades de la misma, es decir, aguas arriba, aguas abajo y lateralmente al foco contaminante, con el fin de obtener datos de referencia y caracterizar así mejor la afección producida por el foco en estudio.

Una serie de pozos alineados según el eje longitudinal del penacho determinará claramente su longitud y su espesor. Por otra parte, una serie de pozos alineados perpendicularmente a ese eje determinará su anchura y el espesor en este sentido. Este diseño “*en cruz*” de los pozos resulta ser, generalmente, el más idóneo para la delimitación de la pluma contaminante, si bien no siempre es aplicable (por ejemplo, en un sistema kárstico).

Zonas propicias para la ubicación de piezómetros	
-	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 aún estando «lejos» del foco pudieran ser objeto de cierta sospecha, o requirieran ser muestreados simplemente por motivos de seguridad.

En resumen, un diseño de muestreo adecuado en principio para la mayoría de los casos (con excepción de medios kársticos), contemplaría una red de pozos dispuestos en cruz, con centro en el foco contaminante, con al menos un pozo aguas arriba (como referencia) y varios aguas abajo. El número de estos últimos y su distancia al foco dependerá de la permeabilidad del medio, de manera que cuanto más permeable sea éste, mayores distancias desde el foco en el sentido del flujo habrá que controlar. Al mismo tiempo, esta red de pozos debe permitir muestreos adecuados a las profundidades que interese, en función de la forma del penacho contaminante.

Para profundizar en estos aspectos, se recomienda consultar la *Guía Metodológica de Toma de Muestras*, y la *Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas*.

7.3.3 Diseño del programa de análisis

7.3.3.1 Diseño del programa de análisis químico

En lo que a análisis químico se refiere, el objetivo de esta fase es caracterizar los contaminantes presentes en el emplazamiento y su entorno de forma que se pueda abordar posteriormente la evaluación de riesgos sobre bases suficientemente fiables. Por tanto, el programa de análisis químico habrá de diseñarse de modo que se alcance dicho objetivo satisfactoriamente.

7.3.3.1.1 Análisis de muestras de suelo

El programa de análisis habrá de diseñarse de tal forma que permita determinar la naturaleza y concentración de la contaminación y además recabar información sobre la constitución local del suelo, debiendo contemplarse los siguientes grupos de parámetros:

- **Compuestos contaminantes sospechosos**, definidos en base a la información proporcionada por los resultados analíticos obtenidos en la Investigación Exploratoria.
- **Otros compuestos contaminantes**, (metales pesados, EOX, PAHs, aceite mineral, cianuros, ...) que pudiendo estar presentes en el suelo hayan pasado desapercibidos en el estudio histórico. Si alguno de estos parámetros superara el nivel de referencia en su concentración debería entonces ser incluido dentro del protocolo general de investigación detallada. Si esto sucediera para un parámetro de amplio espectro o grupo

de compuestos sería necesaria la identificación y cuantificación de los contaminantes individuales.

- **Parámetros generales del suelo** que permitan una interpretación más ajustada de los resultados en lo que respecta a la predicción de la dispersión de la contaminación y de la exposición a la misma, facilitando la evaluación de riesgos.

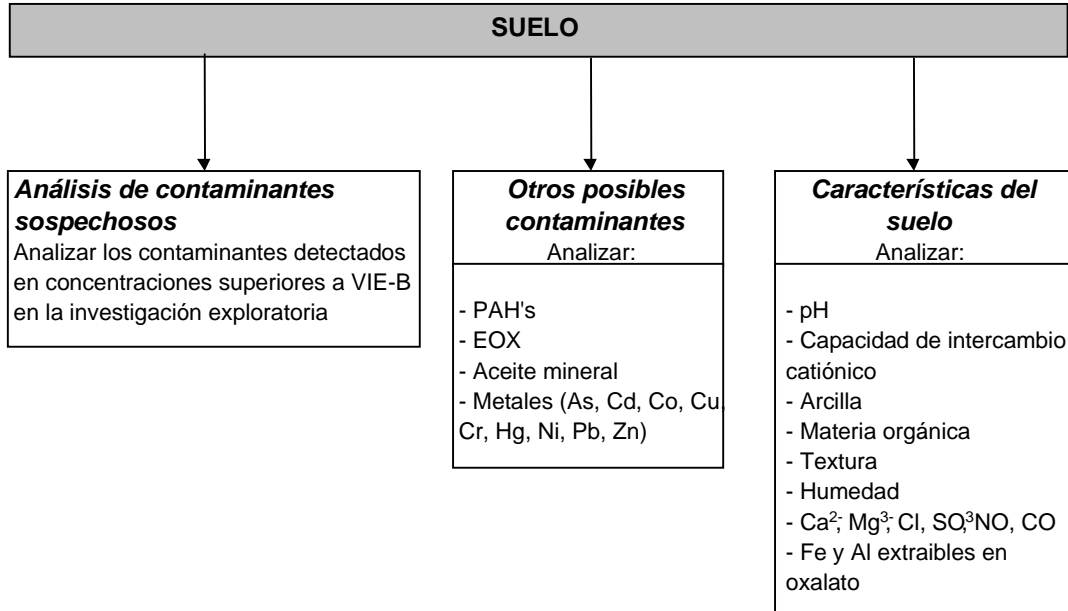


Figura 9: Esquema del programa de análisis químico para muestras de suelo en la Investigación Detallada

7.3.3.1.2 Análisis de muestras de agua subterránea

El agua subterránea deberá ser analizada en esta fase, al igual que las muestras de suelo, en busca tanto de contaminantes sospechosos como de compuestos químicos no detectados en la Investigación Exploratoria y que obedecen a una caracterización general.

En esta fase resulta imprescindible la determinación del pH y de la conductividad eléctrica en las muestras individuales; esta determinación deberá realizarse *in situ*, inmediatamente después de la toma de muestras.

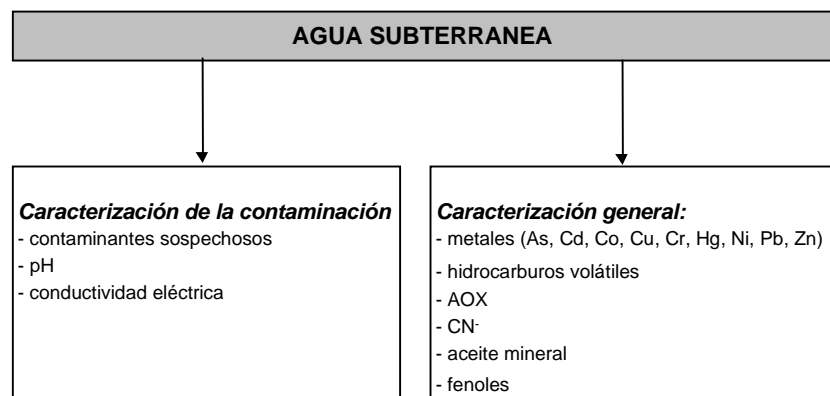


Figura 10: Esquema del programa de análisis químico para muestras de aguas subterráneas en la fase de Investigación Detallada

7.3.3.2 Diseño del programa de análisis complementarios

La decisión de llevar a cabo análisis complementarios estará definida por la necesidad de disponer de datos adicionales para acometer la evaluación de riesgos. En este caso deberán incorporarse al diseño de la estrategia de muestreo y al programa de análisis aquéllos que se consideren oportunos.

En general, la aplicación de modelos de transporte de contaminantes en aguas subterráneas requiere datos sobre características del subsuelo que dependen del modelo concreto seleccionado. A este respecto, los datos que habitualmente se deben conocer son los siguientes: granulometría, contenido volumétrico de agua, densidad natural y seca, contenido de la fracción de carbono orgánico, conductividad hidráulica saturada y porosidad.

Es importante determinar al inicio de la campaña de muestreo si se van a efectuar este tipo de análisis, puesto que para la determinación de alguno de los parámetros citados se requieren condiciones especiales en la toma de la muestra.

7.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

Si bien el alcance de la Investigación Detallada incluye en todos los casos una evaluación de riesgos, cuyas conclusiones serán determinantes para la adopción de medidas en el emplazamiento, se recomienda efectuar al término de la investigación de campo y análisis de laboratorio una evaluación de los resultados obtenidos, en particular, los analíticos.

La interpretación de los resultados de los análisis correspondientes a las muestras de suelo se realiza por comparación de éstos con los valores indicativos de evaluación (ver *Anexo I*), para lo cual se empleará:

- la concentración media de cada contaminante en todo el área, si la hipótesis de distribución de la contaminación es homogénea
- la concentración de cada contaminante en cada una de las muestras, si la hipótesis de distribución de la contaminación es heterogénea

De acuerdo con estos criterios, pueden darse los casos que resume la tabla adjunta.

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Exceder el valor VIE-A (valor de referencia) conlleva la necesidad de adoptar medidas de preservación y control.- Exceder el valor VIE-B, correspondiente al uso considerado, implica la posibilidad de que el estado del suelo suponga un riesgo inaceptable para la salud pública o el medio ambiente. Será el análisis de riesgos específico del emplazamiento el que establezca la necesidad de adoptar medidas correctoras.- Exceder el valor VIE-C, supone la existencia de un riesgo inaceptable para el funcionamiento de los ecosistemas. En consecuencia habrá de elaborarse un proyecto de recuperación. |
|---|

Si las concentraciones de referencia superan el valor VIE-C derivado para la protección de los ecosistemas, será preceptivo redactar un proyecto de saneamiento que contemplará las medidas adecuadas para la minimización de riesgos. Por otro lado, si la distribución de la

contaminación es homogénea y el resultado de la expresión $x_i + 3\sigma^2$ es mayor que el valor VIE-C, será necesario considerar la adopción inmediata de medidas dirigidas a la reducción o eliminación del riesgo.

En este momento se debe abordar, además, la evaluación de los resultados del análisis de muestras de otros medios (agua, vegetales, etc.), mediante su comparación con los estándares de calidad y regulaciones existentes o de referencia, tal como se ha mencionado al tratar la Investigación Exploratoria.

7.5 EVALUACION DE RIESGOS

7.5.1 Introducción

De acuerdo con la estrategia de investigación descrita en el presente Manual Práctico, la evaluación de riesgos constituye la culminación de la Investigación Detallada de cualquier emplazamiento, por lo que se convierte en la herramienta clave para la toma de decisiones acerca de las medidas a adoptar en el mismo.

En el marco de la investigación de un suelo contaminado, se define la evaluación de riesgos como un proceso de identificación, medida y comparación de diversos parámetros mediante el cual se identifican y evalúan los riesgos potenciales y reales que la presencia de ese suelo puede suponer para los objetos protegidos.

Los objetos protegidos a considerar sistemáticamente son la población humana (en la medida que pueda ver afectada su salud) y los elementos de los ecosistemas (particularmente flora y fauna). En ciertos emplazamientos puede tener además relevancia la evaluación de los riesgos sobre la productividad de explotaciones agrícolas y forestales y/o sobre infraestructuras y cimentaciones de edificios.

En el contexto mencionado, el riesgo se define en función de la probabilidad de que un suceso adverso ocurra como resultado de la exposición a la contaminación del suelo y de la magnitud de las consecuencias o impacto de dicho suceso sobre los objetos a proteger.

El objetivo de la evaluación de riesgos es proporcionar, a partir de la estimación cuantitativa o cualitativa de los riesgos que la presencia de un suelo contaminado comporta para los objetos protegidos, la información y útiles necesarios para evaluar la probabilidad de ocurrencia de los efectos previsibles, teniendo en cuenta criterios tanto sociales (niveles de protección admitidos o exigidos) como económicos y tecnológicos. Dicho proceso de evaluación ha de servir de base para la toma de decisiones sobre la aceptabilidad del riesgo y las medidas a adoptar, lo que comúnmente se conoce como gestión del riesgo.

Para ampliar detalles acerca del proceso y metodología de evaluación de riesgos, se recomienda consultar la *Guía Metodológicas de Análisis de Riesgos para la salud humana y los ecosistemas* y la *Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas*.

² x_i : concentración media de contaminante; σ : desviación típica

7.5.2 Protocolo general de evaluación de riesgos

Los elementos básicos que conforman cualquier protocolo o proceso de evaluación de riesgos se pueden resumir en tres:

- definición del modelo conceptual que describe el emplazamiento en términos de riesgo, elaborado a partir de la información existente sobre el mismo
- identificación de los receptores de riesgo, medios y vías de exposición
- evaluación de los riesgos y toma de decisiones

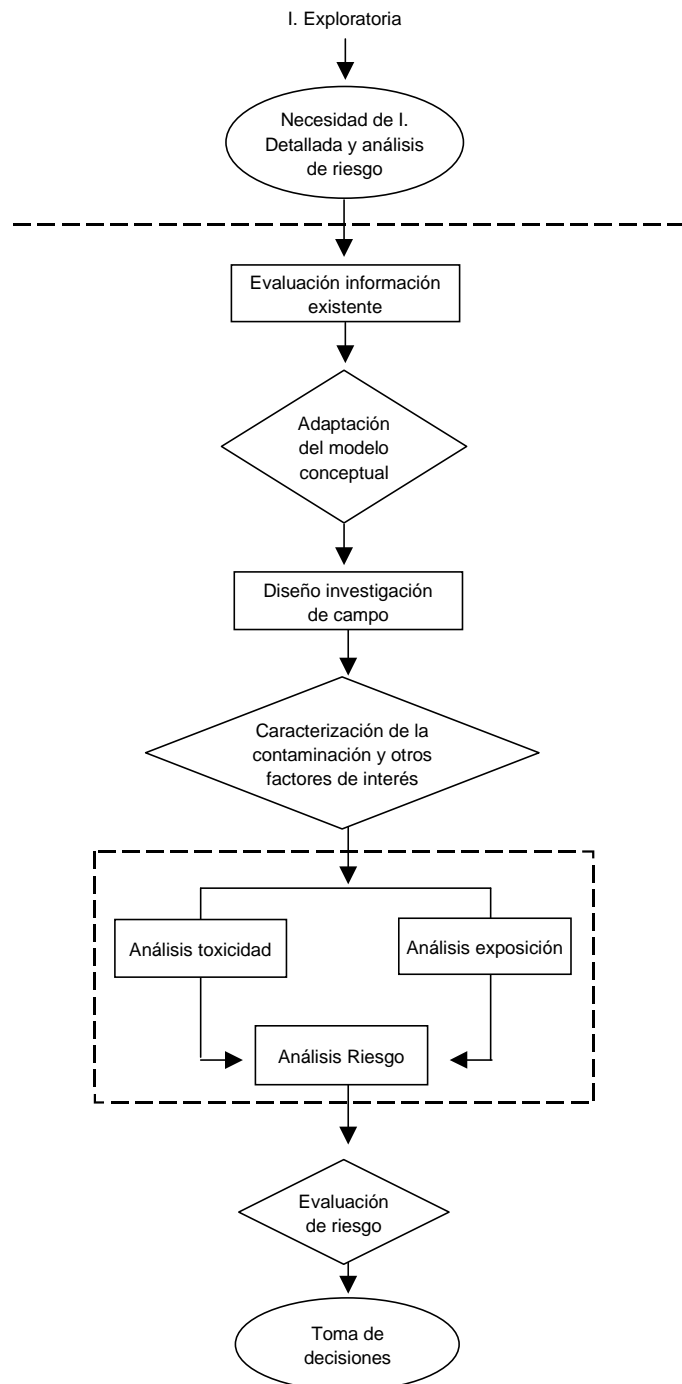


Figura 11 Esquema general del protocolo de evaluación de riesgos

El proceso comienza con la adaptación del modelo conceptual previamente elaborado, incorporando al mismo la información oportuna. El nuevo modelo conceptual permitirá ajustar el diseño de la investigación de campo que deberá cumplir un doble objetivo: efectuar una caracterización de la contaminación lo más completa posible e identificar los receptores de riesgo, medios y vías de exposición relevantes para el caso, así como los análisis complementarios necesarios para su evaluación.

Una vez realizada la investigación de campo, se debe estar en disposición de abordar el análisis de la toxicidad, exposición y consecuente riesgo para los distintos contaminantes, vías y receptores identificados. El resultado final de este proceso es la evaluación conjunta de los riesgos y la toma de decisiones sobre las medidas a adoptar a la vista de lo anterior.

En los epígrafes siguientes se desarrollan los principales aspectos que caracterizan a cada uno de los elementos de la evaluación de riesgos propiamente dicha.

7.5.3 Evaluación de riesgos

Aunque el protocolo específico para la evaluación de riesgos propiamente dicha difiere de unos receptores a otros, es posible describir una metodología común, caracterizada por la ejecución de las siguientes etapas:

- análisis de la peligrosidad o toxicidad
- análisis de la exposición
- análisis de riesgos

A continuación se desarrollan para cada una de ellas los aspectos metodológicos y prácticos de mayor interés.

7.5.3.1 Análisis de la peligrosidad o toxicidad

Esta etapa tiene por objeto la identificación de los elementos o compuestos potencialmente críticos para los objetos protegidos, la caracterización del tipo de efectos que los mismos comportan y la evaluación de las relaciones dosis-efecto, con el fin de predecir la tasa de respuesta al contaminante para un amplio rango de dosis. Se basa en datos y características de cada contaminante referidas a su comportamiento ambiental y toxicológico (movilidad, persistencia/degradabilidad, toxicidad y ataques a materiales).

El cuadro adjunto resume las características de los contaminantes que, referidas a su comportamiento ambiental y toxicológico, suelen utilizarse en el análisis de la peligrosidad o toxicidad.

Características de los contaminantes referidas a su comportamiento ambiental y toxicológico utilizadas en el análisis de la peligrosidad o toxicidad	
a. Movilidad:	<ul style="list-style-type: none"> - estado físico - coeficiente de solubilidad - coeficiente de partición octanol-agua - constante de Henry - presión de vapor - coeficiente de difusión en aire - constantes ácido-base - constantes de complejación - constantes de oxidación-reducción - coeficientes de permeación a través de distintos materiales
b. Persistencia/degradabilidad:	<ul style="list-style-type: none"> - vida media (fotodegradación, degradación química y degradación microbiana) - factores de transferencia, eliminación o bioconcentración en los medios biológicos
c. Toxicidad:	<ul style="list-style-type: none"> - datos toxicológicos para humanos - toxicidad para especies no humanas: valores NOAEC(L), LOAEC(L), EC50, para parámetros relacionados con la reproducción, crecimiento y productividad
d. Ataque a materiales:	<ul style="list-style-type: none"> - índice de corrosividad - índice de inflamabilidad

Para los receptores genéricos considerados (salud humana y ecosistemas), se incluyen de forma resumida en la siguiente tabla los objetivos y aspectos a considerar en el análisis de la toxicidad.

Análisis de la toxicidad para los receptores identificados		
Receptor	Objetivo	Aspectos a considerar
Salud humana	Ponderar las evidencias disponibles en relación al potencial de los compuestos de causar efectos adversos	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación del peligro (tipo de efecto adverso asociado a cada sustancia y tipo de población expuesta) - Establecimiento de las relaciones dosis-respuesta - Identificación de las incertidumbres asociadas a los anteriores componentes
Ecosistemas	Identificación de los posibles efectos ecológicos sobre los componentes de un ecosistema derivados de la acción de potenciales estresores (*)	<ul style="list-style-type: none"> - Recopilación de datos relativos a los efectos del estresor - Evaluación de los datos respecto a los parámetros de evaluación y medida definidos - Elaboración del perfil de respuesta al estresor (o de efectos ecológicos)

(*) Estresor: entidad física, química o biológica capaz de inducir efectos adversos a cualquiera de los niveles de organización del ecosistema. En el ámbito de la Guía Metodológica para el Análisis de Riesgos para la Salud Humana y los Ecosistemas, el método empleado para la evaluación de riesgos se enfoca al análisis de los efectos causados por estresores de tipo químico.

7.5.3.2 Análisis de la exposición

Su objetivo es la estimación de la tasa de contacto de los objetos protegidos con las sustancias contaminantes identificadas a partir de, por un lado, la caracterización del escenario de exposición (en base a características locales del emplazamiento relacionadas con el medio físico, los usos del suelo y las poblaciones u objetos expuestos) y por otro lado, de la caracterización de la naturaleza y extensión de la contaminación.

Para los receptores considerados (salud humana y ecosistemas), se resumen en la siguiente tabla los objetivos y aspectos a considerar en el análisis de la exposición.

Análisis de la exposición para los receptores identificados		
Receptor	Objetivo	Aspectos a considerar
Salud humana	Estimar el tipo y magnitud de la exposición a los contaminantes tanto en el emplazamiento como en el área de influencia del mismo afectada a través de la dispersión.	<p><i>Caracterización del escenario de exposición</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificación de las poblaciones expuestas - Caracterización de los condicionantes físicos - Determinación de los usos actuales y futuros e identificación de las actividades asociadas a cada uso y caracterización de sus patrones <p><i>Identificación y análisis de las rutas de exposición</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificación de las fuentes de contaminación y/o medios afectados - Evaluación del transporte y destino de los contaminantes en los diversos medios - Identificación de los puntos y vías de exposición - Selección de rutas de exposición a evaluar <p><i>Estimación de la exposición</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Estimación de la exposición para cada una de las rutas - Combinación de la exposición por diferentes vías - Análisis de la incertidumbre
Ecosistemas	Evaluar la interacción (coexistencia o contacto) del estresor con los componentes ecológicos afectados.	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterización del estresor en relación a su distribución inicial y patrón de variación espacio-temporal - Caracterización del ecosistema en relación a la distribución temporal y espacial de los componentes afectados y de aquellos atributos que influyen en la interacción con el estresor - Elaboración del perfil de exposición

Aunque algunas tareas relativas al análisis de la exposición son realizadas para la elaboración del modelo conceptual, el proceso de análisis detallado de la exposición comienza una vez que se dispone de datos analíticos del emplazamiento validados y debe efectuarse para las condiciones actuales y futuras de uso del suelo. El resultado final de dicho análisis es el cálculo de las dosis que previsiblemente recibe el receptor (salud humana y ecosistemas) para cada una de las rutas. Dicha cuantificación constituye un elemento crítico del proceso de análisis de riesgo.

Por su interés práctico, se resumen a continuación algunas consideraciones relacionadas con los aspectos contemplados en la evaluación de la exposición dentro de una evaluación de riesgos para la salud humana.

Caracterización del escenario de exposición. Su objetivo es la evaluación cualitativa de la exposición a la contaminación de las poblaciones en el lugar y del entorno, procediéndose a la identificación de las poblaciones expuestas y en especial las subpoblaciones especialmente sensibles (guarderías, escuelas, hospitales, huertas propias, etc.) y caracterización de los condicionantes físicos del emplazamiento que influyen en la exposición, entre los que hay que considerar (clima, meteorología, geología, vegetación, tipo de suelo, hidrología de las aguas subterráneas y aguas superficiales).

El escenario de exposición queda caracterizado con la determinación de los usos del suelo (actuales y futuros) y la identificación de las actividades asociadas a cada uno de ellos, para los que se determinarán los correspondientes patrones de actividad, periodos de exposición, lugar de desarrollo de los trabajos, cambios de actividad estacionales, hábitos alimenticios de la población, etc., (Ver Figura 12).

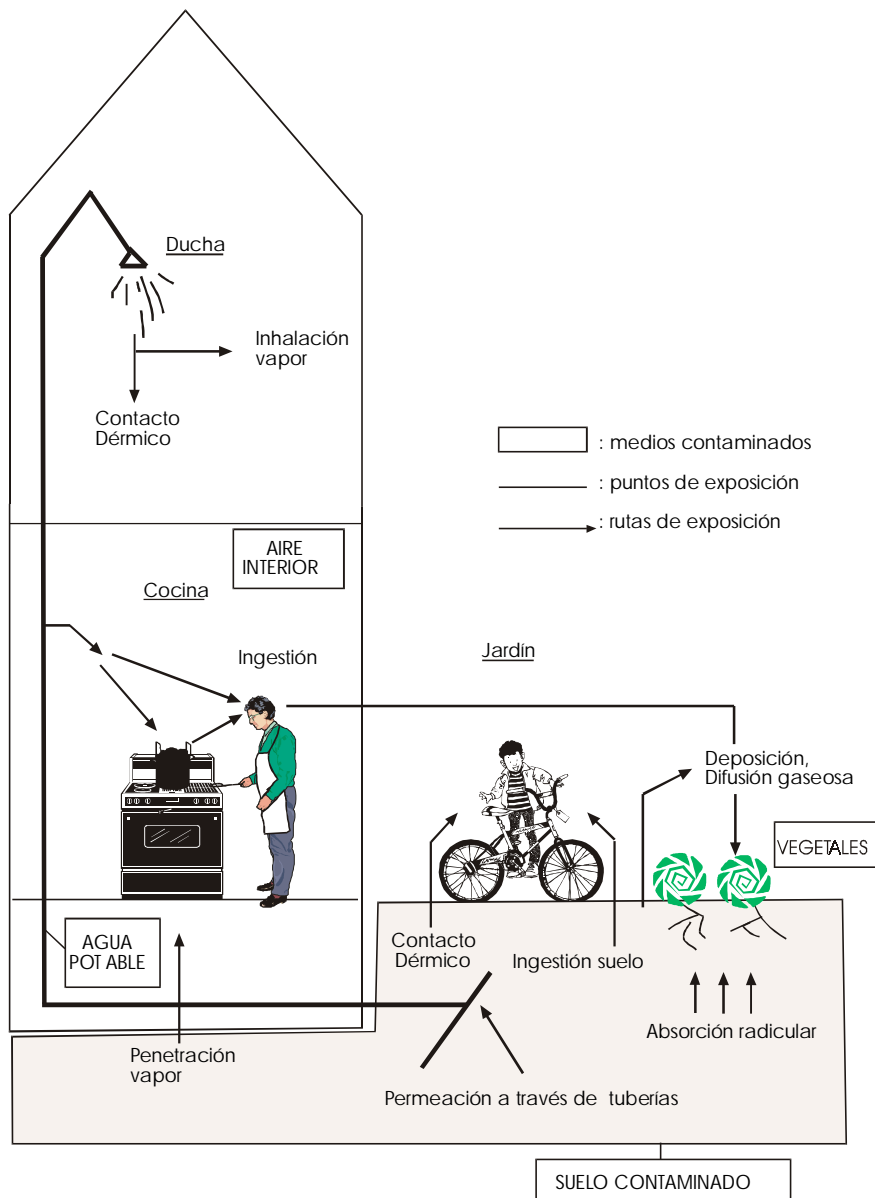


Figura 12: Ejemplos de escenarios de exposición

Identificación y análisis de las rutas de exposición. El objetivo final es la determinación de las rutas más significativas de exposición humana, a través de la identificación de las fuentes causantes de la contaminación, los potenciales procesos de liberación de la contaminación y medios afectados para situaciones pasadas, presentes y futuras.

Una vez que el contaminante es liberado al medio, este puede ser transportado (en solución o en suspensión en el agua, en suspensión en el aire, escorrentía, etc.) o bien ser transformado química y/o biológicamente o incluso acumularse en uno o más medios (Ver Figura 13). La **evaluación del transporte y destino de los contaminantes en los diversos medios** requiere hacer consideraciones sistemáticas acerca de la migración de los contaminantes desde el foco hasta los puntos de exposición a través de las diferentes vías. El potencial de migración puede definirse como el conjunto de procesos de transporte, almacenamiento, intercambio y transformación, que por causas físicas, químicas y/o biológicas afectan a los solutos tanto en la zona del suelo como en la zona de aguas subterráneas.

En general, la migración de un contaminante está determinada por su propia movilidad en condiciones ambientales y por las características del material en que se sitúa. Los procesos que condicionan la migración y, por tanto, la propagación de los contaminantes en el terreno, se pueden agrupar en:

- procesos de transporte de solutos que favorecen el desplazamiento de las sustancias desde la fuente hacia su entorno
- procesos de intercambio y/o transformación

En la migración de contaminantes en el subsuelo los elementos fundamentales a considerar son el agua como agente de transporte y los solutos, como agentes transportados. Para evaluar la migración de un contaminante dado en un medio conocido, hay que considerar de forma conjunta el flujo de agua (velocidad de flujo, cambios en el almacenamiento y recargas o descargas) y las concentraciones de contaminantes que informan sobre la calidad del agua. Ambas consideraciones se acometen habitualmente mediante el empleo de modelos de flujo y migración (transporte y reacción) respectivamente.

Actualmente se encuentran disponibles distintos programas informáticos que permiten resolver de forma sistemática las ecuaciones que rigen la migración de contaminantes en el terreno. No obstante, la simulación en la zona no saturada y en medios karstificados se encuentra menos desarrollada, orientándose la mayor parte de los programas elaborados a simular la migración de contaminantes en medios detríticos saturados. Además algunos modelos permiten analizar cuantitativamente el transporte de contaminantes en medios fisurados.

Para profundizar en estos aspectos, se recomienda la consulta de la *Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas*.

Evaluada los diversos procesos de transporte de los contaminantes en los distintos medios, es necesario identificar los puntos y las vías probables de exposición para cada uno de ellos (puede ocurrir que exista un punto de exposición pero no la vía, por ejemplo contaminación de las aguas no utilizadas para consumo). La migración de contaminación fuera del

emplazamiento obliga a la consideración e identificación de puntos de exposición, puntos en los que las poblaciones potencialmente expuestas entran en contacto con los medios contaminados, tanto en el emplazamiento como fuera de él, en este caso se consideran especialmente problemáticas las zonas ubicadas aguas debajo de la fuente o en la dirección de los vientos predominantes.

Toda la información recabada en las fases anteriores debe permitir seleccionar las rutas de exposición a evaluar en el análisis de riesgos, seleccionándose en principio todas las identificadas a menos que exista una justificación para su eliminación. Aquellas rutas para las que no se disponga de suficientes datos para efectuar un análisis de la exposición cuantitativo, la evaluación deberá ser cualitativa y el análisis de riesgo asociado a otra ruta.

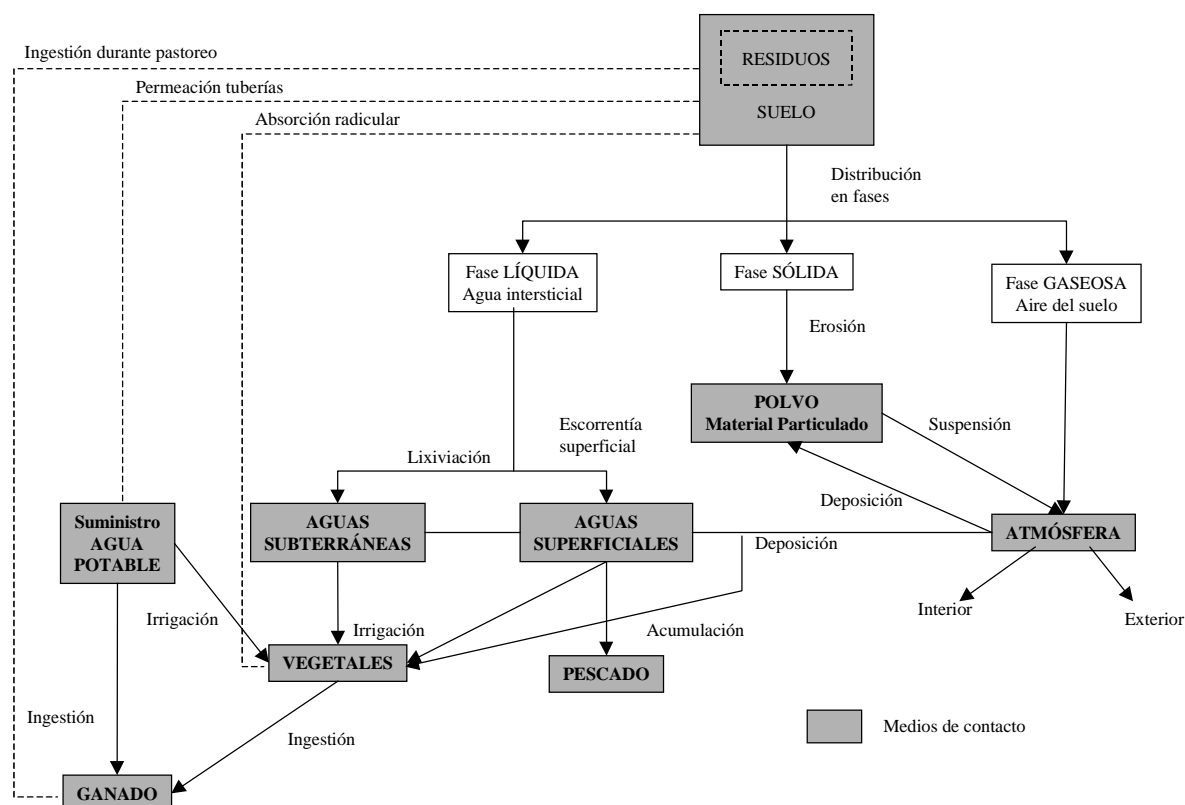


Figura 13: Medios potencialmente afectados por la contaminación del suelo

La estimación de la exposición para cada una de las rutas consiste en la cuantificación de la magnitud, frecuencia y duración de la exposición para las distintas poblaciones y rutas de exposición seleccionadas. Dicha cuantificación pasa por el cálculo de la ingesta específica para cada ruta (exposición normalizada para el tiempo y peso corporal, expresada en mg compuesto/Kg de peso corporal/día). La fórmula genérica para el cálculo de la ingesta correspondiente a una ruta dada es la siguiente:

$$IDE = C \times (TC \times FE \times DE/PC) \times (I/TM), \text{ donde:}$$

IDE es la ingesta, expresada como la cantidad del compuesto en la capa límite de intercambio (puerta de entrada al organismo) y, por tanto, disponible para la absorción.

C es la concentración de exposición para el medio de contacto considerado

TC es la tasa de contacto, que indica la cantidad de medio contaminado contactado por unidad de tiempo o suceso.

FE es la frecuencia de exposición.

DE es la duración de la exposición

PC es el peso corporal correspondiente al peso medio durante el período de exposición.

TM es el tiempo promedio de exposición.

La *Guía Metodológica para el Análisis de Riesgos para la Salud Humana y los Ecosistemas* ofrece los criterios a aplicar para la cuantificación de cada una de estas variables.

Las vías genéricas de exposición para cada una de las cuales hay que calcular la ingesta de cada contaminante implicado en la evaluación de riesgos son las siguientes:

Vías de exposición
- Ingestión de suelo
- Inhalación de polvo en el exterior/interior
- Contacto dérmico con el suelo (exterior) /polvo (interior)
- Inhalación de vapor en el exterior
- Inhalación de vapor en el interior
- Ingestión de alimentos contaminados
- Ingestión de agua contaminada como bebida
- Contacto dérmico con agua contaminada
- Inhalación de vapores que emanan del agua contaminada
- Ingestión de agua contaminada durante el baño recreativo
- Contacto dérmico con el agua contaminada durante el baño recreativo

La exposición máxima razonable o exposición combinada para cada escenario concreto se calcula como sumatorio de la exposición por las diferentes vías, presentándose una estimación de la contribución de las distintas vías a la exposición total en el emplazamiento. Esta información puede permitir el establecimiento de medidas dirigidas a la limitación de dicha exposición.

7.5.3.3 Análisis de riesgos

Esta etapa integra los resultados de las dos anteriores (análisis de la toxicidad y análisis de la exposición) con el fin de estimar objetivamente la probabilidad de que ocurran efectos adversos sobre los objetos protegidos en las condiciones particulares del emplazamiento. Es fundamental en este punto estimar el nivel de incertidumbre asociado a la cuantificación del riesgo, con el fin de valorar las conclusiones de la evaluación en su justa medida.

La evaluación integrada de los resultados de la caracterización de la contaminación (naturaleza y extensión) y los efectos de ésta sobre los objetos protegidos, es clave ya que en la misma se basarán las decisiones posteriores acerca de la necesidad de acometer actuaciones de saneamiento y la urgencia de las mismas.

La cuantificación del riesgo se efectúa para cada receptor objeto del análisis de acuerdo con las siguientes pautas:

- Para salud humana, se realiza por comparación de la dosis del contaminante que recibe el individuo (calculada a partir de la caracterización del escenario de exposición) con las referencias toxicológicas establecidas para esa sustancia y estrato de población.

- Para compuestos cancerígenos, el riesgo se estima como el incremento de la probabilidad de que un individuo por cada 10^5 individuos desarrolle un cáncer a lo largo de toda su vida por exposición a un agente cancerígeno.
- Para compuestos con efectos no cancerígenos, el riesgo se calcula por comparación de la dosis ingerida a lo largo de un tiempo de exposición global, con el 100% de la dosis de referencia toxicológica empleada.

Análisis del riesgo para salud humana		
Tipo compuesto	Criterio de evaluación	Cuantificación del riesgo
Compuesto cancerígeno	Incremento de la probabilidad de que un individuo por cada 10^5 individuos desarrolle un cáncer a lo largo de su vida	<ul style="list-style-type: none"> - Para un riesgo de concentración bajo la relación dosis-respuesta es lineal y el riesgo directamente proporcional a la ingesta - $R_i = IDE_i * F_p$ - $R_i =$ Riesgo - IDE=ingesta diaria estimada - F_p=factor de pendiente
Compuesto no cancerígeno	Comparación de la dosis ingerida a lo largo de un tiempo de exposición global con el 100% de la referencia toxicológica empleada	<ul style="list-style-type: none"> - Para dosis inferiores a la de referencia no se espera efectos para la salud - $R_i = IDE / R_{tox}$ - $R_i =$ Riesgo - IDE=Ingesta diaria estimada - R_{Tox}=Referencia toxicológica (para el contaminante y ruta de exposición considerada)

F_p : factor de pendiente (para el contaminante y ruta de exposición considerados)

R_{Tox} : referencia toxicológica (para el contaminante y ruta de exposición considerados)

- Para ecosistemas, se aborda en primer lugar una estimación del riesgo (cuyo enfoque varía en función de los objetivos de la evaluación, así como de los datos disponibles), seguida de una descripción del riesgo. La siguiente tabla resume los diferentes métodos empleados para la estimación del riesgo para ecosistemas.

Métodos para estimación del riesgo para ecosistemas		
Método de estimación	Campo de aplicación	Cuantificación del riesgo
Comparación de las concentraciones de exposición con dosis referidas a efectos aislados para especies concretas	Poblaciones o componentes específicos del ecosistema	Se obtiene un valor fijo que refleja la máxima probabilidad de que dicho componente sufra efectos adversos por exposición a ese estresor Se trata de una estimación puntual del riesgo
Comparación de la distribución de efectos /distribución de exposiciones	Poblaciones o componentes específicos del sistema	Se obtiene una estimación probabilística del riesgo, que se cuantifica como el grado de solapamiento entre las funciones de distribución de efectos y exposición.
Empleo de un modelo de extrapolación de efectos	Poblaciones completas de un sistema	Se obtiene un porcentaje de especies afectadas por la presencia de un determinado nivel de contaminante o estresor, y por tanto de riesgo para el funcionamiento del ecosistema

La descripción del riesgo resume los riesgos ecológicos estimados y aporta una interpretación del significado ecológico de los mismos, que tiene por objeto la valoración de estos riesgos en el contexto ecológico en base al tipo y magnitud de los efectos previstos.

7.5.4 Evaluación de los factores de incertidumbre

El objetivo último del análisis de riesgos es generar y suministrar la información necesaria para la calificación de un suelo en relación a un uso o usos específicos y la determinación de la necesidad de adoptar las medidas oportunas para la minimización de los riesgos hasta límites aceptables.

Las implicaciones de una evaluación errónea, tanto por exceso (obligando a medidas de recuperación excesivamente costosas) como por defecto (aceptación de unas condiciones que suponen un riesgo para los objetos protegidos), obligan a la elaboración de una estrategia de análisis para cada emplazamiento que permita una correcta caracterización de los distintos elementos y variables implicadas en la relación causa-efecto y una aplicación rigurosa del proceso de análisis de riesgos. Los elementos claves de dicha estrategia son:

El enfoque seguido para la cuantificación del riesgo no se ajusta en la mayoría de los casos a una aproximación probabilística sino que es de tipo condicional, con una cantidad apreciable de asunciones tanto en la estimación de la toxicidad como de la exposición que en conjunto pueden conducir a una sobreestimación de los riesgos. Por ello es imprescindible especificar claramente las asunciones e incertidumbres inherentes al análisis de riesgos de un emplazamiento para valorar los riesgos estimados desde una perspectiva adecuada. La evaluación de la incertidumbre puede ser igualmente muy útil en la identificación de áreas en las cuales un esfuerzo adicional moderado en la recogida de datos pudiera mejorar significativamente las bases para la selección de una alternativa de saneamiento. El punto clave no es la cuantificación sino la identificación de las variables y asunciones que contribuyen mayoritariamente a esta incertidumbre, todo ello con el objetivo de ayudar a la toma de decisiones.

El proceso de análisis de riesgos lleva asociado dos diferentes fuentes de incertidumbre:

- Una incertidumbre en los efectos de los contaminantes sobre los objetos a proteger. Esta es una incertidumbre debida a la ausencia de conocimientos científicos y técnicos suficientes que se refleja en la fase de análisis de la toxicidad o peligrosidad.
- Incertidumbres en la caracterización de la contaminación en el emplazamiento y análisis de la exposición. Las fuentes de incertidumbre en relación a estas variables locales se relacionan con:
 - a. definición del marco físico, y en concreto de los actuales y futuros usos del suelo e identificación de las posibles rutas de exposición;
 - b. la aplicabilidad de los medios y la validez de los parámetros usados en el cálculo de la exposición y/o dispersión;
 - c. la determinación de valores locales como representativos de las condiciones del emplazamiento a partir de los resultados analíticos.

Cuando se realice un análisis de riesgos, será por lo tanto imprescindible evaluar la incertidumbre indicando:

- los aspectos del análisis que contribuyen en mayor grado a la incertidumbre;
- la influencia de las incertidumbres en la toma de decisiones.

Los resultados del estudio de estos dos aspectos determinarán la necesidad de adquirir mayor información previamente a la evaluación definitiva de los riesgos.

7.5.5 Interpretación de los resultados de la evaluación de riesgos

Los resultados de la evaluación de riesgos no deben tomarse como absolutos, sino que su función es la de resaltar las potenciales fuentes del riesgo en un emplazamiento de forma que pueda diseñarse un plan de recuperación efectivo de acuerdo a las prioridades.

Es responsabilidad del grupo de evaluación de riesgos elaborar unas conclusiones acerca de la magnitud y naturaleza de los riesgos en el emplazamiento y de las incertidumbres asociadas, que permita una toma de decisiones sobre la gestión del riesgo. La discusión debe proporcionar los medios para situar los valores numéricos obtenidos referentes al riesgo en el contexto de lo que se conoce sobre el emplazamiento objeto de estudio, y permitir la toma de decisiones sobre la necesidad de saneamiento y la elección de la alternativa más adecuada. La discusión debe incluir como mínimo:

- garantía de que los contaminantes claves del emplazamiento han sido identificados y discusión de las concentraciones de los mismos con respecto a los valores de calidad establecidos;
- características del objeto en riesgo (población, recurso natural, etc.) y principales factores implicados en el riesgo en dicho emplazamiento;
- principales fuentes de incertidumbre de la evaluación realizada.

Finalmente se incluirán las principales conclusiones, que resumirán los resultados más significativos de la evaluación, enfocados en función de los objetivos definidos en relación al riesgo en el emplazamiento estudiado.

Este documento será la base para la toma de decisiones, por lo que la claridad y concisión en la comunicación de los resultados es una característica obligatoria para el mismo.

7.6 INFORME DE LA INVESTIGACIÓN DETALLADA

El informe de la Investigación Detallada debe contener, al menos, la siguiente información:

- a. Descripción de los objetivos de la Investigación Detallada.
- b. Resumen y evaluación de los resultados de la Investigación Exploratoria y explicación de la utilización que se va a hacer de estos datos;
- c. Descripción de la estrategia de investigación diseñada y ejecutada para caracterizar el emplazamiento en relación a la naturaleza, concentración y extensión de la contaminación. Cuando la estrategia de muestreo o análisis químico difiera de lo recomendado en las correspondientes guías metodológicas, se explicarán las razones que justifiquen la desviación.
- d. Modelo conceptual utilizado para el diseño de la estrategia de muestreo y análisis en medios diferentes al suelo (agua superficial, agua subterránea, vegetales, etc.)
- e. Descripción detallada del funcionamiento hidrogeológico en el emplazamiento.

- f. Resultados de la investigación incluyendo:
 - mapa del emplazamiento a escala adecuada (mínimo 1:2000) en el que se representen claramente los puntos de muestreo;
 - resultados de las observaciones sensoriales;
 - descripción del perfil del suelo en cada uno de los sondeos;
 - descripción de la morfología del suelo;
 - identificación de las muestras en relación a la posición exacta y profundidad de los puntos de muestreo;
 - listado de las muestras analizadas incluyendo las determinaciones llevadas a cabo en cada una de ellas;
 - resultados de los análisis físicos y químicos realizados;
 - lista de los valores de calidad del suelo y otros medios utilizados para la interpretación de los resultados;
 - representación cartográfica de la extensión de la contaminación (líneas de isoconcentración).
- g. Interpretación de los resultados, que debe incluir:
 - interpretación de los resultados relativos al suelo por comparación con los estándares de calidad existente (valores indicativos de evaluación y otros);
 - interpretación de los resultados relativos a otros medios analizados por comparación con los estándares de calidad existentes (estándares de calidad de aguas subterráneas y superficiales, regulaciones alimentarias, etc.);
 - interpretación de los resultados de las investigaciones geológicas e hidrogeológicas realizadas;
 - evaluación de la dispersión potencial de la contaminación
- h. Evaluación de riesgos e interpretación de sus resultados
- i. Conclusiones y recomendaciones.
- j. Resumen del estudio.

8. ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DE RUINAS INDUSTRIALES

Por diversas razones existen en la Comunidad Autónoma del País Vasco numerosos emplazamientos que se ha dado en llamar ruinas industriales, entendiendo por tales los terrenos, construidos o no, que, habiendo participado de una actividad industrial, han sido degradados de tal manera que no es posible darle un nuevo uso sin un profundo trabajo de recuperación previo.

La metodología general de investigación de las ruinas industriales no difiere esencialmente de la de cualquier otro tipo de emplazamiento, aunque algunas características específicas de las mismas introducen ciertas particularidades de cara a su investigación (ver Figura 14). Así, la presencia de edificios con elementos potencialmente contaminados o en mal estado de conservación y los materiales abandonados que habitualmente se encuentran en estos emplazamientos debe ser considerada e incorporada a la metodología, en especial durante la inspección del emplazamiento (Investigación Exploratoria) y el diseño de la toma de muestras y análisis, tanto en la Investigación Exploratoria como en la Detallada.

Por tanto, el programa de investigación de cualquier ruina industrial debe contemplar el diseño y ejecución de programas específicos para los siguientes elementos:

- contaminación del suelo
- contaminación de los edificios
- materiales abandonados (materias primas, residuos, etc.)

En general, la investigación de la contaminación del suelo en las ruinas industriales se rige por las pautas descritas en los capítulos precedentes de este Manual Práctico y en las Guías Metodológicas y Técnicas en que se apoya. En cambio, para los dos últimos elementos citados se han definido procedimientos específicos, que pueden consultarse en la *Guía Técnica de Criterios Ambientales para la recuperación de ruinas industriales*. Los siguientes epígrafes sintetizan las particularidades de los mismos.

En todo caso, dadas las especiales características de este tipo de emplazamientos, se recomienda extremar las medidas de seguridad establecidas en los Planes elaborados al efecto, tanto durante las labores de investigación como en las de recuperación.

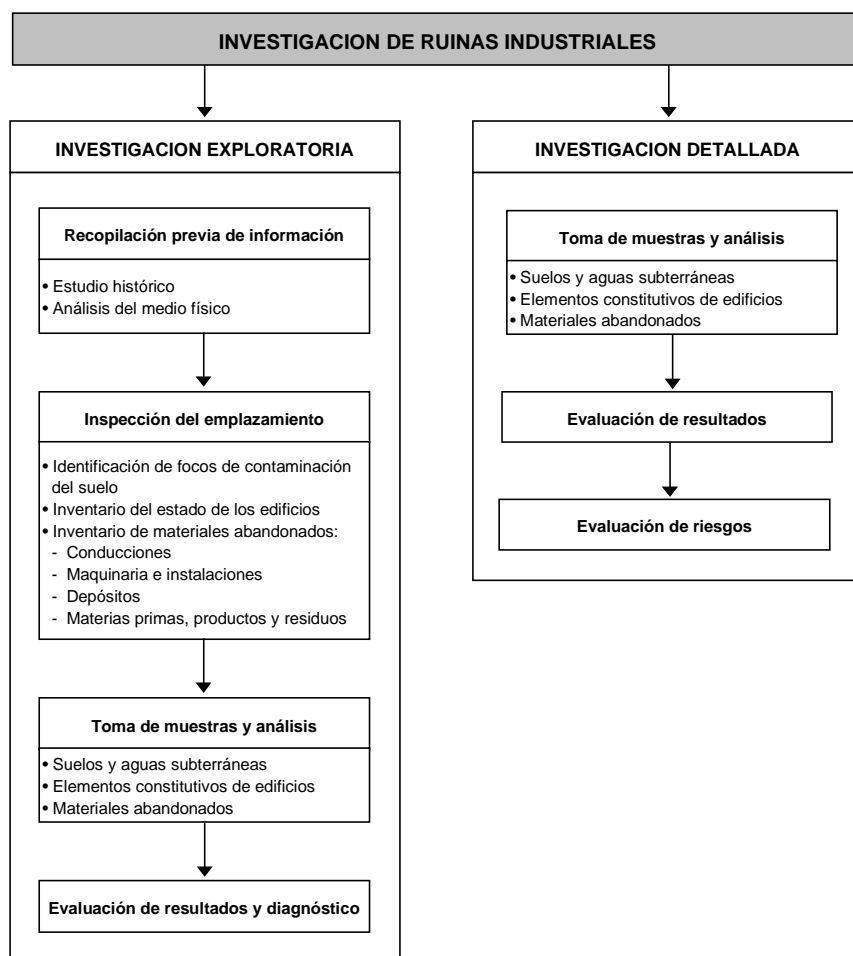


Figura 14: Particularidades de la investigación de ruinas industriales

8.1 INVESTIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE EDIFICIOS

Las actividades desarrolladas y las sustancias manipuladas en las instalaciones industriales pueden haber originado contaminación de elementos constitutivos de los edificios. La investigación de la contaminación de edificios deberá proporcionar información suficiente para planificar las actuaciones específicas sobre estos elementos durante la recuperación, que dependerán en buena medida del uso final al que se destine cada edificio.

Esta investigación se desarrolla en etapas sucesivas, enmarcadas en el programa general elaborado para el emplazamiento y comprende esencialmente las siguientes tareas:

- análisis preliminar mediante estudio histórico
- inspección exhaustiva de los edificios, incluyendo un inventario sistemático de su estado
- definición del programa de caracterización de la contaminación, toma de muestras y análisis
- evaluación y diagnóstico de la contaminación

Las técnicas de muestreo a emplear en la caracterización dependen básicamente de las características físicas y estado del material a muestrear, así como del poder de penetración

de los contaminantes. Entre las técnicas específicas más frecuentemente utilizadas cabe señalar las de barrido/cinta de gel, rascado, secado o perforación.

8.2 INVENTARIO, CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MATERIALES ABANDONADOS

La investigación integrada de una ruina industrial debe prestar atención a los materiales abandonados, que pueden representar riesgos para la salud humana y el medio ambiente si no se caracterizan y gestionan correctamente en el marco de la recuperación del emplazamiento previa a su reutilización.

En términos genéricos, cabe diferenciar entre los materiales abandonados los siguientes:

- Materias primas, productos y residuos de antiguos procesos de fabricación
- Maquinaria
- Instalaciones de almacenamiento y conducciones

Puesto que el objetivo último es dar a los materiales abandonados una gestión adecuada, es necesario efectuar durante la Investigación Exploratoria un inventario exhaustivo de los mismos, para lo cual se recomienda cumplimentar unas fichas tipo. En la medida que se considere preciso, dicho inventario se complementará con una caracterización de los materiales (mediante su muestreo y análisis) que permita clasificarlos de cara a su posterior gestión.

9. INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS

9.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha descrito en el capítulo 4, la investigación de la calidad del suelo de un determinado emplazamiento puede dar lugar a la adopción de diversas medidas en el mismo, entre las que cabe distinguir las medidas de defensa, las de recuperación y las de control y seguimiento.

La adecuada definición y puesta en práctica de dichas medidas requiere, en general, conocer un conjunto de características del medio en el que se ubica el emplazamiento con el fin de garantizar la efectividad de aquéllas. En algunos casos, muchas de estas características habrán sido determinadas en el marco de las fases de investigación exploratoria y detallada del emplazamiento. No obstante, en otros casos puede ocurrir que sea preciso acometer investigaciones complementarias enfocadas específicamente a obtener los valores de ciertos parámetros (hidrodinámicos, geotécnicos, biológicos, etc.) que condicionan el diseño de las medidas a implantar.

En lo relativo a las medidas de recuperación, es práctica habitual realizar un análisis comparado de las alternativas técnica y económicamente viables como paso previo a la selección de la solución más adecuada y su concreción en un proyecto de recuperación. Puede ser en este momento cuando, en caso necesario, se deban acometer las investigaciones complementarias que aporten suficiente información como para efectuar el análisis comparativo antes citado desde bases fiables. También puede ocurrir que, una vez seleccionada la alternativa de recuperación a poner en práctica, sea preciso recabar algún dato adicional para la redacción del proyecto del que no se dispusiera a priori.

Así pues, la necesidad de acometer investigaciones complementarias una vez finalizado el diagnóstico del emplazamiento deberá evaluarse caso por caso, en función de la información requerida para garantizar la selección de las medidas más adecuadas al mismo y optimizar su efectividad.

9.2 INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS MÁS HABITUALES

En este epígrafe se exponen, con carácter indicativo y no exhaustivo, las investigaciones complementarias que con mayor frecuencia puede ser necesario acometer antes de redactar el proyecto de recuperación de un emplazamiento contaminado. Entre ellas cabe distinguir dos tipos:

- Investigaciones tendentes a determinar parámetros característicos del medio
- Ensayos a escala de laboratorio o piloto

9.2.1 Investigaciones tendentes a determinar parámetros característicos del medio

En función del tipo de solución que se esté considerando, puede ser preciso realizar investigaciones tendentes a determinar datos específicos del medio, entre los cuales los más frecuentes son los siguientes:

- *Parámetros hidrodinámicos* (permeabilidad, transmisividad, gradientes hidráulicos, dirección y velocidad de flujo, etc.): este tipo de parámetros son fundamentales para dimensionar soluciones en las que se va a actuar sobre las aguas subterráneas, como, por ejemplo, redes de pozos de bombeo para tratamiento on site del agua, pantallas hidráulicas para limitar la migración de la contaminación, biorremediación in situ, etc. Las técnicas de investigación comúnmente aplicadas para la determinación de este tipo de parámetros incluyen ensayos de permeabilidad, ensayos de bombeo con elaboración de curvas caudales-niveles, etc.
- *Parámetros geotécnicos* (granulometría, características resistentes del subsuelo, coeficientes y ángulos de rozamiento, etc.): este tipo de parámetros son fundamentales para dimensionar ciertas soluciones tanto de eliminación mediante excavación como de contención de focos contaminantes (pantallas). Las técnicas de investigación comúnmente aplicadas para la determinación de este tipo de parámetros incluyen la realización de sondeos con toma de muestras inalteradas de suelo para su análisis geotécnico en laboratorio.
- *Parámetros biológicos* (poblaciones bacterianas, materia orgánica disponible, contenido en oxígeno disuelto del agua subterránea, etc.): este tipo de parámetros son determinantes para diseñar soluciones basadas en la optimización de la acción microbiana sobre los contaminantes, en especial cuando se trata de soluciones aplicadas in situ. Las técnicas de investigación comúnmente aplicadas para la determinación de este tipo de parámetros varían en función del parámetro en cuestión, si bien suelen incluir la medición in situ o la toma de muestras para análisis en laboratorio.
- *Otros parámetros*: en los casos en que se pretende aplicar técnicas de descontaminación mediante aireación del suelo (tanto por aspiración como por inyección de aire) es habitual realizar ensayos de ventilación in situ que permiten determinar los parámetros básicos para el diseño de las instalaciones de inyección-venteo.

9.2.2 Ensayos a escala de laboratorio o piloto

La aplicación efectiva de numerosas técnicas de descontaminación de suelos y aguas subterráneas aconseja la realización previa a escala de laboratorio y/o a escala piloto de ensayos que, tratando de reproducir las condiciones del emplazamiento, permitan ajustar los parámetros clave de operación a escala real de dichas técnicas.

Los casos más típicos en que resulta imprescindible acometer ensayos a escala de laboratorio o piloto antes de acometer la actuación a escala real son los de las técnicas de descontaminación mediante la optimización de la acción microbiana (biorremediación), especialmente si se van a aplicar *in situ*. No obstante, otras técnicas como, por ejemplo, el lavado de suelos, la extracción con agentes químicos o soluciones de inmovilización-inertización de los contaminantes del suelo, también suelen requerir la realización de ensayos previos que permitan optimizar su dimensionamiento.

Investigaciones complementarias

- Determinación de parámetros característicos para el diseño de la medida de recuperación preseleccionada
 - Parámetros hidrodinámicos (permeabilidad, transmisividad, gradientes hidráulicos, etc.) mediante ensayos in-situ.
 - Parámetros geotécnicos (granulometría, coeficientes y ángulos de rozamiento) mediante análisis de laboratorio
 - Parámetros biológicos (poblaciones bacterianas, oxígeno disuelto en agua, etc.) mediante análisis in-situ y/o en laboratorio según las necesidades
- Ensayos escala de laboratorio o piloto de la técnica de recuperación preseleccionada para ajuste de parámetros clave de operación a escala real de la técnica seleccionada)

10. BIBLIOGRAFÍA

- IHOBE, 1994, Manual Práctico para la investigación de la contaminación del suelo
- IHOBE, 1998, Calidad del suelo: Valores Indicativos de evaluación (VIE-A, VIE-B, VIE-C).
- IHOBE, 1998, Guía Metodológica de Estudio Histórico y Diseño de Muestreo
- IHOBE, 1998, Guía Metodológica de Toma de Muestras.
- IHOBE, 1998, Guía Metodológica de Análisis Químico.
- IHOBE, 1998, Guía Metodológica de Análisis de Riesgos para la salud humana y ecosistemas.
- IHOBE, 1998, Guía Metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas.
- IHOBE, 1998, Guía Técnica Seguridad para la investigación y recuperación de suelos contaminados.
- IHOBE, 1998, Guía Técnica Criterios ambientales para la recuperación de ruinas industriales
- IHOBE, 1999, Guía Técnica de diseño de planes de actuación en vertederos de residuos industriales.
- DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999. Guidelines on remediation of contaminated sites.

ANEXO I: VALORES INDICATIVOS DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO

Contaminantes	VIE-A	Protección de la salud VIE-B					Protección de los ecosistemas	
		Area de juego infantil	Residencial con huerta	Residencial	Parque	Industrial / Comercial	VIE-B	VIE-C
Metales								
Arsénico	23	30	30	30	30	200	23	35
Bario	80+2,5L							
Cadmio	0,8	5	5	8	25	50	0,8	18
Cobalto	6+0,5L						20	30
Cobre	10+0,5L	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	24	250
Cromo (total)	25+L	90	200	200	400	550		
Cromo (VI) ²		8	8	8	10	15		
Cromo III							53	75
Mercurio	0,3	4	4	4	15	40	0,3	3
Molibdeno	0,6+0,018L	75	75	75	250	750	1	620
Níquel	12+L	110	110	150	500	800	40	280
Plomo	16+0,7L+2,1H	120	120	150	450	1000	44	330
Zinc	50+2L	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	106	840
Otros compuestos inorgánicos								
Cianuros (total)	0,1	5	5	5	5	25		
Compuestos aromáticos								
Benceno	0,01	0,2	0,2	2	5	10		2
Etilbenceno	0,05	2	2	4	20	100		
Tolueno	0,05	4	4	8	40	200		65
Xileno	0,05	4	4	8	40	200		
Fenoles (total)	0,05	2,5	2,5	25	25	25		30
Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs)								
Antraceno	0,1	70	70	350	500	700		
Benzo(a)antraceno	0,1							90
Benzo(a)pireno	0,05	2	2	4	10	20		70
Benzo(ghi)perileno	0,1							
Benzo(k)fluoranteno	0,1							
Criseno	0,1							
Fenantreno	0,1						55	175
Fluoranteno	0,1	8	8	50	60	80		440
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0,1							
Naftaleno	0,1	3	3	20	50	150		35
Hidrocarburos clorados								
Tetracloroetileno	0,1			4 a) b)				30
Clorobencenos				30 a) b)				85
Monoclorofenoles								15
Diclorofenoles								25
Triclorofenoles								10
Tetraclorofenoles								25
Pentaclorofenoles								10
Dicloroetanos								30
Pesticidas								
α-HCH	0,05	0,4	0,4	1	4	8		0,1
β-HCH	0,05	0,1	0,1	0,3	1	2		0,04
γ-HCH	0,05	1	1	3	10	20	0,08	10
Carbofurano	0,00002 a)			2 a) b)				0,01
Compuestos clorados								
PCBs		5	5	40	40	50		0,03
Dioxinas				0,001 a) b)				0,046
Otros compuestos orgánicos								
Aceite mineral	100			5000 a) b)				

(1) El valor límite derivado es del orden de decenas de g/kg

a) Valores obtenidos de la lista holandesa "Nederlandse Staatscourant" (24 de febrero de 2000, n° 39) "Target value" equiparable a VIE-A e "Intervention value" a VIE-B.

b) No se realiza distinción entre los distintos usos
No ha sido posible

H Contenido en materia orgánica

L Contenido en arcilla

Nota: Los valores de concentración de los contaminantes incluidos en esta tabla están expresados en mg/kg.