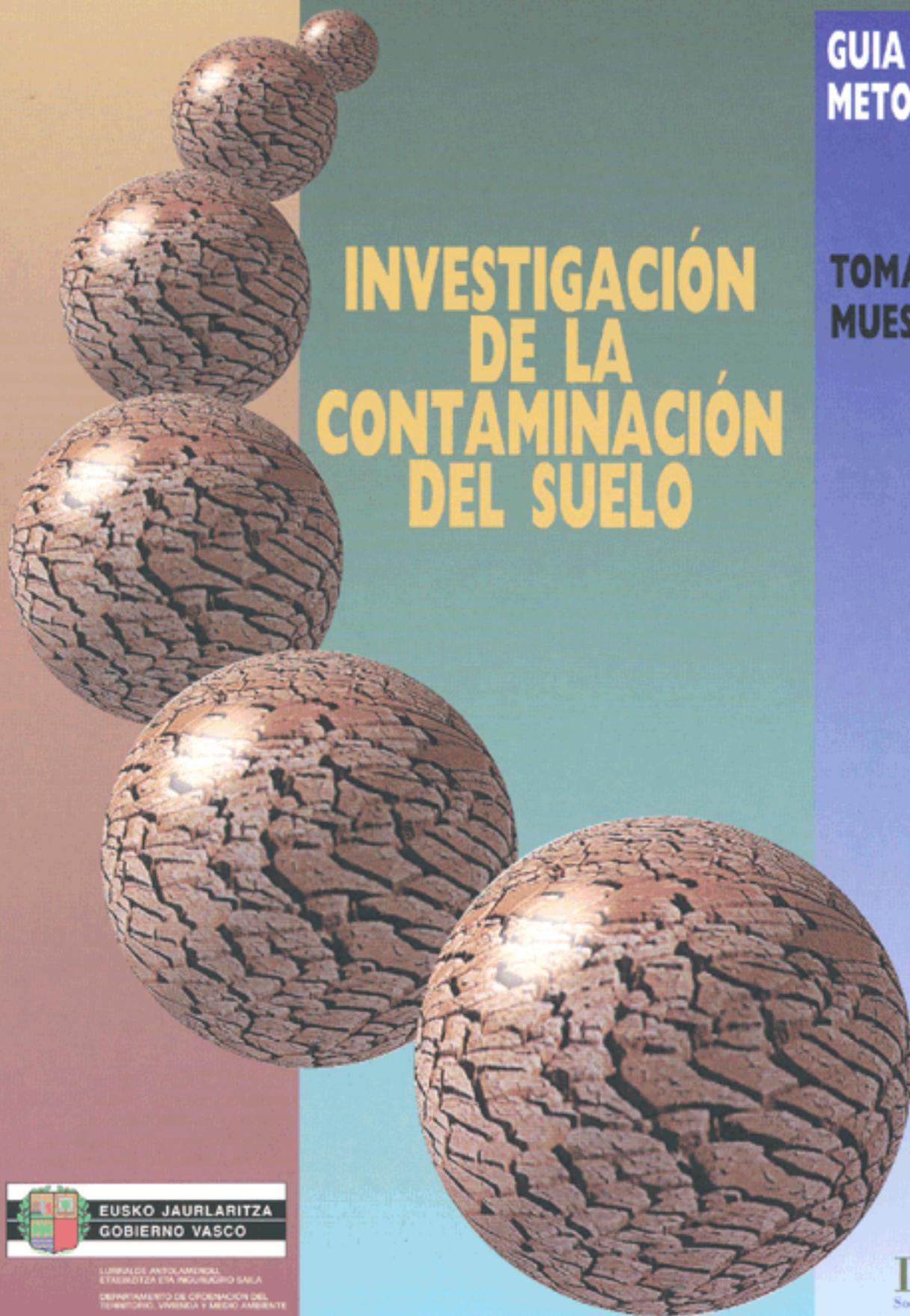


GUIA METODOLÓGICA

TOMA DE MUESTRAS

INVESTIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO



Eusko Jauriaritzak lurzoru poluituen alorrean hamar-kada honen hasieran abiarazi duen politika lehentasuneko da gaur egun, hiri-berreskurapenerako prozesu geldiezinean ari garen herri honetan. Zeren prozesu horrek segurtasun-bermeak eskatzen ditu, bai pertsonen osasunerako bai ingurugirorako, poluitzaile izan zitezkeen ihardueretarako erabiltzen ziren lurak laster batean erabilera sentikorretarako berreskuratzerakoan.

Politika honen diseinu eta garapenaren hasiera beretik argi izan genuen gidabide metodologikoak eta prozedurak prestatu behar zirela berez nahiko gai korapilotsua den lurzoruaren kalitatea aztertzeke eta ebaluatzeke. Kezka horri erantzun nahian, gidaliburu metodologiko zenbait argitaratu dira eta azken urteotan frogaturik gelditu da aipatu eginkizunerako irizpide teknikoak bateratzeko ezin ukatzeko balioa izan dutela.

Horrezkerotik kokagune poluituen azterketa eta kudeaketan hartutako esperientziaz baliatu gara idatzi tekniko horiek aberasteko eta Euskal Autonomi Erkidegoaren beharretara eta lurozuaren poluzioaren ondoriozko arazoei modu eraginkorrean heltzeko diseinatu den estrategia globalera egokitzeke.

Bakoitzari jarritako helburuak betetzeke lanketa-maila nahikoa dutela uste izan den lehenagoko gidaliburuez gain, oraingoan idatzi berriak argitaratu ditugu, batzuk aurrekoen garapenaren emaitza direnak eta beste batzuk orduan antz eman ez zitzairen premia zenbaiti erantzuteko sortuak. Eusko Jauriaritzako Lurralde Antolamendu, Etxebizitza eta Ingurugiro Saila lurzoru poluituen politikaren alde apustu egiten jarraitzeko prest dago eta espero dugu argitalpen honek gaiaren alderdi teknikoak finkatzen laguntzea.

La política de suelos contaminados iniciada por el Gobierno Vasco a principios de esta década, 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 otro 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 que han demostrado en los últimos años 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 ya publicadas cuyo grado de elaboración se ha considerado suficiente para alcanzar los objetivos que cada una de ellas tenía marcados, se presentan en esta serie nuevos documentos surgidos bien de la evolución de las ya existentes, bien de exigencias no identificadas en aquel momento, que espero contribuyan a reforzar los aspectos técnicos de esta política de suelos contaminados por la que el Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco está dispuesto a seguir haciendo una apuesta firme.



F. J. Ormazabal

Lurralde Antolamendu,
Etxebizitza eta Ingurugiro Sailburua.
Consejero del Departamento de Ordenación del Territorio,
Vivienda y Medio Ambiente

Lurzoruaren kalitateari buruzko ikerketei hasiera eman zitzaenez gero, lurzoria babesteko ezartzen ari zen politikari prozedura metodologiko batzuk hornitzeko premia nabaritu zen. Prozedura horien bitartez, aipatutako ikerketek barne hartzen dituzten alderdiak bateratu egin nahi ziren.

Protokoloetako bat hemen sakon berrikusita aurkezten den gidaliburua da; *Laginketarako Gidaliburu Metodologikoa* izenekoak, hain zuzen.

Azkeneko ia lau urteotan aztertutako hainbat kasutan ikusi zen gidaliburuaren lehen argitalpena eguneratu beharra zegoela. Izan ere, zehatz-mehatz finkatu dira landa-lanetan normalean erabiltzen diren ekipamendu eta teknikak; baita gaur egun indarrean dauden beste elementu eta teknikak ere.

Horren bidez lortu nahi diren helburuak honakoak dira:

lurzoruaren dauden ingurune desberdinetako laginketarako erabiltzen diren prozedurak bateratzea, gaur egun eskueran dauden ekipamendu eta teknikei buruz oinarritzko orientabideak ematea eta kasu jakin baterako hautatu behar direnean irizpide nagusiak eskaintzea. Gidaliburua errazago erabiltzearen, lurzorian dauden fase edo inguruneen arabera garatzea erabaki da. Fase horietan laginketa egiteko eta lan osagarriak egiteko gomendio egokiak eskaintzen dira. Aipatu lan osagarriak ere garrantzitsuak dira: kontrol-putzuak ezartzea edo landan laginak prestatzea eta mantentzea, gero analisi-laborategira eramane daitezten.

Desde que se iniciaron las investigaciones de la calidad del suelo se puso de manifiesto la necesidad de dotar a la política para la protección del suelo, que se estaba implantando, de una serie de procedimientos metodológicos que contribuyeran a homogeneizar los diferentes aspectos que comprenden las susodichas investigaciones.

Entre esos protocolos se encuentra la guía que aquí se presenta, ampliamente revisada, bajo el título de *Guía Metodológica para la Toma de Muestras*.

Han sido, precisamente, los numerosos casos estudiados, a lo largo de los últimos casi cuatro años, los que han aconsejado que la primera edición de la guía se actualizase. Ya que han determinado con precisión los equipos y las técnicas que se utilizan habitualmente en los trabajos de campo, así como aquellos otros equipos o técnicas que están en vigor actualmente.

Con ello se pretende contribuir a la uniformidad de los procedimientos utilizados para la toma de muestras de los diferentes medios existentes en los suelos, proporcionar unas orientaciones básicas en relación a los equipos y técnicas, actualmente disponibles y suministrar los criterios más importantes a la hora de seleccionarlos para un caso concreto. Para hacer más sencillo el uso de la guía se ha optado por desarrollarla de acuerdo con las diferentes fases o medios presentes en el suelo, facilitando las recomendaciones oportunas para la toma de muestras de los mismos y para la ejecución de otros trabajos complementarios igualmente importantes como son: la instalación de los pozos de control o la preparación y conservación de las muestras en el campo previas a su traslado al laboratorio de análisis.



Esther Larrañaga
Ingurugintza Sailburuordea
Viceconsejera de Medio Ambiente

Eusko Jaurlaritzako Lurralde Antolamendu, Etxebizitza eta Ingurugiro Saileko Ingurugiro Kudeaketarako Sozietate Publikoa, IHOBE, S.A.k Laginketarako Gidaliburu Metodologikoa berriz aztertu du, arlo hoentan dauden premiei erantzun nahian.

IHOBE, S.A.ko Zuzendari Orokor den Jose Luis Aurrekoetxea jaunak espreski eman nahi dizkie eskerrak gidaliburu honen lehen argitalpenean parte hartutako guztiei eta berau berriz aztertzen lagundutako ondokoei:

- COVITECMA, S.A.ko Alfonso Aguilar, Ignacio Barco, Jose Luis Barroso eta Ana Santa Marta-ri.

Gidaliburuko zuzendaritza eta koordinazioa Jose Javier Castillo-k egin du, IHOBEko Ana Isabel Alzola koordinatzaile orokor eta Ignacio Quintana zuzendari tekniko izan direlarik.



IHOBE, S.A., Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco ha revisado la Guía Metodológica para la Toma de Muestras, con el fin de dar respuesta a las necesidades existentes en la materia.

El Director General de IHOBE, S.A. José Luis Aurrecoechea, agradece expresamente a todos aquellos participantes en la elaboración de la primera edición de esta guía su colaboración y la participación en la revisión de la misma a:

- Alfonso Aguilar, Ignacio Barco, José Luis Barroso y Ana Santa Marta de COVITECMA, S.A.

La dirección y coordinación de la guía ha sido llevada a cabo por José Javier Castillo bajo la coordinación general de Ana I. Alzola y la dirección técnica de Ignacio Quintana de IHOBE, S.A.



INDICE

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. OBJETIVOS	11
1.2. AMBITO DE APLICACIÓN Y ALCANCE	12
1.3. CONTENIDO	13
2. FACTORES A TENER EN CUENTA ANTES DEL MUESTREO	15
2.1. INTRODUCCIÓN	15
2.2. FACTORES ASOCIADOS A LOS OBJETIVOS DE LA CAMPAÑA Y LOS CONTAMINANTES PRESENTES	16
2.3. FACTORES ASOCIADOS A LAS CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO A INVESTIGAR	16
2.4. FACTORES OPERATIVOS	17
2.5. PLANIFICACIÓN DE LOS TRABAJOS	19
3. MÉTODOS DE PERFORACIÓN Y MUESTREO DE LA FASE SÓLIDA	21
3.1. RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL MUESTREO DE LA FASE SÓLIDA	22
3.2. CALICATAS	23
3.3. SONDEOS MANUALES	24
3.3.1. EQUIPOS DE PERFORACIÓN Y MUESTREO	25
3.3.1.1. Sonda de Embudo	25
3.3.1.2. Sonda «Edelman»	26
3.3.1.3. Sonda manual de media caña	26
3.3.1.4. Sonda manual "Riverside"	27
3.3.1.5. Sonda para gravas	28
3.3.1.6. Sonda para suelos arenosos	29
3.3.1.7. Sonda de pistón	29
3.3.1.8. Sonda manual helicoidal	30

3.3.2. SISTEMAS DE MUESTREO PARA SONDEOS MANUALES	30
3.4. SONDEOS LIGEROS	32
3.4.1. EQUIPOS DE PERFORACIÓN Y MUESTREO	33
3.4.1.1. Sonda helicoidal	33
3.4.1.2. Sonda acanalada	34
3.4.1.3. Sonda acanalada reforzada	35
3.4.2. SISTEMAS DE MUESTREO PARA SONDEOS LIGEROS	36
3.5. SONDEOS MECÁNICOS	40
3.5.1. CONSIDERACIONES GENERALES	40
3.5.2. EQUIPOS DE PERFORACIÓN	41
3.5.2.1. Percusión	41
3.5.2.2. Rotación	42
3.5.2.2.1. Rotación con coronas de perforación	42
3.5.2.2.2. Rotación con circulación directa	44
3.5.2.2.3. Rotación con aire	45
3.5.2.2.4. Rotación con barrena helicoidal	46
3.5.2.3. Rotopercusión neumática	46
3.5.2.4 Pozos de hinca	47
3.5.3. SISTEMAS DE MUESTREO PARA SONDEOS MECÁNICOS	49
3.5.3.1. Consideraciones generales	49
3.5.3.2. Sistemas de muestreo en los métodos de perforación a rotación	49
3.5.3.2.1. Sacatestigos de pared sencilla	50
3.5.3.2.2. Sacatestigos de pared doble	51
3.5.3.2.3. Sacatestigos extraíble con cable	52
3.5.3.2.4. Sacatestigos para arenas y gravas	53
3.5.3.2.5. Tomamuestras de pared gruesa	53
3.5.3.2.6. Tomamuestras Shelby	54
3.5.3.3. Sistemas de muestreo por rotación con barrenas helicoidales	55
3.5.3.3.1. Barrenas helicoidales huecas	55
3.5.3.3.2. Tomamuestras cilíndrico	55
3.5.3.4. Sistemas de muestreo en sondeos a percusión	56

4.2.2.2.2. <i>Equipamiento del pozo de control</i>	81
4.2.2.2.3. <i>Acabado del pozo de control</i>	84
4.2.3. TIPOS DE POZOS DE CONTROL.....	87
4.2.3.1. Pozo de control tipo.....	87
4.2.3.2. Grupo de pozos de control.....	89
4.2.3.3. Pozo de control individual con muestreadores a diferentes profundidades.....	91
4.3. ENSAYOS DE CAMPO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE CONTROL	92
4.3.1. ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON.....	93
4.3.2. ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC.....	94
4.3.3. ENSAYO DE PERMEABILIDAD GILG-GAVARD.....	96
4.3.4. SLUG-TEST.....	98
4.4. DESARROLLO DE POZOS DE CONTROL	100
4.4.1. MÉTODOS O SISTEMAS DE DESARROLLO DE POZOS DE CONTROL.....	101
4.4.1.1. Sobrebombeo con bombas sumergibles.....	101
4.4.1.2. Bombeos de desarrollo con aire.....	102
4.4.1.3. Bombeo de vacío.....	102
4.4.1.4. Bombeo de pulso mecánico.....	103
4.4.1.5. Lavado e inyección.....	103
4.4.1.6. Bombeo mediante bailer.....	103
4.4.2. PROCEDIMIENTOS Y RECOMENDACIONES DE ACTUACIÓN.....	103
5. TOMA DE MUESTRAS DE LA FASE LÍQUIDA	107
5.1. INTRODUCCIÓN	107
5.2. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN POZOS DE CONTROL	108
5.2.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES.....	108
5.2.1.1. Mediciones in-situ.....	109
5.2.1.2. Purgado del pozo.....	110
5.2.1.3. Toma de muestras.....	111

5.2.2. OPERACIONES AUXILIARES	112
5.2.2.1. Medición del nivel de agua	112
5.2.2.2. Medición del espesor de fase libre	113
5.2.2.2.1. Sonda de interfase	113
5.2.2.2.2. Cálculo del espesor real de fase libre	114
5.2.2.3. Otras mediciones	116
5.2.2.4. Filtrado de las muestras	117
5.2.2.5. Acondicionamiento y conservación de muestras	118
5.2.3. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	118
5.2.3.1. Sistemas manuales de depósito	119
5.2.3.1.1. Tomamuestras de válvula o bola	119
5.2.3.2. Sistemas de bombeo	120
5.2.3.2.1. Bomba de pistón o cebado manual	120
5.2.3.2.2. Bombas sumergibles convencionales	121
5.2.3.2.3. Bombas sumergibles neumáticas	122
5.2.3.2.4. Bomba peristáltica	123
5.2.3.2.5. Tomamuestras automático	124
5.2.4. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS SIN INSTALACIÓN DE POZOS DE CONTROL	126
5.3. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA NO SATURADA	127
5.3.1. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO	128
5.3.1.1. Lisímetros	128
5.3.1.2. Filtros de membrana	129
5.3.1.3. Cajas o varillas porosas	129
5.3.1.4. Tomamuestras de succión	130
5.4. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUPERFICIALES	130
5.4.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES	131
5.4.2. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO DE AGUAS SUPERFICIALES	132
5.4.2.1. Muestreadores Kemmerer	132
5.4.2.2. Muestreador de bomba Bacon	133

5.5. TOMA DE MUESTRAS DE RESIDUOS LÍQUIDOS	134
5.5.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES	135
5.5.2. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO	136
5.5.2.1. Tubo de vidrio y bailer	136
5.5.2.2. Muestreador Coliwasa	137
5.5.2.3. Muestreador de bomba Bacon	138
5.5.2.4. Muestreador subsuperficial	138
6. TOMA DE MUESTRAS DE LA FASE GASEOSA	139
6.1. INTRODUCCIÓN	139
6.2. MUESTREO DEL AIRE INTERSTICIAL DEL SUELO	139
6.2.1. PRECAUCIONES GENERALES EN EL MUESTREO DE AIRE INTERSTICIAL	140
6.2.2. SISTEMAS PASIVOS DE MUESTREO	141
6.2.3. SISTEMAS ACTIVOS DE MUESTREO	142
6.2.3.1. Sonda manual de muestreo	142
6.2.3.2. Sonda mecánica de muestreo	143
6.2.4. SISTEMA PARA LA RECOGIDA Y ALMACENAMIENTO DE GAS	146
6.3. MUESTREO DEL AIRE AMBIENTE	147
6.3.1. PRECAUCIONES GENERALES EN EL MUESTREO DE AIRE AMBIENTE	148
6.3.2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE AIRE AMBIENTE	149
6.3.2.1. Instrumentos de determinación cualitativa	149
6.3.2.2. Instrumentos de determinación cuantitativa	149
6.3.3. EQUIPOS Y ACCESORIOS DE MUESTREO DE AIRE AMBIENTE	150
7. TÉCNICAS Y EQUIPOS AUXILIARES PARA EL DIAGNÓSTICO	153
7.1. INTRODUCCIÓN	153
7.2. TÉCNICAS Y EQUIPOS PARA EVALUACIÓN DE METALES	154
7.3. TÉCNICAS Y EQUIPOS PARA EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS	156

7.3.1. DETECTOR DE FOTOIONIZACIÓN	157
7.3.2. DETECTOR DE IONIZACIÓN POR LLAMA	159
7.3.3. TUBOS DE DETECCIÓN	161
7.3.4. CROMATÓGRAFO DE GASES	162
7.4. OTROS EQUIPOS	163
7.4.1. EXPLOSÍMETRO	163
7.4.2. DETECTORES DE GASES EN VERTEDEROS	165
8. CONSERVACIÓN DE MUESTRAS EN CAMPO	167
8.1. INTRODUCCIÓN	167
8.2. RECIPIENTES Y TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN	167
8.3. RECOMENDACIONES PARA LA MANIPULACIÓN Y EL TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS	171
9. RECOMENDACIONES ADICIONALES PARA LA EJECUCIÓN DEL MUESTREO	173
9.1. INTRODUCCIÓN	173
9.2. ORGANIZACIÓN DE LA EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS	173
9.3. MATERIALES AUXILIARES	174
9.4. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN	175
9.5. GESTIÓN DE RESIDUOS Y MUESTRAS NO ENVIADAS A LABORATORIO	177
10. BIBLIOGRAFÍA	179

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento constituye la Guía Metodológica que, elaborada por IHOBE, S.A. en el marco de la Política para la Protección del Suelo de la Comunidad Autónoma del País Vasco, aborda y desarrolla los aspectos relacionados con los equipos y técnicas que deben utilizarse para llevar a cabo correctamente el muestreo de los diferentes medios presentes en los suelos.

Esta edición de la Guía Metodológica para la Toma de Muestras constituye una actualización de los contenidos de la Guía original publicada en 1.994.

1.1. OBJETIVOS

Los objetivos esenciales de la presente Guía pueden resumirse en los siguientes:

- Contribuir a la homogeneización de los procedimientos utilizados para la toma de muestras de los diferentes medios existentes en los suelos, en el marco de las investigaciones de emplazamientos (potencialmente) contaminados.
- Proporcionar a los diferentes agentes implicados en tales investigaciones unas orientaciones básicas acerca de, por una parte, los principales equipos y técnicas actualmente disponibles y, por otra, los criterios más importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar las técnicas y equipos en un caso concreto.
- Contribuir a mejorar la calidad de los trabajos de investigación de suelos (potencialmente) contaminados.

En todo caso, la elaboración de la presente Guía se ha abordado desde la voluntad de confeccionar una herramienta de carácter eminentemente práctico y acorde con el estado actual de la técnica y de la realidad de la Comunidad Autónoma del País Vasco. A este respecto, el esfuerzo realizado habrá de continuarse en el futuro con revisiones y aportaciones adicionales, en la medida que evolucionen los factores antes señalados.

1.2. AMBITO DE APLICACIÓN Y ALCANCE

Ambito de aplicación

El ámbito de aplicación de la presente Guía se extiende a todo trabajo de investigación y/o recuperación de suelos (potencialmente) contaminados que requiera la toma de algún tipo de muestra y que se lleve a cabo en el territorio de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

Alcance

La Guía centra el desarrollo de sus contenidos en las tareas de toma de muestras de los diferentes medios presentes en los suelos (fases sólida, líquida y gaseosa), así como de los residuos o materiales abandonados que, en determinados emplazamientos, pueden requerir un muestreo para su caracterización. En consecuencia, esta Guía es de especial interés para las fases de Investigación Exploratoria e Investigación Detallada, según se definen en la *Guía Metodológica del Estudio Histórico y Diseño del Muestreo*.

Para las tareas antes señaladas, la Guía desarrolla consideraciones acerca de los siguientes aspectos:

- Equipos de toma de muestras y auxiliares que son de más frecuente aplicación en las investigaciones de suelos (potencialmente) contaminados, describiendo para cada uno su principio de funcionamiento y su utilización práctica.
- Recomendaciones tendentes a facilitar la selección de los equipos más adecuados para determinadas labores y condiciones de los medios a muestrear.
- Procedimientos de ejecución de las labores de muestreo propiamente dicho, así como de otros trabajos complementarios habitualmente implicados en la toma de muestras (perforaciones, instalación de pozos de control, etc.).
- Precauciones generales y específicas a tener en cuenta a la hora de ejecutar las tareas objeto de la Guía.

En todo caso, esta Guía no pretende ser un manual detallado de las diferentes labores que contempla, sino más bien una introducción práctica a los equipos que con mayor frecuencia se utilizan en tales labores y a las técnicas que se consideran adecuadas para garantizar la calidad y fiabilidad de las muestras. Por tanto, en muchas ocasiones será preciso acudir a manuales

especializados o contactar con los suministradores de equipos para resolver cuestiones específicas.

Finalmente cabe señalar que, a la hora de redactar la Guía, se ha tenido en cuenta el diagnóstico preliminar contenido en el *Documento Estratégico* de la propuesta de *Plan Director para la Protección del Suelo de la Comunidad Autónoma del País Vasco (1994)*. En base a dicho diagnóstico, la Guía dedica mayor atención a los equipos y técnicas de toma de muestras que cabe esperar sean de más frecuente aplicación.

1.3. CONTENIDO

La Guía se ha estructurado en buena medida de acuerdo con las diferentes fases o medios existentes en los suelos que pueden ser objeto de muestreo (fase sólida, líquida o gaseosa). Adicionalmente, se incluyen consideraciones acerca de diversos aspectos colaterales a la toma de muestras propiamente dicha (factores a tener en cuenta durante la planificación y ejecución, prácticas de conservación de muestras, etc.).

A continuación se describen brevemente los contenidos de cada parte de la Guía:

- El capítulo 2 contiene algunas recomendaciones sobre los principales factores a considerar durante la planificación y preparación de los trabajos de muestreo.
- En el capítulo 3 se aborda la descripción de los principales equipos y técnicas empleados para la perforación y muestreo de la fase sólida, incidiendo particularmente en los distintos tipos de sondeos de suelos. Por separado se tratan los equipos y técnicas de muestreo de sedimentos, de elementos constructivos contaminados y de residuos o materiales abandonados.
- El capítulo 4 se dedica específicamente a los pozos de control, describiendo los métodos de construcción y desarrollo de los mismos, así como los ensayos de permeabilidad más habituales.
- El capítulo 5 trata las técnicas y equipos de toma de muestras de la fase líquida, distinguiendo a este respecto las aguas subterráneas de los pozos de control, los productos presentes en las mismas en forma de fase libre, las aguas subterráneas de la zona no saturada, las aguas superficiales y los residuos líquidos.

- La toma de muestras de la fase gaseosa es objeto del capítulo 6. En él se hace una distinción entre el muestreo del aire intersticial del suelo y el muestreo del aire ambiente.
- Como complemento a los contenidos anteriores, el capítulo 7 se dedica a describir ciertas técnicas y equipos comúnmente utilizados para obtener diagnósticos aproximados del estado de contaminación del suelo o para seleccionar en campo las muestras más apropiadas para su posterior análisis en laboratorio.
- El último bloque de la Guía está orientado a tratar otros aspectos colaterales de la toma de muestras, como son la preparación y conservación de las mismas en campo (antes de su traslado al laboratorio), que es objeto del capítulo 8, o determinadas buenas prácticas a aplicar durante la ejecución del muestreo, que se describen en el capítulo 9.

Finalmente se presenta la bibliografía más relevante que se ha consultado para la redacción de la Guía, la cual puede utilizarse para ampliar o profundizar en determinados aspectos.

2. FACTORES A TENER EN CUENTA ANTES DEL MUESTREO

2.1. INTRODUCCIÓN

La correcta ejecución de una campaña de muestreo en el marco de una investigación de suelos contaminados exige considerar previamente a su realización una serie de factores de diversa índole que influyen en la planificación detallada de la misma. La falta de consideración de estos factores puede traducirse en retrasos y/o sobrecostos injustificados en la ejecución de estos trabajos, así como en interpretaciones incompletas o erróneas de la información obtenida, con la consiguiente repercusión negativa en el diagnóstico de la situación.

En consecuencia, el **diseño del muestreo** constituye una labor crucial que debe abordarse desde una perspectiva amplia e integrada de los distintos factores en juego en cada caso concreto. El diseño del muestreo se apoyará en la hipótesis de distribución espacial de la contaminación que se haya formulado a partir de los resultados de la fase previa de investigación (Investigación Exploratoria, según se contemplan en la *Guía del Estudio Histórico y Diseño del Muestreo*) y deberá considerar los condicionantes existentes (de tipo físico, técnico, operativo, etc.) y los objetivos particulares de la campaña a ejecutar.

Así pues, durante el diseño del muestreo correspondiente a una campaña concreta, es preciso considerar diversos factores que, a título meramente orientativo, pueden agruparse en los siguientes tipos:

- Factores asociados a los objetivos de la campaña y los contaminantes presentes.
- Factores asociados a las características del terreno a investigar.
- Factores operativos.

A continuación se identifican y describen brevemente los más relevantes encuadrados en cada uno de los grupos anteriores.

2.2. FACTORES ASOCIADOS A LOS OBJETIVOS DE LA CAMPAÑA Y LOS CONTAMINANTES PRESENTES

- **Extensión espacial de la contaminación**

Como base del diseño del muestreo, deberá formularse una hipótesis acerca de la extensión espacial de la contaminación en el emplazamiento a investigar, así como de la potencial distribución de los contaminantes en los diferentes medios. Tal hipótesis se realizará a partir de los resultados obtenidos en la fase previa (Investigación Exploratoria).

De cara a formular las hipótesis sobre extensión y distribución espacial de la contaminación, pueden ser de interés las mediciones que, en su caso, se hayan efectuado en campo mediante equipos portátiles y técnicas aproximadas de cuantificación de contaminantes (ver capítulo 7).

- **Medios a muestrear**

Se deberá prever los medios que van a ser objeto de muestreo en la campaña, los cuales condicionarán las técnicas y equipos a emplear, así como determinadas labores asociadas a la toma de muestras (perforación de sondeos, instalación de pozos de control, etc.). A este respecto, es importante determinar las profundidades que se requiere alcanzar en el muestreo de la fase sólida (las cuales condicionarán el diámetro de perforación) y la necesidad de instalar pozos de control y la tipología de los mismos en función de los usos a que se vayan a destinar.

- **Naturaleza de los compuestos a investigar**

Resulta de primordial interés conocer a priori la naturaleza (características físico-químicas básicas) de las sustancias cuya presencia en los diferentes medios se pretende cuantificar. Ello permitirá elegir los equipos más adecuados para la perforación y el muestreo y adoptar las medidas de seguridad oportunas durante los trabajos.

2.3. FACTORES ASOCIADOS A LAS CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO A INVESTIGAR

El área de estudio puede ser un terreno natural o una zona en la que se ha producido un relleno antrópico. En el último caso, será necesario conocer, con la mayor precisión posible, el tipo de materiales de relleno (escombros,

suelos, tierras de vaciado, residuos, etc) y sus características físico-químicas y estructurales básicas.

En todo caso, a la hora de abordar el diseño del muestreo, resulta deseable disponer de cuanta información sea posible acerca de las características del terreno a investigar, en particular, sus características geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas (columna estratigráfica, litología, dureza, compactación, grado de alteración, potencia y buzamiento, profundidad del nivel freático, estabilidad, etc.).

2.4. FACTORES OPERATIVOS

- **Accesibilidad y orografía del terreno**

Durante el diseño del muestreo se debe llevar a cabo un reconocimiento del emplazamiento, dirigido especialmente a comprobar la accesibilidad de las zonas a muestrear, que puede condicionar los equipos a utilizar durante la campaña. Se deberán identificar las zonas de difícil acceso, escarpes, taludes, laderas de fuerte pendiente, zonas inestables, etc.

- **Presencia de superficies pavimentadas**

En ciertos emplazamientos, la superficie del terreno a investigar está constituida por un pavimento (solera de hormigón, pavimento asfáltico, etc.) de mayor dureza, que se tendrá que atravesar antes de profundizar con los sondeos. Este factor ha de tenerse en cuenta, en la medida que puede requerir equipos específicos (martillos neumáticos, etc.) adicionales a los de perforación y muestreo que se empleen posteriormente.

- **Presencia de conducciones aéreas y subterráneas**

Se deberá investigar sistemáticamente (en especial, en emplazamientos situados en zonas urbanas o periurbanas) la presencia de canalizaciones de servicios (electricidad, abastecimiento de agua, saneamiento, gas, etc.) enterradas o tendidos eléctricos aéreos. Esta información es de gran importancia para garantizar la seguridad durante las actividades de muestreo, sobre todo en aquellos casos en que se pretenda utilizar técnicas intrusivas.

A tal fin, se recomienda obtener los planos de las instalaciones, acometidas, redes de distribución de la zona, además de efectuar una consulta directa con el personal instalador o de mantenimiento de las mismas. En los casos en que ello no sea posible o la información no resulte suficientemente fiable, resulta de interés el uso de detectores de canalizaciones subterráneas.

- **Disponibilidad de agua y energía eléctrica**

Determinadas labores de la toma de muestras requieren disponer de agua en el emplazamiento investigado. Es el caso de la limpieza de los equipos de perforación y muestreo. En cuanto a la ejecución de las perforaciones propiamente dichas, se deben aplicar por norma sistemas de perforación en seco. No obstante, en ciertas circunstancias será ineludible perforar con la ayuda de agua, recomendándose en todo caso minimizar la cantidad utilizada y evitar el uso de otros fluidos.

El agua utilizada para estas labores debe ser limpia, con el fin de no distorsionar las características de las aguas del emplazamiento. Durante el reconocimiento del terreno antes mencionado deben estudiarse las alternativas de abastecimiento de agua a los trabajos de campo (acometida de red pública, cubas, etc.), así como la necesidad de elementos auxiliares (mangueras de distribución, válvulas, etc.).

Asimismo, se deberá estudiar la necesidad de disponer de una fuente de energía (en general, eléctrica) para el desarrollo de las actividades de muestreo. En caso de ser precisa, debe preverse la forma y medios que se van a disponer.

- **Permisos**

Antes de iniciar cualquier investigación de campo se deberán conseguir los permisos oportunos (de ocupación, de perforación, de acceso a los terrenos, etc.), que pueden variar de un caso a otro. Asimismo, puede ser necesario informar a las autoridades competentes del comienzo de los trabajos.

- **Seguros**

Ante la eventualidad de una perforación o ruptura indeseada de algún cable o conducción subterránea, se recomienda disponer de un seguro de responsabilidad civil, que deberá cubrir todos los posibles daños que pudieran afectar a instalaciones, personas, etc.

- **Seguridad y salud laboral**

Las medidas de seguridad y salud laboral a adoptar durante la ejecución de la toma de muestras han de analizarse y definirse antes del comienzo de los trabajos, quedando reflejadas en el denominado Plan de Seguridad. La *Guía Técnica de Seguridad para la Investigación y Recuperación de Suelos Contaminados* establece los contenidos de dicho plan y contiene recomendaciones acerca de cómo efectuar la evaluación de este tipo de riesgos y la determinación de las medidas y equipos de protección necesarios.

2.5. PLANIFICACIÓN DE LOS TRABAJOS

La planificación de los trabajos de muestreo es crucial para garantizar la óptima ejecución de los mismos en términos de calidad, seguridad, plazo y coste. Los elementos esenciales a contemplar en la planificación son los siguientes:

- Organigrama del equipo humano de trabajo, incluyendo tareas, responsabilidades y dedicaciones de sus integrantes, así como las líneas de comunicación entre los mismos.
- Asignación de recursos materiales necesarios para la ejecución de cada tarea del programa de trabajo, diferenciando los medios propios de los aportados por empresas colaboradoras o subcontratistas.
- Cronograma de trabajo, en el que se refleje la duración estimada para cada tarea y la secuencia temporal y dependencias entre las mismas. Se recomienda que la planificación temporal sea flexible, a fin de permitir adaptaciones a las situaciones imprevistas que suelen darse en el curso de la ejecución de este tipo de trabajos, sin que ello revierta necesariamente en la prolongación del plazo total previsto.

3. MÉTODOS DE PERFORACIÓN Y MUESTREO DE LA FASE SÓLIDA

El muestreo de la fase sólida del suelo se encuentra normalmente ligado a la ejecución de zanjas, excavaciones o perforaciones de diversa profundidad que, por tanto, suponen en mayor o menor medida una alteración de las condiciones previas del terreno. Dado que uno de los requisitos del muestreo es intentar obtener muestras lo más representativas posible de las condiciones originales del terreno, la utilización de estas técnicas (denominadas genéricamente intrusivas) debe realizarse con particular precaución de modo que el grado de alteración resultante sea el menor posible, dentro de las limitaciones impuestas por los demás condicionantes de la investigación.

En todo caso, la toma de muestras de la fase sólida del suelo constituye un medio imprescindible para la posterior determinación (en campo o en laboratorio) de los compuestos presentes en ella. Debido a las técnicas habitualmente empleadas para el muestreo, esta labor permite además un reconocimiento del perfil del terreno atravesado, así como la obtención de muestras de suelo para la determinación de otro tipo de características (físicas, hidrogeológicas, geotécnicas) que, en determinadas fases de la investigación del suelo, pueden resultar de interés.

Tras exponer algunas recomendaciones generales acerca del muestreo de la fase sólida, en este capítulo se describen los sistemas y equipos de perforación y muestreo más habitualmente utilizados en las investigaciones de suelos contaminados. La mayoría de estos sistemas provienen del campo de la investigación geológico-geotécnica e hidrogeológica y han sido adaptados a la investigación medioambiental.

Los principales sistemas intrusivos de investigación del terreno que permiten la toma de muestras de la fase sólida del suelo son los siguientes:

- Calicatas (o excavaciones similares).
- Sondeos manuales.
- Sondeos ligeros.
- 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 sistemas 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 de ello, muchos de los equipos de toma de muestras de agua subterránea que puedan ser posteriormente utilizados en dichos pozos exigen requisitos en cuanto a la configuración de los mismos que sólo proporcionan los sondeos mecánicos.

Así pues, la elección de las técnicas de perforación y muestreo de la fase sólida más adecuadas para cada caso particular debe realizarse a la vista de los objetivos específicos de la campaña de muestreo, de las características del terreno a investigar y del resto de los condicionantes del caso.

El capítulo también se ocupa de los equipos y sistemas más habituales para el muestreo de sedimentos, así como de las labores de toma de muestras de elementos constructivos contaminados (particularmente aplicable a la investigación de ruinas industriales) y de materiales y residuos abandonados.

3.1. RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL MUESTREO DE LA FASE SÓLIDA

El muestreo de la fase sólida se debe llevar a cabo aplicando procedimientos estándar que garanticen la representatividad de las muestras. Como norma general, las muestras deben tomarse de forma que se obtenga, para el nivel, estrato u horizonte objeto de estudio, una proporción de suelo representativa y lo menos alterada posible.

A continuación se resumen algunas recomendaciones generales a aplicar durante las labores de toma de muestras de la fase sólida del suelo:

- El orden de ejecución del muestreo debe seguir, en lo posible, una secuencia de puntos supuestamente menos contaminados a más contaminados, de acuerdo con las hipótesis de distribución espacial de la contaminación formuladas durante el diseño de la campaña.
- Si durante la toma de muestras, en el perfil de un mismo sondeo, se aprecian niveles o estratos bien diferenciados, se procurará tomar muestras de cada uno de ellos.
- En todo caso, se deben muestrear diferenciadamente aquellas capas que presentan indicios organolépticos de contaminación (color, olor, etc.).

- Hay que procurar que el tiempo de contacto entre el suelo y los equipos de perforación y muestreo sea el menor posible.
- Siempre que el equipo y técnica de muestreo lo permita, se recomienda eliminar de la muestra la parte de suelo que haya estado en contacto con el equipo muestreador, a fin de no incorporar a aquélla posibles arrastres de materiales procedentes de niveles superiores y las partes del suelo más alteradas por adherencia a las paredes del muestreador.
- Cuando se tome una muestra inmediatamente por debajo de un nivel claramente contaminado (por ejemplo, en presencia de una capa flotante o fase libre de hidrocarburos sobre el nivel freático), debe colocarse un tubo de revestimiento de la perforación justo por debajo de esta capa, a fin de evitar que la contaminación progrese en profundidad.
- Debe evitarse mezclar muestras en campo. En caso necesario, esta operación debe llevarse a cabo en el laboratorio.
- Durante el envasado de muestras disgregadas, debe llenarse el recipiente con material hasta enrasar con la boca, intentando que quede el menor volumen de aire en el interior, para seguidamente cerrar herméticamente el recipiente.
- Todos los elementos de los equipos de perforación y muestreo que puedan entrar en contacto con el suelo deben ser cuidadosamente limpiados antes del comienzo de cada sondeo. Los muestreadores que se utilicen más de una vez en un mismo sondeo también se limpiarán entre cada dos tomas de muestra consecutivas.
- Dado que la perforación y toma de muestras de la fase sólida del suelo constituye normalmente una de las operaciones más peligrosas de las investigaciones de suelos contaminados, las medidas contempladas en el plan de seguridad a este respecto deben ser seguidas estrictamente (*Véase Guía Técnica de Seguridad para la Investigación y Recuperación de Suelos Contaminados*).

3.2. CALICATAS

Las calicatas son excavaciones de investigación efectuadas en el terreno por medios mecánicos, generalmente retroexcavadoras que pueden llegar hasta 5-7 m de profundidad, en función de la longitud del brazo de la máquina y si éste es extensible, e incluso hasta 8-10 m si se realizan bancales (aunque en estos casos el tiempo necesario para estas operaciones aumenta en gran medida).

Es una técnica útil cuando sea enfocada como una herramienta complementaria a la investigación, o en el caso de tratarse de determinaciones superficiales y delimitación horizontal de la extensión de un suelo contaminado. De esta manera, es posible extraer información de un amplia área en un corto espacio de tiempo, y mediante costes reducidos, pero limitada a las capas superiores de suelo. Por ello se utiliza en muchos casos como técnica de optimización de posteriores investigaciones, tales como perforación de sondeos de investigación, o delimitación y separación de zonas contaminadas/no contaminadas.

La información aportada mediante esta técnica se ciñe sobretodo, y con las limitaciones mencionadas de profundidad, a la observación in situ de las condiciones y estratigrafía del terreno (perfiles, contactos entre diferentes materiales, color, humedad, grado de compactación, etc.). Esta técnica no es adecuada para muestreos dirigidos a la caracterización de contaminantes volátiles o semivolátiles, debido a la escasa representatividad de las muestras extraídas.

Es importante señalar que los muestreos realizados mediante este procedimiento presentan un alto grado de riesgo debido a la inestabilidad de las paredes de la calicata, debiéndose entibar a partir de 1,30 m de profundidad. Existen antecedentes de accidentes mortales debido a colapsos repentinos de catas donde se encontraban operarios trabajando, por ello el personal de muestreo debe emplear en todo momento y en caso de ser necesario, prolongaciones de los muestreadores, nunca debiendo introducirse en la calicata ante un posible riesgo de colapso de ésta. Incluso si por alguna circunstancia la calicata no se tapara inmediatamente después del muestreo se deberá señalar junto con el acopio de materiales, mediante balizas.

En algunos casos estas excavaciones son utilizadas como zanjas de intercepción de la contaminación, cuando el vehículo son las aguas subterráneas y siempre que la profundidad del freático sea escasa. En este caso, las calicatas serán de mayor longitud y deberán ser posteriormente rellenadas con material filtrante, que propicie la conducción de las aguas subterráneas hacia las instalaciones elegidas (por ejemplo, pozos de recuperación).

3.3. SONDEOS MANUALES

Los sondeos manuales son generalmente utilizados ante suelos cohesivos o no cohesivos, aunque presentan limitaciones en cuanto a profundidad y dureza, no siendo aplicables ante suelos rocosos o excesivamente pedregosos.

Sus mayores ventajas radican en la facilidad de aprendizaje y manejo de los equipos, además del reducido peso y los bajos costes asociados a éstos. La profundidad máxima que es posible alcanzar en condiciones ideales ronda los 5 m, aunque la experiencia en investigaciones realizadas en suelos de la Comunidad Autónoma del País Vasco refleja profundidades medias de 1 m. Existen multitud de diseños diferentes de las sondas aplicables a esta técnica, generalmente relacionados con la composición del suelo, dureza, grado de compactación, humedad, tipo de muestra a recoger, presencia o ausencia de nivel freático, etc. Se describen a continuación las más utilizadas en las investigaciones de suelos contaminados.

3.3.1. EQUIPOS DE PERFORACIÓN Y MUESTREO

3.3.1.1. Sonda de Embudo

La sonda de embudo consta de un tubo de 5 a 15 cm de longitud acoplado a un embudo en el que se almacenan las muestras que se van tomando. El embudo está unido a un vástago largo con mango (ver Figura N° 1). Se emplea para la toma de muestras conjuntas de la parte superficial del suelo (5 a 15 cm) y es apropiada para todo tipo de suelos excepto suelos arenosos secos. El diámetro de cada muestra es de unos 2,5 cm y la longitud total del aparato de 90 cm. La muestra se introduce en el embudo mediante empuje, quedando contenida en el interior del embudo.

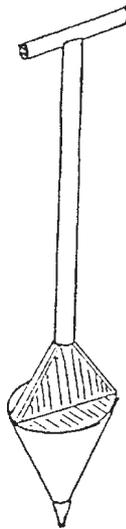


Figura N° 1. Sonda de Embudo

3.3.1.2. Sonda «Edelman»

Es la sonda más conocida y de uso universal. Consta de un sacamuestras disponible en varios diámetros unido a un vástago con un mango acoplado para poder girar (ver Figura N° 2). Se emplea para todo tipo de suelos, preferiblemente húmedos y cohesivos y las muestras extraídas presentan poca alteración. Los diámetros disponibles del sacamuestras son diversos entre 4 y 20 cm, siendo el estándar de 7 cm, mientras que la longitud de la sonda es de 127 cm. Es posible unir prolongadores de 0,5 m ó 1 m hasta alcanzar profundidades de unos 5 m, pero presenta grandes dificultades.



Figura N° 2. Sonda «Edelman». Fuente: catálogo Eijelkamp

3.3.1.3. Sonda manual de media caña

La sonda manual de media caña consta de un cilindro sacamuestras de media caña unido a un vástago con mango para girar y un refuerzo en su parte alta para ser golpeado. Asimismo el equipo está dotado de una escala decimétrica (ver Figura N° 3). Este sistema es apto para terrenos blandos y húmedos en suelos cohesivos, y el grado de alteración de la muestra es bajo. Se encuentra en diámetros disponibles del sacamuestras de 20 o 30 mm. La

longitud total de la sonda es de 1,45 m y la del sacamuestras de 1,05 m.

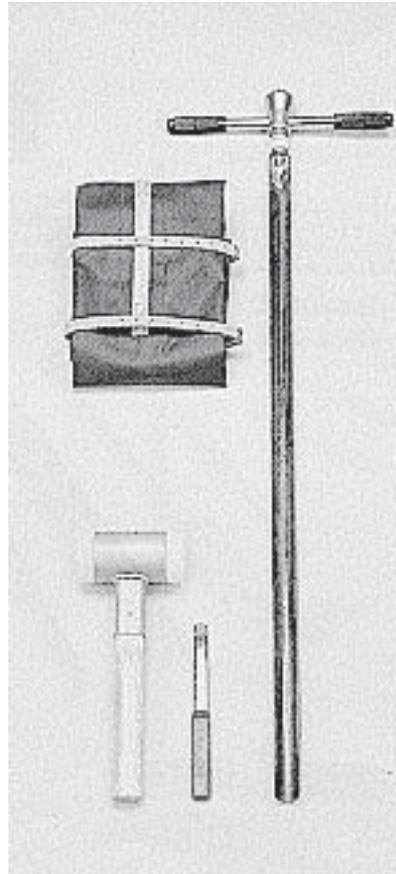


Figura N° 3 . Sonda manual de media caña. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.3.1.4. Sonda manual "Riverside"

La sonda Riverside consta de un sacamuestras tubular con su extremo partido en dos bordes triangulados y unido a un vástago con mango acoplado para girar (ver Figura N° 4). Se emplea generalmente para aquellos suelos que presentan dificultades ante otros tipos de barrenas o sacamuestras, siendo apta para terrenos duros y compactos, o que presentan gravas finas entre sus principales constituyentes. El grado de alteración de la muestra es medio. Los diámetros comúnmente disponibles del sacamuestras son 5, 7, 8, 10 y 14 cm, mientras que la longitud total de la sonda es de 1,25 m.



Figura N° 4. Sonda manual "Riverside". Fuente: catálogo Eijelkamp

3.3.1.5. Sonda para gravas

Es similar a la Riverside excepto en que los extremos de la sonda se encuentran triangulados pero curvados hacia dentro en forma de gancho y cruzándose entre ellos. La parte tubular recoge las fracciones de gravas más ligeras del suelo, mientras que los extremos triangulados apartan y extraen las fracciones pedregosas (ver Figura N° 5). Se utiliza por ello para suelos con alto contenido en gravas. Se encuentra en diámetros normalmente de 70, 100 y 140 mm, y provoca una mayor alteración de la muestra que las sondas precedentes.

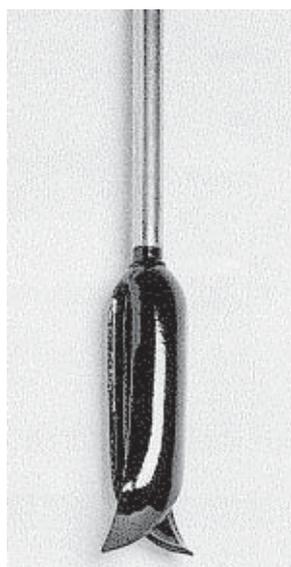


Figura N° 5. Sonda manual para gravas. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.3.1.6. Sonda para suelos arenosos

La sonda para suelos arenosos presenta una parte tubular prolongada y casi cerrada en el extremo, reteniendo aquellos suelos que tienen mínimas propiedades cohesivas (ver Figura N° 6). Es únicamente de utilidad en estos suelos debido a su sensibilidad a la torsión. Su diámetro más común es de 70 mm y presenta baja alteración de la muestra.



Figura N° 6. Sonda manual para suelos arenosos. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.3.1.7. Sonda de pistón

La sonda de pistón es útil en suelos poco cohesivos situados por debajo del nivel freático, tales como arenas, arcillas ligeras y fangos. Se utiliza también en muestreo de sedimentos en zanjas, canales y ríos. Normalmente se utiliza conjuntamente con otras sondas (ej. Edelman) para llegar a la profundidad elegida, donde se introduce la sonda pistón para tomar muestras no alteradas (ver Figura N° 7). El diámetro más común es de 40 mm, y el grado de alteración de la muestra es muy bajo.



Figura N° 7. Sonda de pistón. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.3.1.8. Sonda manual helicoidal

Útil para obtención de pequeñas muestras en suelos densos, duros, o muy compactos, aunque su uso principal está dirigido a facilitar el avance en suelos duros hasta una zona más blanda donde se recogerá la muestra mediante otro tipo de sonda. La forma característica de esta sonda (en simple o doble espiral) aumenta en gran medida la penetrabilidad en el terreno (ver Figura N° 8). Su diámetro estándar es de 40 mm. Produce un alto grado de alteración de la muestra, siendo difícil extraer ésta en base al diseño del equipo



Figura N° 8. Sonda manual helicoidal. Fuente: catálogo Eijelkamp

Además de las citadas, existen actualmente completos equipos manuales de perforación, que incluso permiten o posibilitan la entubación del sondeo, ya que están dotados de tubos de revestimiento y con utensilios accesorios de ayuda a la perforación y a la posterior extracción de los vástagos y tomamuestras (poleas, trípodes, etc.), además de posibilitar las tomas de muestras de aguas.

3.3.2. SISTEMAS DE MUESTREO PARA SONDEOS MANUALES

Una vez determinado el punto de muestreo, se despeja el mismo de obstáculos tales como piedras, ramas, maleza, eliminándose la capa vegetal superior con la azada, y tratando de retirarse la menor parte posible de suelo.

Para preparar el equipo se debe realizar el acoplamiento entre el vástago y

mango de perforación y la sonda o terminal elegida para ésta, en función del tipo de suelo.

Seguidamente, se comienza a profundizar con el sistema elegido, introduciendo el equipo mediante giro y empuje manual. En el caso del embudo, el equipo se introduce en el suelo por empuje y la muestra se va recolectando en el embudo empujado por la siguiente a medida que se van tomando muestras. La parte inferior de la sonda está diseñada para recoger la muestra de modo que al sacar el equipo del agujero también será extraída la muestra en el interior del habitáculo especialmente diseñado para ello (ej. sonda Edelman, Riverside, media caña, etc.) o en las paredes del muestreador (ej. sonda de sacacorchos). No se debe forzar en demasía la introducción de la sonda en el terreno, ante la posibilidad de rotura de las uniones de los vástagos, y en virtud de que el llenado total del habitáculo (en especial en suelos húmedos), dificultará posteriormente la extracción de la muestra de su interior debido a la superior compactación del material por la presión debida al excesivo avance.

El suelo extraído periódicamente hasta llegar a la profundidad deseada, debe ir siendo depositado en una lámina plástica cercana a la perforación, previniendo que accidentalmente se pueda reintroducir material ya extraído en ésta. Este procedimiento facilita posteriormente el rellenado del agujero de perforación en aquellos casos en que no se detecte contaminación, o la posible contaminación del área circundante en el caso de que ésta sí sea detectada.

Una vez extraída la muestra de la sonda cuidadosamente, se deben descartar de ésta aquellas fracciones que hayan estado expuestas al contacto con el muestreador, mediante una espátula o herramienta similar, en otra lámina plástica preparada para ello. La muestra debe manipularse lo menos posible hasta su introducción o envasado en el recipiente adecuado, que debe ser cerrado herméticamente. Esta labor se realizará bien cogiendo la muestra directamente con las manos, o con espátulas en función del sistema de muestreo manual que se esté utilizando. En caso de realizarse el envasado manualmente, se deberá disponer de guantes desechables con el fin de no contaminar la muestra. Se deberán utilizar unos guantes limpios para cada muestra.

La muestra deberá ser a continuación correctamente etiquetada, reflejando todos aquellos parámetros que puedan ser de utilidad para su identificación. Se deberá realizar además una descripción de la muestra lo más amplia posible en cuanto a sus características, incluyendo tipo de suelo, dureza, grado de compactación, humedad, color, olor, etc.

En el caso de ser necesaria la extracción de otra muestra a mayor profundi-

dad, y si ello es posible, se realizarán de nuevo las operaciones antes indicadas.

Cuando se considere la perforación terminada y se hayan recogido todas las muestras necesarias, se rellenará de nuevo el agujero de sondeo con los materiales que se han acopiado en la lámina plástica (si no se detectó contaminación), intentándose que el punto de muestreo quede lo más parecido posible a su situación de partida.

En caso de ser necesario, se dejará una señal (ej. estaca de madera identificada) de localización del punto de muestreo, detallándose en un plano o croquis la situación del punto. En algunos casos será necesario realizar el levantamiento topográfico de los puntos de perforación.

En el caso de que el contaminante que estamos investigando así lo requiriese, se deberá disponer de los sistemas de conservación de la muestra pertinentes (*Ver Guía Metodológica de Análisis Químico*).

Es importante recordar que, aún en el caso de realizarse muestreos en diferentes puntos con información acerca de la contaminación relativa de éstos, debe igualmente guardarse la precaución de limpiar exhaustivamente el equipo y cualquier herramienta que haya sido utilizada entre cada uno de ellos.

Durante la realización de sondeos de tipo manual se emplean otros materiales o elementos accesorios tales como guantes desechables, recipientes para muestras, etiquetas de identificación, pulverizador con agua destilada y/o acetona para limpieza de herramientas, rollos de papel «tissue» tipo industrial y tejido tipo «cotton», o bolsas para recoger los desechos.

Las buenas prácticas a observar durante la ejecución de los sondeos manuales relativas a limpieza de materiales o equipos y prevención de la contaminación se encuentran recogidas más ampliamente en el capítulo 9.

3.4. SONDEOS LIGEROS

Los sondeos ligeros (en ocasiones denominados también semimecánicos) representan un escalón intermedio entre los manuales y mecánicos, presentando ventajas y desventajas frente a ambos. En definitiva, vienen a representar la aplicación de las mismas técnicas y equipos que los utilizados en los sondeos manuales, pero con la aportación de una fuente motriz accesoria a la manual. Debido a esta característica, aportan la capacidad de alcanzar mayo-

res profundidades que en los sondeos manuales (aproximadamente hasta 10 m), si bien ello va en detrimento de la comodidad de transporte de éstos equipos, más voluminosos y pesados que los manuales, y con mayor necesidad de accesorios. De cualquier modo, deben considerarse en su conjunto como equipos portátiles, con los cuales es posible acceder a áreas a las que no podrían llegar los equipos mecánicos de perforación. Del mismo modo, los costes asociados a estos equipos son mayores que los de los muestreadores manuales e inferiores a los mecánicos.

3.4.1. EQUIPOS DE PERFORACIÓN Y MUESTREO

Las sondas generalmente empleadas para estos equipos son de dos tipos, en función del tipo de sistema de perforación. Sondas que son normalmente utilizadas en los sondeos manuales (ej. “Edelman” o “Riverside”) no presentan aplicación a esta técnica, debido a sus especiales características. Los sondeos ligeros aplican la fuerza eléctrica o la procedente de un motor a gasolina, que en dependencia del tipo de equipo utilizado generará una torsión, una percusión, o una rotopercusión sobre las sondas utilizadas. A continuación se describen las sondas típicamente empleadas para la toma de muestras mediante este sistema.

3.4.1.1. Sonda helicoidal

El sistema emplea un martillo perforador a rotopercusión (ver Figura N° 9). Este equipo es similar a la sonda helicoidal manual, pero de mayor resistencia y diámetro. Consiste en una broca mecanizada helicoidalmente y con la punta de widia que es accionada a rotopercusión por un taladro eléctrico. El extremo final de perforación puede poseer distintas formas o aletas, y es intercambiable mediante uniones rápidas. Aunque permite la toma de muestras alteradas su función principal es la de perforar soleras de hormigón de hasta 0,5 m facilitando de este modo el empleo posterior de otros equipos de perforación a percusión. Es posible también emplearlo en suelos de tipo arcilloso, que presenten cohesividad pero no sean muy resistentes al avance. No es aplicable a suelos muy sueltos, tales como los arenosos. El diámetro estándar es de 80 mm.

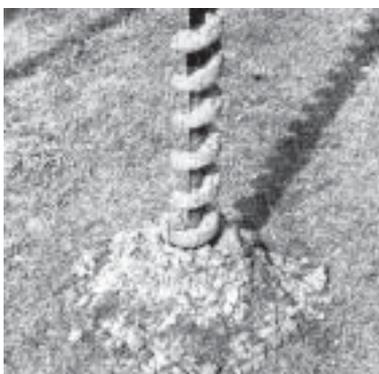


Figura N° 9. Sonda helicoidal de sondeos ligeros. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.4.1.2 Sonda acanalada

El sistema de perforación consiste en un martillo de percusión accionado por motor de gasolina o eléctrico (ver Figura N° 10). Consiste en una barra maciza cilíndrica en la que se ha mecanizado una ranura en toda su longitud. Para aumentar la profundidad de perforación se unen barras macizas mediante espárragos roscados. Se utiliza para todo tipo de suelos y profundidad de hasta 10 m. Los diámetros disponibles son de 25, 28, 30, 32 y 34 mm y las longitudes de la sonda pueden ser de 1 y 1,5 m.



Figura N° 10. Sonda acanalada.

3.4.1.3. Sonda acanalada reforzada

El sistema de perforación emplea un martillo de percusión accionado por motor de gasolina o eléctrico (ver Figura N° 11). Consiste en una barra hueca cilíndrica, que se introduce a percusión, en la que se han abierto unas ventanas para poder extraer el testigo. Es una variante de la sonda anteriormente descrita.

Las utilizadas en el muestreo de materiales muy sueltos o en estado fangoso, disponen de unas patillas en la parte interior de la punta de corte que impiden que el material vuelva a salir una vez que ha entrado. Para aumentar la profundidad de perforación se unen barras macizas. Se utiliza para todo tipo de materiales, hasta una profundidad de 10 m, especialmente para los terrenos sueltos y con poca humedad. También para muestras situadas por debajo del nivel freático en estado semilíquido o fangoso. No precisa de agua u otro fluido de refrigeración. Permite tomar muestras poco alteradas. El sistema tiene el inconveniente de que en función de la litología, la muestra sufre una compresión de entre un 10 y 15 % en longitud. Los diámetros disponibles son de 38, 48, 60, 76 y 100 mm y las longitudes de la sonda pueden ser de 1 y 2 m.

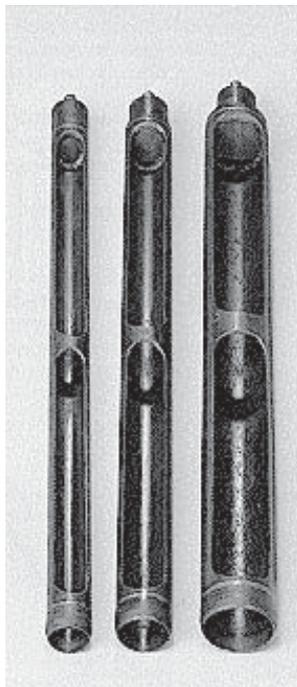


Figura N° 11. Sonda acanalada reforzada. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.4.2. SISTEMAS DE MUESTREO PARA SONDEOS LIGEROS

Los sistemas de muestreo para sondeos ligeros comprenden equipos que son operados por una persona (normalmente los martillos rotopercutores), o que necesitan la intervención de dos operarios (equipos ligeros a rotación). Debe preverse también si existe la necesidad de una fuente de energía que alimente el equipo, ya sea eléctrica o de gasolina. En el primer caso, y según exista o no alguna fuente eléctrica en las cercanías habrá que aportar un generador portátil.

Si existiese solera hormigonada en el punto a sondear, habría que perforar primero ésta para posteriormente introducir las sondas de muestreo de suelos a través de este orificio. De no existir solera u otro tipo de cubierta, se introducen las sondas directamente.

El primer paso consiste en perforar la solera. Para esto, se despeja la zona y se limpia el punto con un cepillo de acero para eliminar la contaminación adherida a la superficie. Seguidamente se perfora la solera con una sonda helicoidal a rotoperusión con punta de widia. Estas sondas permiten trabajar en seco pero presentan la limitación de no poder cortar varillas y armaduras de más de 5 mm de espesor. El material perforado sale en forma de polvo y en caso de considerarse necesario, puede tomarse una muestra para analizar, determinándose de este modo el grado de contaminación de la solera.

Una vez perforada la solera, se introducen las sondas que se van a emplear para tomar las muestras de suelo.

El diámetro de las sondas de toma de muestras está condicionado por el diámetro con que se ha realizado la perforación en la solera.

Llegados a este punto, se introducen a percusión sondas de 1 ó 2 metros de longitud hasta llegar a la profundidad deseada. En caso de encontrar roca sana, relleno de escombros en grandes bolos o material muy compactado, la sonda da rechazo y no se consigue penetrar en el terreno.

Las sondas se acoplan al martillo percutor por medio de un adaptador que se rosca a la sonda. El espárrago roscado que sirve de unión entre el adaptador y la sonda, se rompe con facilidad por ser una pieza sometida a grandes esfuerzos, por lo que se ha de disponer de espárragos de recambio y una caja de herramientas.

Las sondas también se rompen con relativa facilidad, por lo que es conveniente disponer de un taller para la reparación de las mismas.

El sondeo ha de iniciarse con el mayor diámetro disponible con el fin de

llegar a la máxima profundidad posible si así se estima oportuno, ya que es conveniente que a medida que se sondea, el diámetro de perforación disminuya con el fin de que en la sonda no entre material de los niveles superiores y el rozamiento sea menor. Una vez alcanzada la profundidad de 2 m es preciso insertar varillas de extensión entre la sonda y el adaptador para seguir profundizando. Estas varillas de extensión consisten en unas barras macizas de 25 mm de diámetro y 1 o 2 m de longitud. Cada una de estas varillas dispone de una rosca macho y una rosca hembra en cada extremo. Las roscas deben ser lubricadas con algún tipo de material que no aporte contaminación alguna a los sondeos, por lo que no se permitirá el uso de aceites, grasas, etc. Es recomendable el uso de algún material como el polvo de grafito.

Una vez alcanzada la profundidad deseada, las sondas se extraen mediante un gato o extractor mecánico tipo mordaza de bolas autoblocantes y operable por dos personas mediante palancas. Existen también trípodes extensibles que se colocan por encima del equipo de perforación, y elevan éste mediante un carrete de acero y una polea en el extremo final del trípode.

Se deben seguir las mismas consideraciones descritas en el capítulo referente a los sondeos manuales en cuanto a la acumulación de los terrenos extraídos en láminas plásticas junto al sondeo.

Una vez fuera la sonda, es el momento de la toma de muestras. Para esto, las sondas se depositan sobre otra lámina plástica de modo que queden aisladas del suelo.

Una vez hecha la descripción completa y detallada del testigo en una hoja de campo especialmente preparada para ello, se toman las muestras que se estimen necesarias, utilizando para este cometido una espátula estrecha y rígida que entre por las ventanas de la sonda. Para limpiar la espátula es conveniente disponer de un rollo de papel «tissue» de tipo industrial. Hay que tratar de no tomar muestra de las paredes de la sonda con el fin de evitar posibles arrastres de niveles superiores. Durante la toma de muestras se deben utilizar guantes desechables, para evitar tocar la muestra con las manos, así como para no contaminar unas muestras con las anteriores. Las muestras se recogen en los recipientes adecuados y se preservan del mismo modo que se había comentado en el caso de los sondeos manuales.

Posteriormente se etiquetarán los botes adecuadamente tal y como se describió para los sondeos manuales.

Una vez tomadas las muestras se han de limpiar las sondas lo mejor posible para evitar contaminar la muestra del siguiente sondeo. Para esto, se extrae el material que pueda quedar en las sondas, utilizando en este cometido espátulas

rígidas u otros elementos punzantes. También es aconsejable disponer de una piqueta de geólogo con el fin de romper las piedras que se hayan introducido en la sonda y sean difíciles de extraer.

Finalizada la perforación y la toma de muestras, en caso de haberse alcanzado, se debe medir la profundidad del nivel freático, para lo cual se utiliza un hidronivel.

A continuación el sondeo se rellena con bentonita granular y se tapa con cemento en caso de tratarse de alguna zona hormigonada o asfaltada, con lo cual el lugar queda restituido a su situación original. Si es necesario se seguirán las mismas recomendaciones que en los sondeos manuales en cuanto a señalización, identificación y en su caso, nivelación de los sondeos practicados.

Los sondeos ligeros exigen de la utilización de equipos o elementos accesorios tales como: azada y cepillo de acero para despejar y limpiar la zona a perforar, generador o toma de corriente y cable prolongador, adaptador martillo/sonda, barras de extensión, gato y mordaza de bolas, palancas y llaves de impacto, espárragos de unión de repuesto, caja de herramientas, guantes de trabajo, protectores auditivos, casco, espátula para la extracción de la muestra, toma de agua o equipo de limpieza al vapor para evitar la contaminación de las sondas, rollo de papel «tissue» de tipo industrial y tejido tipo «cotton», y bolsas para recoger los desechos.

En el Cuadro N° 1 se reflejan las principales características de los distintos tipos de sondas empleadas para los sondeos manuales y ligeros.

3. Métodos de perforación y muestreo de la fase sólida

Cuadro N° 1. Sondeos manuales y ligeros

Equipo de perforación	Tipo de suelo aplicable	Profundidad (cm)	Díámetro sonda (mm)	Possible instalación pozos de control	Funcionamiento	Grado de alteración de la muestra	Descripción de la estructura (per fil)	Volumen de muestra por manobra (cm ³)	Principio operativo	Tipo de muestra
SONDEOS MANUALES										
EMBUDO	Suelos de todo tipo excepto los arenosos secos	5-15	25	No	Manual	Muy bajo	Medio	15-40	Introducción en el suelo y extracción de forma continuada en los distintos puntos a muestrear	Conjunta
SONDA EDELMAN	Todo tipo de suelos húmedos y cohesivos	100-150	40-200	No	Manual	Bajo	Medio	140-350	Giro y subida cada 20 cm	Individual
SONDA DE MEDIA CAÑA	Suelos cohesivos blandos y húmedos	100	20-60	No	Manual	Muy bajo	Buena	300	Introducción de la longitud total de la sonda por golpeo, giro y subida	Individual
SONDA RIVERSIDE	Suelos cohesivos, duros y compactos, con gravas	100-150	50-140	No	Manual	Medio	Medio	100-280	Giro y subida cada 20 cm	Individual
SONDA PARA GRAVAS	Suelos con contenido en gravas	100-150	70-140	No	Manual	Alto	Baja	Variable	Giro y subida	Individual
SONDA SUELOS ARENOSOS	Suelos arenosos secos	100-150	70	No	Manual	Bajo	Baja	Variable	Introducción en el suelo y extracción continuada	Conjunta
SONDA DE PISTON	Suelos poco cohesivos bajo nivel freático	500	40	No	Manual/aire	Muy bajo	Buena	2500	Introducción de la sonda a la profundidad adecuada, selección por pistón y posterior extracción	Individual
SONDA MANUAL HELICOIDAL	Suelos densos, cohesivos, compactos	100-150	12-55	No	Manual	Alto	Baja	Variable	Giro y subida cada 20 cm	Individual
SONDEOS LIGEROS										
SONDA HELICOIDAL	Soleras de hormigón u otro tipo de cubiertas duras	50	70-80	No	Mecánico	Alto	Baja	Variable	Taladro a rotoperación	Individual
SONDA ACANALADA	Todo tipo de terrenos	1000	25-34	No	Mecánico	Muy bajo	Buena	Función de la longitud y diámetro de la sonda	Introducción de sondas a percusión y extracción de las mismas mediante gato	Individual
SONDA ACANALADA REFORZADA	Todo tipo de terrenos	1000	38-100	No	Mecánico	Muy bajo	Muy buena	Función de la longitud y diámetro de la sonda	Introducción de sondas a percusión y extracción de las mismas mediante gato	Individual

3.5. SONDEOS MECÁNICOS

3.5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

La elección de un método de perforación mecánica aplicado a la investigación de suelos no siempre resulta todo lo sencillo que pudiera esperarse, máxime si se desean llevar a cabo otras operaciones posteriores como pueden ser determinadas tomas de muestras o la construcción de un pozo de control. Esta técnica de perforación requiere de la aplicación de una logística superior a las anteriormente descritas, viéndose esta necesidad reflejada en los costes asociados a las actividades de investigación. De este modo, las campañas de muestreo llevadas a cabo mediante equipos mecánicos de perforación deben ser cuidadosamente planificadas, tanto respecto a las necesidades de material accesorio a ésta, como a la coordinación de los equipos de perforación, muestreo y personal que vaya a intervenir en la campaña, así como en la dilatación temporal de los trabajos. Del mismo modo, la utilización de equipos de perforación mecánicos requiere de operarios muy experimentados, y que conozcan los procedimientos generales de toma de muestras y puedan aplicarlos durante las perforaciones. Esto es debido a que los equipos comúnmente utilizados provienen de la investigación geotécnica, cuyos principios y procedimientos en cuanto al manejo, ritmo de avance, y manipulación de muestras es distinto a las investigaciones de suelos contaminados.

Por ello se ha optado por describir los métodos de perforación usuales, aunque en algunos casos su aplicación sea casi tan restringida como la de otros métodos obviados en esta Guía Metodológica.

De todos los métodos descritos, la experiencia en la investigación de suelos contaminados demuestra que los más apropiados para el muestreo de suelos son la rotación con coronas de perforación (la más desarrollada en las investigaciones de espacios contaminados) y en menor grado la percusión y la rotación con barrenas helicoidales. En la Comunidad Autónoma del País Vasco., debido a las características especiales de la mayor parte de las investigaciones de suelos contaminados que se llevan a cabo, los métodos más utilizados son la rotación con coronas de perforación y la rotopercusión.

El resto de los métodos que se describen son de menor utilidad para el muestreo de suelos porque provocan mayores alteraciones en el medio, sin embargo resultan en ocasiones imprescindibles en la construcción de pozos de control

3.5.2.2. Rotación

Es el método de perforación más desarrollado de los existentes y el que se utiliza actualmente con mayor frecuencia durante el desarrollo de campañas de perforación y muestreo.

El fundamento de avance consiste en la transmisión de un movimiento de avance y giro a un útil de corte por medio del varillaje. Existen diversos métodos de rotación que podríamos clasificar en función de los siguientes aspectos:

- Tipo de útil de corte.
- Utilización o no de fluidos de perforación y tipo de fluido.
- Método de circulación de fluidos.

Teniendo en cuenta los criterios de clasificación anteriormente citados, se describirán a continuación algunos de los principales métodos de rotación, no citando otros por su menor utilidad en muestreo de suelos y construcción de pozos de control.

3.5.2.2.1. Rotación con coronas de perforación

Este método está especialmente indicado cuando se desea realizar un muestreo en continuo de suelo. El fundamento de avance es el mismo que los demás métodos de rotación y en este caso, los objetivos perseguidos, así como las características del terreno a perforar determinarán el tipo de corona a usar, el uso o no de fluidos de perforación y el tipo de fluido (ver Figura N° 13).

En principio, para la perforación de suelos, resulta adecuada la perforación con corona de carburo de tungsteno (widia) en seco, ya que la utilización de aditivos líquidos tales como lodos bentoníticos o poliméricos podría alterar las condiciones naturales del suelo, además de servir como posible medio de propagación de contaminaciones existentes en el entorno del sondeo. La corona de widia se acopla en el extremo de la tubería o batería de perforación, y es la que efectúa el corte de los materiales que van siendo atravesados, siendo éstos introducidos en el hueco de la batería, y posteriormente extraídos a la superficie. Las varillas de perforación se van uniendo mediante manguitos a medida que se avanza en el terreno.

Los diámetros de perforación recomendados son de 86, 101 ó 116 mm,

aunque también puede ser 55 mm. En cualquier caso, el diámetro debe adaptarse a la aplicación futura que se vaya a determinar para la perforación (sondeo de investigación y observación, pozo de recuperación, etc.).

Para la perforación de suelos mixtos y rellenos con elevada resistencia mecánica, se recomienda el uso de coronas de diamante. En este caso la perforación podrá realizarse con adición de agua como refrigerante de la corona, pero sólo en caso de que el avance sea absolutamente necesario para la consecución de los objetivos marcados y éste sea técnicamente imposible sin la adición de agua. El agua adicionada debe ser analizada previamente y encontrarse libre de cualquier posible contaminante

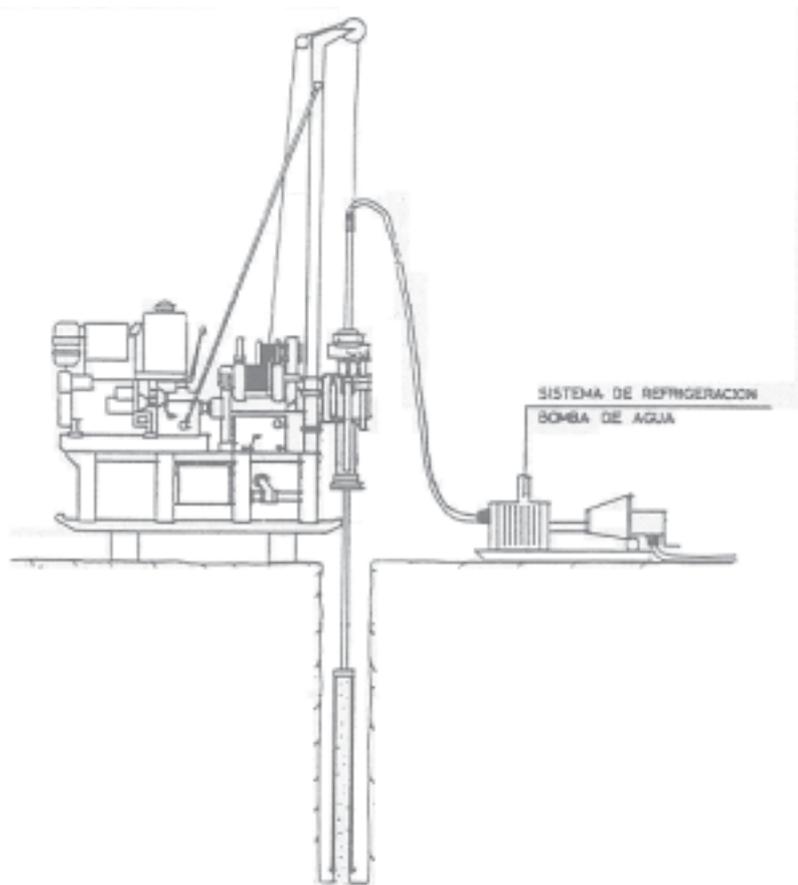


Figura N° 13. Esquema de equipo de rotación con coronas

3.5.2.2.2. Rotación con circulación directa

Este método resulta un buen complemento para ensanchamiento de perforaciones realizadas con corona para recuperación de testigo en continuo. También puede utilizarse directamente para la perforación de sondeos destinados al equipamiento de pozos de control.

Como en todos los métodos de rotación, la sonda ejercerá un movimiento de avance y rotación, por medio de una mesa de rotación, al útil de corte. En este caso, los útiles de corte utilizados mayoritariamente son las llamadas barrenas de rodillos (TRICONOS). El perfil dentado favorece la acción de corte y trituración del terreno.

La novedad de este método reside en que la sonda deberá estar provista de una bomba de lodos que provoca un flujo de un líquido o emulsión según el esquema que se explica sintéticamente a continuación (ver Figura N° 14).

El fluido o emulsión (puede ser agua, lodo bentonítico o lodo celulósico de polímeros) es aspirado por la bomba desde un foso de reserva y transmitido por el interior del varillaje a la zona de perforación. Una vez allí asciende verticalmente por el espacio anular existente entre las paredes del sondeo y el varillaje, arrastrando los residuos de perforación o rípios. Al llegar al exterior, el fluido pasa al foso de decantación y de allí nuevamente al foso de reserva cerrándose el ciclo.

Las funciones principales que cumplen los lodos de perforación son las siguientes:

- Extraer el detritus o ripio de perforación.
- Refrigerar el útil de corte.
- Sostener las paredes de perforación.

La elección del útil de corte o tricono y por tanto del diámetro de perforación se hará en función de los objetivos previstos.

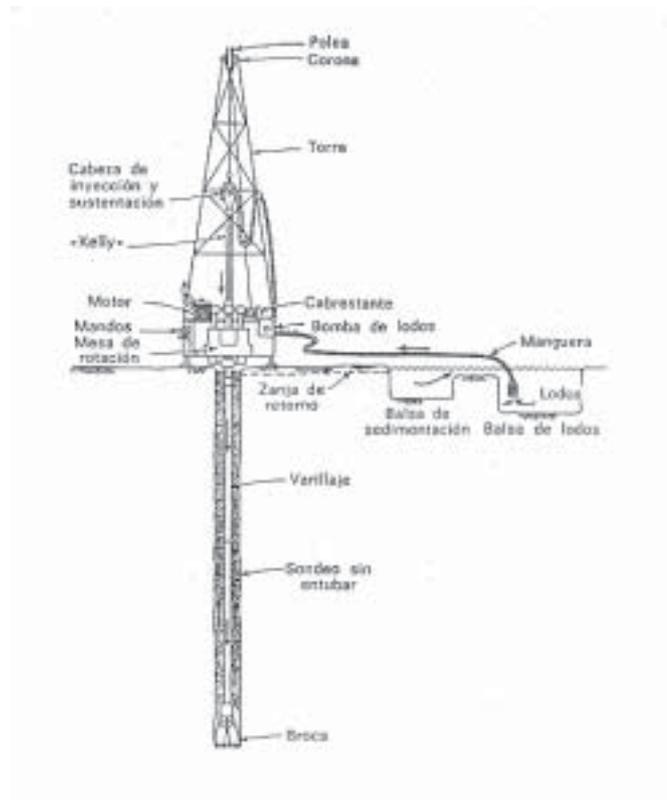


Figura N° 14. Esquema de equipo de rotación con circulación directa de fluidos (DAVIS Y DE WIEST, 1971)

3.5.2.2.3. Rotación con aire

En este método de perforación, el fluido que circula es aire a presión. Este aire se transmite a través de unas aberturas del varillaje y del tricono ascendiendo a gran velocidad por el espacio anular y en su ascenso arrastra los ripios de perforación expulsándolos al exterior.

Es en esencia el mismo procedimiento que la rotación con circulación directa pero cambiando un fluido de perforación en fase líquida por uno en fase gaseosa. El medio auxiliar que debe acompañar a la sonda o máquina perforadora será básicamente un compresor que pueda proporcionar presiones máximas de 14-16 kg/cm² y caudales máximos de 20 a 25 m³/min.

Los trépanos a utilizar son los mismos que se han descrito para otros métodos de rotación siendo su poder de penetración mayor que con el uso de lodos. Este comportamiento está motivado por la mejor limpieza del fondo del pozo que se obtiene con el uso de aire.

Este método se aplica fundamentalmente a suelos consolidados y rellenos heterogéneos.

No es un procedimiento que esté indicado para diámetros de perforación mayores de 220 mm y supone un antecedente de otro método que se describirá a continuación como es la rotopercusión neumática.

3.5.2.2.4. Rotación con barrena helicoidal

La utilización de barrenas helicoidales puede llevarse a cabo también por medios mecánicos.

Como otros métodos de rotación, el útil de corte transmite al terreno los esfuerzos de avance y rotación que le son transmitidos a su vez desde la mesa rotatoria. En este caso, el útil de corte suele ser una barrena helicoidal espiral.

No requiere el uso de aditivos de perforación y los diámetros de perforación disponibles son muy variables, generalmente mayores que los de los métodos de rotación con circulación directa (lodos o aire-lodo).

3.5.2.3. Rotopercusión neumática

Este método de perforación se ha desarrollado a partir de la rotación con aire suponiendo una mejora sobre éste, si por mejora se entiende la obtención de elevados rendimientos de perforación en metros/hora.

Es un método adecuado en principio para su uso en materiales consolidados. En la Comunidad Autónoma del País Vasco su utilización se encuentra bastante extendida, siendo aplicado a zonas de rellenos de escorias que cubren niveles superiores del terreno, para continuarse después la perforación una vez atravesados estos materiales con otros métodos, ya sean mecánicos o ligeros.

Como en la rotación con aire, se requiere el uso de compresores de aire que puedan proporcionar caudales del orden de 20-30 m³/min a presiones de 7-14 kg/cm².

El elemento que provoca el avance es un martillo de fondo. Este, transmite al terreno un doble efecto. De un lado una acción rotatoria y de otro un efecto de percusión de alta frecuencia. La combinación de ambos efectos provoca una fracturación y disgregación de los materiales, que ascienden a la superficie según un ciclo de flujo en circulación directa igual al que se ha explicado para otros métodos.

La perforación puede realizarse en presencia o no de aditivos aunque es recomendable no utilizarlos para impedir la alteración del entorno inmediato del pozo. Los aditivos más frecuentes suelen ser agua y espumantes. Los espumantes provocan un efecto de refrigeración del martillo de fondo y favorecen la ascensión de los ripios o detritus de perforación a la superficie. Sin embargo, su uso se ha de evitar en investigación de suelos contaminados. La acción combinada del aire a presión junto con aditivos (ya sean agua, emulsiones aire-agua) provocará la dispersión de aquellas sustancias potencialmente movilizables siempre y cuando el medio sea lo suficientemente poroso. Este efecto se ha de tener en cuenta tanto en la zona saturada como en la no saturada en las que haya contenidas sustancias contaminantes que no se desea removilizar.

3.5.2.4. Pozos de hinca

Este método sólo permite la construcción de pozos de hasta 51-55 mm de diámetro en formaciones blandas y exentas de gravas y cantos centimétricos. Las profundidades que se pueden alcanzar son del orden de 30 m.

La hinca se hace por medio de una pieza filtrante con puntera de acero cónica o trapezoidal llamada punta coladora (ver Figura N° 15). Por detrás de ella se van añadiendo tramos de PVC o acero de 1 ó 1,5 m de longitud con uniones roscadas que se van golpeando hasta llegar a la profundidad deseada.



Figura N° 15. Hinca mecánica de puntas coladoras (GIBSON Y SINGER, 1976)

En el Cuadro N° 2 se presenta un resumen de las características de los diferentes equipos mecánicos de perforación.

Cuadro o N° 2. Características comparativas de equipos para sondeos mecánicos

	PERCUSIÓN	ROTACIÓN CON CORONAS	ROTACIÓN CON CIRCULACIÓN DIRECTA	ROTACIÓN CON AIRE	ROTACIÓN HELICOIDAL	ROTOPERCUSION HELICOIDAL	POZOS HINCA NEUMÁTICA
Aplicabilidad según tipo de suelo	Todo tipo de suelos en suelos no consolidados	Problemas en suelos poco cohesivos	Problemas en rellenos heterométricos y depósitos inconsolidados	Problemas en suelos plásticos (arcillas)	Suelos relativamente cohesionados. No atraviesa gravas de gran tamaño	Suelos consolidados. Rellenos con grandes bloques	Arenas y gravas finas poco cohesionadas
Profundidad	Sin limitación	Sin limitación	Sin limitación	Sin limitación	≈ 30-40 m	Sin limitación	< 30 m
Ø Perforación (en mm)	200-600	55-116	115-320	115-320	Polivalente. Válido para grandes diámetros	150-380 mm	< 55 mm
Posible instalación de pozos de control	Si	≤ 3"	Si	Si	Si	Si	< 2"
Grado de alteración de muestras	Disgregación mecánica total	Bajo	Disgregación mecánica total	Disgregación mecánica total	Regular a baja	Alto con martillo. Bajo con toma de muestras	No hay toma
Testificación continua de las muestras	Difícil	Buena	Difícil. No siempre se obtienen recuperaciones totales	Difícil. No siempre se obtienen recuperaciones totales	Buena	Deficiente	Nula
Tipo de muestra	Detritus y testigo	Testigo	Detritus y testigo	Detritus	Detritus y testigo	Detritus	No hay muestreo
Registr o del per fil per forado	Bueno	Muy bueno	Bueno-Regular	Bueno-Regular	Regular	Bueno-Regular	Nulo
Medios auxiliares	No necesita	Bomba lodos Aporte de agua	Bomba lodos Aporte de agua	Compresor aire	No necesita	Compresor aire	No necesita
Movilidad, accesibilidad	Media	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
Superficie ocupada	Media	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja
Comentario	Método lento pero polivalente, no requiere aditivos	Método ideal para muestreo continuo. Complementario con otros métodos de rotación	Avance rápido No recomendable la utilización de aditivos bentoníticos	Avance muy rápido. No apto para zonas con contaminantes movilizados	Avance aceptable. Gran movilidad. No permite observaciones piezométricas durante la perforación	No válido para zonas con contaminantes movilizados. Se pueden tomar testigos usando tomamuestras propios de métodos de rotación	Uso poco recomendado Puede ser válido para muestreo de gases

3.5.3. SISTEMAS DE MUESTREO PARA SONDEOS MECÁNICOS

3.5.3.1. Consideraciones generales

Las operaciones de muestreo que se realizan en los sondeos mecánicos utilizan unas herramientas especialmente diseñadas para este cometido. Dependiendo del método de perforación se han desarrollado diferentes herramientas de muestreo, que en algunos casos suponen pequeñas adaptaciones de otras herramientas aplicadas a otro método de perforación.

Una excepción importante, es el sondeo a rotación con corona que por principio obtiene la muestra, en forma de testigo, sin necesidad de utilizar una herramienta especial.

Las muestras pueden obtenerse en forma de testigos o de detritus. Los testigos son trozos completos del «terreno» (suelo, residuos, roca), tienen forma cilíndrica alargada y generalmente el grado de alteración mecánica es bajo o medio. Los detritus, también denominados ripios o “cuttings” son trozos pequeños o muy pequeños del terreno por lo que el grado de alteración mecánica es muy elevado.

En algún caso el método operativo de las herramientas de muestreo necesita utilizar algún aditivo, agua, lodo o aire para llevar a cabo el propio muestreo, lo que constituye un inconveniente.

A continuación se describen brevemente los métodos operativos de las diferentes herramientas de muestreo (sacatestigos, tomamuestras, etc.) que se utilizan en cada método de perforación. Los tomamuestras presentan mejores resultados en general que los sacatestigos, debido a que provocan una alteración menor de los terrenos extraídos. Los métodos más utilizados están asociados a la rotación (extracción de testigo continuo), por lo que las herramientas se han desarrollado principalmente para estos métodos, siendo por tanto descritas en primer lugar.

3.5.3.2. Sistemas de muestreo en los métodos de perforación a rotación

Los métodos de perforación a rotación permiten una elevada calidad de muestreo, sin embargo deberán observarse las siguientes normas:

- Se evitará la utilización de lodos durante las operaciones mecánicas del muestreo. En caso necesario se tendrá en cuenta que los lodos de base bentonítica ciegan las paredes del pozo lo que obliga a desarrollarlo si se

quiere limpiar, con la consiguiente movilidad que se produce en el entorno del mismo. Por el contrario los lodos de base polimérica evitan el desarrollo del pozo, sin embargo, pueden provocar algún tipo de alteración química.

- Las paredes del pozo deberán mantenerse estables, por lo que frecuentemente se tendrán que realizar entubaciones a medida que se avanza en el pozo, hasta la cota de inicio del muestreo. Esto además supondrá evitar la posible contaminación de los suelos atravesados por los inmediatamente superiores, así como la difusión de niveles freáticos atravesados a niveles más profundos.

Las herramientas para la toma de muestras pueden dividirse en sacatestigos y tomamuestras. En general los tomamuestras permiten una calidad de muestreo mayor que los sacatestigos porque o no producen alteración mecánica en la muestra, o ésta es muy baja. Los principales sacatestigos y tomamuestras son:

3.5.3.2.1. Sacatestigos de pared sencilla

Consiste en un tubo de sedimentos de longitud variable, acoplado por su parte superior al varillaje y por su parte inferior se rosca una corona de perforación. Entre ambos se coloca una caja de muelles que evita la caída de la muestra al ascender el varillaje para la recogida de la misma (ver Figura N° 16).

Este tipo de sacatestigos es apropiado para la toma de muestras de medios con elevado grado de consolidación, además el tubo de sedimentos evita la acumulación de detritus en el anular sobre todo si se muestrea por debajo del nivel freático. Sin embargo las recuperaciones que se obtienen en suelos no consolidados es baja.

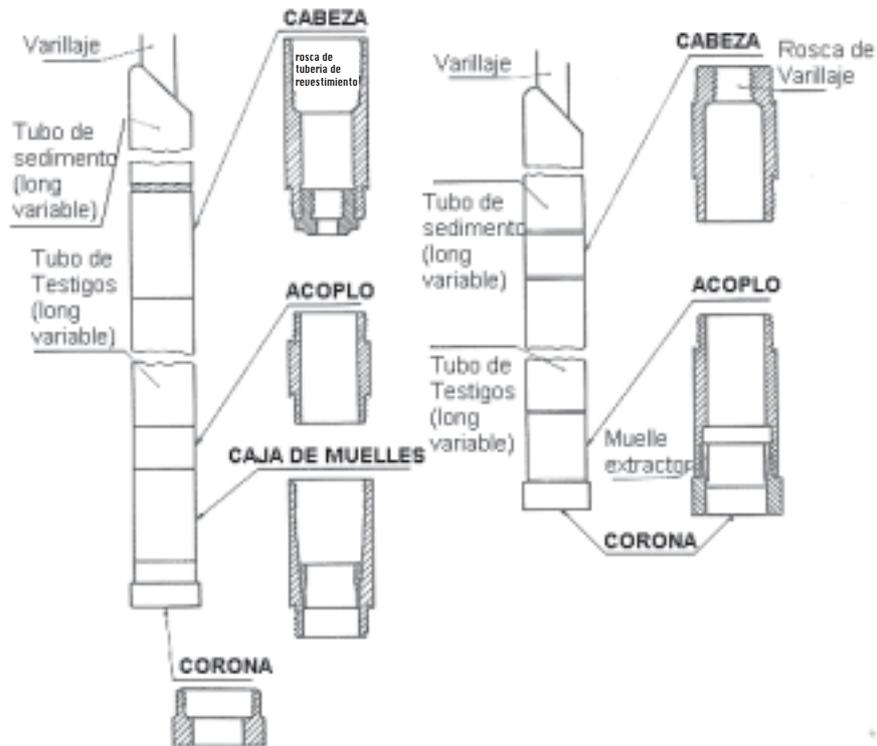


Figura N° 16. Sacatestigos de pared sencilla (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

3.5.3.2.2. Sacatestigos de pared doble

El principio operativo es similar al anterior pero en lugar de tener un tubo posee una doble pared, un tubo interior y otro exterior. La doble disposición de las paredes aísla la muestra que así se mantiene más estable durante su ascenso a superficie (ver Figura N° 17).

Aunque los hay de diferentes clases se suelen usar los denominados giratorios.

Un inconveniente importante de esta herramienta para el muestreo de suelos es que el diámetro mínimo recomendado de la corona del sacatestigos debe ser 101 mm, lo que obliga a realizar el sondeo con diámetros de perforación grandes.

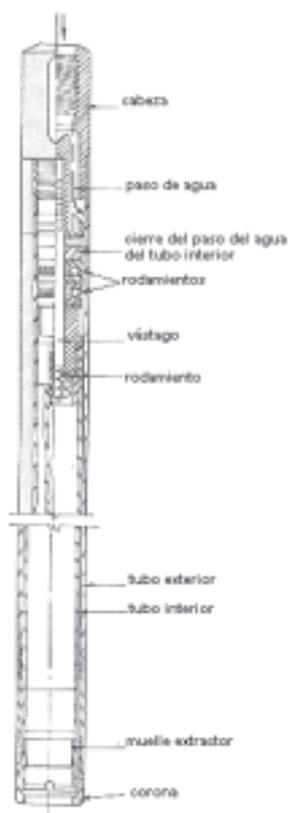


Figura N° 17. Sacatestigos de pared doble (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

3.5.3.2.3. Sacatestigos extraíble con cable

Su funcionamiento es similar al del sacatestigos de pared doble de tipo giratorio, con la particularidad de que el sacatestigos se extrae por el interior del varillaje de perforación por medio de un cable (ver Figura N° 18).

La ventaja principal es que ahorra tiempo en las maniobras de perforación, pero no ofrece grandes ventajas en cuanto a la calidad del muestreo. Adicionalmente perjudica el control hidrogeológico durante el muestreo y no permite el uso de otros tomamuestras.

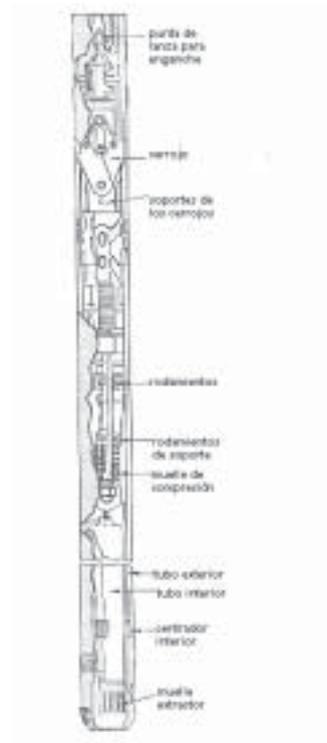


Figura N° 18. Sacatestigos extraíble con cable (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

3.5.3.2.4. Sacatestigos para arenas y gravas

Este tipo de sacatestigos está diseñado especialmente para recuperar muestras en suelos no cohesivos como arenas y gravas. La principal novedad respecto a otros sacatestigos es la aplicación de una cámara de aire comprimido alrededor de la muestra, lo que implica la utilización de aditivos.

Otro inconveniente importante es que se requieren perforaciones de diámetros todavía mayores que en los casos anteriores, por ejemplo obtener una muestra de 60 mm de diámetro requiere que la perforación tenga un diámetro de 150 mm.

3.5.3.2.5. Tomamuestras de pared gruesa

El tomamuestras de pared gruesa se introduce en el terreno por hincas y tiene en su interior un tubo de PVC que hace de recipiente para la toma de la muestra y su posterior transporte (ver Figura N° 19).

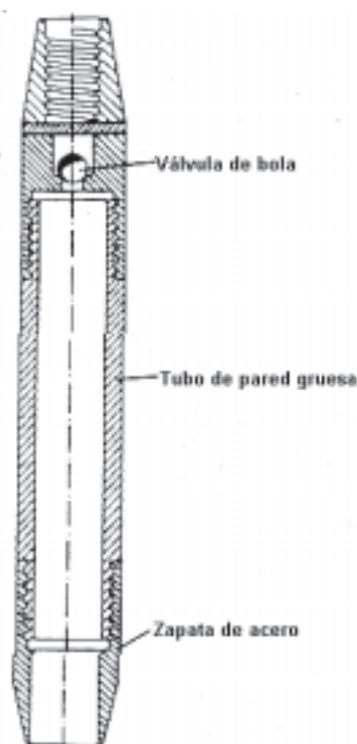


Figura N° 19. Tomamuestras de pared gruesa (I.T.G.E., 1991)

3.5.3.2.6. Tomamuestras Shelby

El tomamuestras Shelby o de pared delgada consiste en un tubo hueco, al que no se acopla ninguna caja de muelles de retención, que se introduce en el terreno por empuje. El propio tomamuestras sirve de recipiente para el traslado de la muestra (ver Figura N° 20).

Permite la obtención de muestras menos alteradas mecánicamente que los tomamuestras de pared gruesa, pero la recuperación de la muestra en suelos poco cohesivos es a menudo problemática.

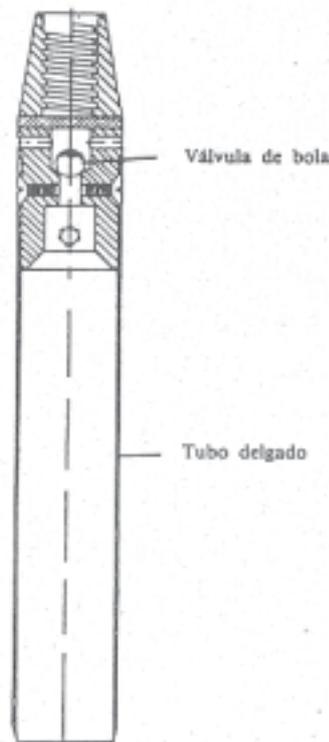


Figura N° 20. Tomamuestras Shelby (I.T.G.E., 1991)

3.5.3.3. Sistemas de muestreo por rotación con barrenas helicoidales

Los sondeos que se realizan por rotación con barrena helicoidal ofrecen procedimientos de muestreo sencillos pero la alteración mecánica de las muestras es elevada. Las herramientas principales son:

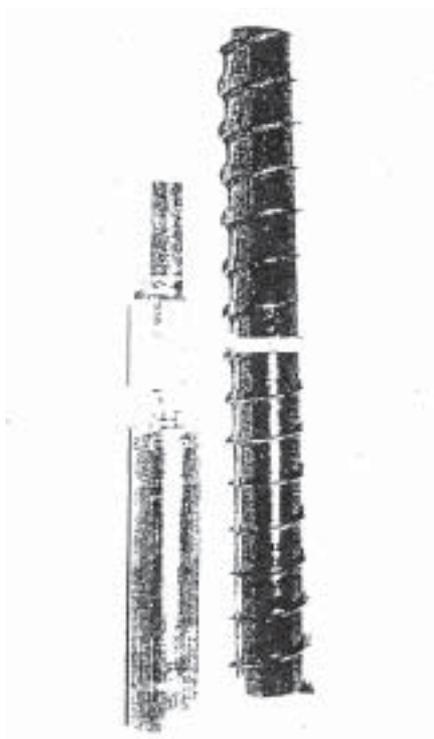
3.5.3.3.1. Barrenas helicoidales huecas

La toma de muestras por este procedimiento, se produce al introducirse la muestra en el interior de la barrena durante la perforación. Aunque se consiguen buenos muestreos en continuo el grado de alteración mecánica de la muestra es alto o medio/alto.

3.5.3.3.2. Tomamuestras cilíndrico

El mecanismo de funcionamiento es similar al anterior con la salvedad de que se acopla al extremo inferior de la barrena un tubo cilíndrico hueco que

aloja la muestra. La introducción del tomamuestras se hace por giro y su recuperación en superficie se hace por giro en sentido contrario. El grado de alteración mecánica de la muestra es menor que con las barrenas helicoidales huecas (ver Figura N° 21).



*Figura N° 21. Tomamuestras cilíndrico para muestreo con barrenas helicoidales
(U.S. BUREAU OF RECLAMATION, 1974)*

3.5.3.4. Sistemas de muestreo en sondeos a percusión

Como el sistema de avance en los sondeos a percusión se produce por golpeo en la formación, la muestra que se obtiene es del tipo detritus. Con el fin de obtener una muestra de suelo inalterada mecánicamente se ha diseñado alguna herramienta especial. Las principales herramientas de muestreo usadas en los sondeos a percusión son:

3.5.3.4.1. Sacatestigos para sondas de percusión

El principio del funcionamiento de esta herramienta es igual al del sacatestigos de pared doble de tipo giratorio con la salvedad de que este sacatestigos penetra por percusión y no lo hace por giro (ver Figura N° 22).

Consiste en un tubo interior hueco introducido en un trépano cilíndrico que avanza por golpeo. Sin embargo el grado de compactación de la muestras es muy elevado y el registro de profundidades difícil por lo que está en desuso. Además, aunque este sistema de muestreo no necesita aditivos frecuentemente se utiliza agua para permitir un mejor avance.

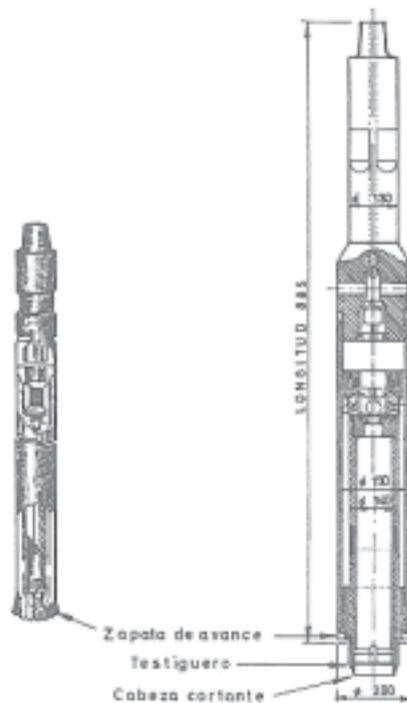


Figura N° 22. Sacatestigos para sondas de percusión (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

3.5.3.4.2. Cucharas o válvulas de limpieza

Las cucharas o válvulas de limpieza son piezas cilíndricas provistas de una válvula en su extremo inferior que permiten la recogida de detritus. Cuando se perfora por debajo del nivel freático estas válvulas permiten la salida del agua eliminando la sobrepresión que ejerce y permitiendo la recogida de la muestra sólida (ver Figura N° 23).

Este tipo de herramientas permiten la recuperación de detritus y tienen utilidad en suelos inconsolidados como por ejemplo arenas.

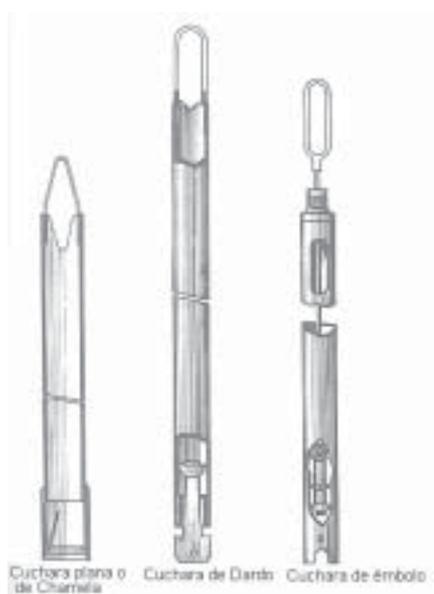


Figura N° 23. Cucharas o válvulas de limpieza (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

Una variante de este tipo de herramientas es la cuchara de pistón (ver Figura N° 24) que tiene acoplada en su extremo inferior una válvula de dardo, lo que permite obtener muestras en suelos pedregosos, como las gravas, siempre y cuando los bloques sean menores de 150-200 mm.

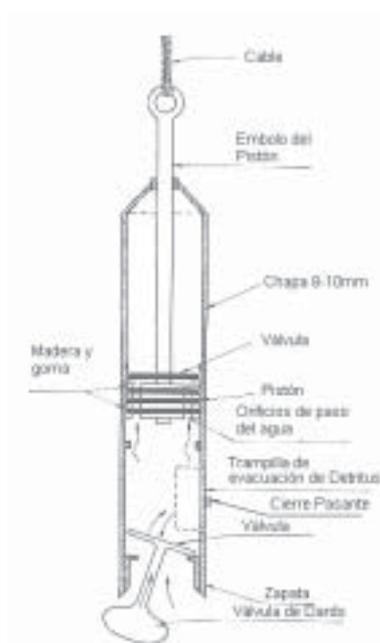


Figura N° 24. Cuchara de pistón (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

3.5.3.5. Sistemas de muestreo en sondeos a rotopercusión neumática

La rotopercusión neumática provoca una importante disgregación de las muestras debido a la necesidad de realizar una circulación con aire para perforar. Además las muestras que se obtienen son del tipo detritus.

Para la obtención de muestras inalteradas mecánicamente se han adaptado las herramientas (sacatestigos y tomamuestras) descritas en los métodos de perforación a rotación. En este caso la recuperación no es en continuo como en la rotación con coronas.

Este sistema de muestreo puede resultar apropiado en suelos y rellenos heterogéneos donde la recuperación continua es muy problemática. La rotopercusión proporciona un buen avance aún atravesando bolos y bloques y la posibilidad de adaptar tomamuestras permite tomar muestras poco alteradas mecánicamente.

En el Cuadro N° 3 se presenta un resumen de las características de las diferentes herramientas de muestreo.

Cuadro N° 3. Características comparativas de las herramientas de muestreo

Método de perforación	Método de muestreo	Tipo de muestra	Compactación de la muestra	Grado de alteración mecánica de la muestra	Utilización de aditivos para el muestreo	Incidencia de la utilización de aditivos en la calidad de muestreo	Observaciones
	Sacatestigos de pared sencilla	Testigo cilíndrico	Baja	Media-Baja	Agua o lodo	Baja-Nula	Los aditivos se usan una vez que el sacatestigo está en el exterior para recuperar la muestra
	Sacatestigos de pared doble	Testigo cilíndrico	Baja	Media-Baja	Ninguno	-	Se recomienda un diámetro de perforación mayor de 101 mm
	Sacatestigos extraíble	Testigo cilíndrico con cable	Baja	Media	Agua o Lodos	Media	Muestreo rápido. No permite la adaptación de tomamuestras para la obtención de muestras inalteradas
ROTACIÓN	Sacatestigos para arenas y gravas	Testigo cilíndrico	Baja-Media	Media	Aire	Media	De poco interés debido al uso de aditivos y a los grandes diámetros requeridos para la toma de muestra
	Tomamuestras de pared gruesa	Testigo cilíndrico	Baja	Baja	Ninguno	-	Excelente calidad de muestreo
ROTACIÓN CON BARRENAS HELICOIDALES	Tomamuestras Shelby	Testigo cilíndrico	Casi nula	Baja	Ninguno	-	Excelente calidad de muestreo. Recuperación problemática en suelos poco cohesivos
	Barrenas helicoidales huecas	Testigo	Media	Alta-Media	Ninguno	-	Muestras mecánicamente alteradas
	Tomamuestras cilíndrico	Testigo cilíndrico	Media	Media-Baja	Ninguno	-	Buena calidad de muestreo
PERCUSIÓN	Sacatestigos a percusión	Testigo cilíndrico	Elevada	Media-Alta	Agua	Baja-Media	Muestras con elevado grado de compactación. El registro de profundidades reales de muestreo es muy difícil
	Cucharas y válvulas	Detritus	-	Muy alta	Agua o ninguno	Baja	Muestras mecánicamente muy alteradas
ROTOPERCUSIÓN NEUMÁTICA	Sacatestigos y tomamuestras de rotación	Testigo cilíndrico	Baja-Media	Baja-Media	Aire Agua o Lodos Ninguno	Media Media -	Los sacatestigos y tomamuestras son los descritos para rotación. Su adaptación requiere un período de operación alto
	Recuperación de rípidos o detritus	Detritus	-	Muy alta	Aire	Baja	Muestras mecánicamente muy alteradas

3.6. TOMA DE MUESTRAS DE SEDIMENTOS

Se entiende por sedimentos aquella materia orgánica y/o mineral situada bajo una capa líquida, la cual puede encontrarse tanto en medios relativamente estáticos (es el caso de lagos, estanques, embalses) como en medios con alta renovación (ríos, arroyos, canales, etc.). Las muestras de sedimentos deben ser recogidas mediante diversos métodos y equipos, en dependencia de la profundidad de la capa líquida, la fracción de sedimento requerida (superficial, subsuperficial), el tipo de muestra (más o menos alterada), los contaminantes presentes y el tipo de sedimento. Para la recolección de estas muestras existen aparatos tanto de tipo manual y directo, como palas, paletas o barrenas, o de tipo indirecto utilizando aparatos controlados remotamente como las dragas tipo Ekman o Ponan.

3.6.1. EQUIPOS DE MUESTREO

Como se ha indicado anteriormente, se podrían dividir los equipos de muestreo de sedimentos en equipos manuales directos e indirectos. Los manuales o directos son similares a los utilizados en los sondeos manuales, siendo posible incluso y en dependencia de las condiciones del terreno utilizar sondas Edelman o Riverside, así como sondas de tipo cuchara, mientras que los indirectos son generalmente tipo draga. Las dragas son comúnmente utilizadas en embalses, lagos, ríos, etc., mientras que las de tipo manual directo se emplean con preferencia en pequeñas corrientes, canales, arroyos, etc. Se describen a continuación los más comúnmente utilizados.

3.6.1.1. Sonda de sedimentos manual

La sonda manual de sedimentos consta de un sacamuestras con una cavidad espatulada y provisto de una aleta o puerta de cierre. Va unido a un vástago con mango acoplado para girar (ver Figura N° 25).

Se emplea generalmente en suelos húmedos y blandos, como fangos, limos, o arenas, típicos de sedimentos en canales, arroyos, etc. El grado de alteración de la muestra es bajo. La longitud total de la sonda es de 1,25 m, siendo posible unir prolongadores de 0,5 m ó 1 m hasta alcanzar profundidades de unos 5 m.



Figura N° 25. Sonda de sedimentos. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.6.1.2. Sonda Beeker

La sonda Beeker es una sonda de tipo pistón aplicada al muestreo de sedimentos moderadamente consolidados, la cual extrae muestras no alteradas de fondos de lagos y ríos, principalmente (ver Figura N° 26) . La sonda tubular lleva en su extremo una cabeza cuyo borde está afilado, y es introducida en el fondo mediante martilleo. El pistón interno impide una excesiva compactación de la muestra y una membrana de retención accionada neumáticamente desde la superficie impide la pérdida de la muestra cuando es alzado el muestreador.

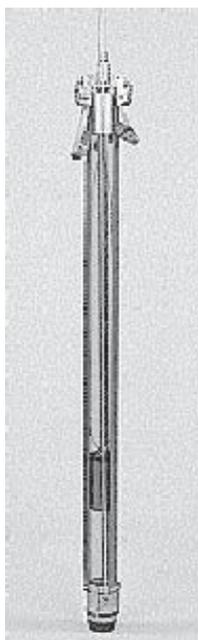


Figura N° 26. Sonda Beeker. Fuente: catálogo Eijelkamp

3.6.1.3. Sonda de caída libre

La sonda de caída libre es similar a la anterior, pero en este caso no es empujada mediante martilleo, sino que se deja caer sobre el fondo por gravedad, por lo que en dependencia del peso y tipo de suelo pueden alcanzar profundidades de entre 30-80 cm, siendo utilizadas normalmente para muestreo de la capa superficial en sedimentos no muy consolidados. La sonda tiene un diámetro de 66 mm y una longitud de 1 m.



Figura N° 27. Sonda de caída libre. Fuente: catálogo Eijkelkamp

3.6.1.4. Draga tipo Ekman

La draga tipo Ekman consta de una draga bivalva que posee un mecanismo de resorte accionable desde la superficie para abrir o cerrar las mandíbulas de la draga (ver Figura N° 28). Se emplea generalmente debido a su pequeño tamaño y peso, para la toma de muestras de capas superficiales en arenas,

fangos o limos moderadamente consolidados. El grado de alteración de la muestra es medio, ya que su escaso peso provoca una baja agitación de los materiales sedimentados. Las dimensiones disponibles son diversas, siendo la estándar de aproximadamente 15 x 15 x 15 cm, volumen de unos 3,5 litros y 4,5 kg de peso (una vez llena puede contener un peso aproximado de 14 kg de sedimento). Otros tamaños mayores de dragas corresponden a volúmenes de aproximadamente 5 y 12 litros.

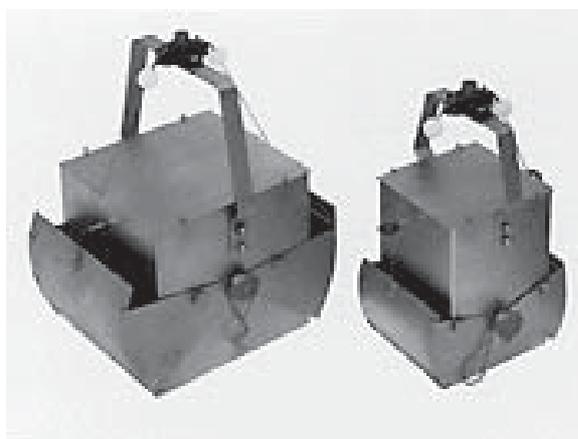


Figura N° 28. Draga Ekman. Fuente: Wildlife Supply Company

3.6.1.5. Draga tipo Ponar

La draga Ponar es similar a la draga Ekman. Consta de una draga bivalva, de mandíbulas lastradas, que posee un mecanismo de resorte o de palanca accionable desde la superficie para abrir o cerrar las mandíbulas de la draga. Se complementa con un cable y una polea con trípode que descuelga la draga en el lugar elegido (ver Figura N° 29). Es empleada generalmente para la toma de muestras de capas superficiales en materiales finos consolidados de ríos, embalses, etc., así como en materiales de grano medio a grueso (arenas, fondos pedregosos). El grado de alteración de la muestra es medio, pues aunque su mayor peso agita los finos no consolidados, no es el objetivo de una muestra tomada mediante este equipo. Las dimensiones disponibles son diversas, siendo la estándar de un volumen aproximado de 8 litros y 20 kg de peso. Existen diversos tamaños y pesos de estas dragas en función del lastre que se le aplique a las mandíbulas.

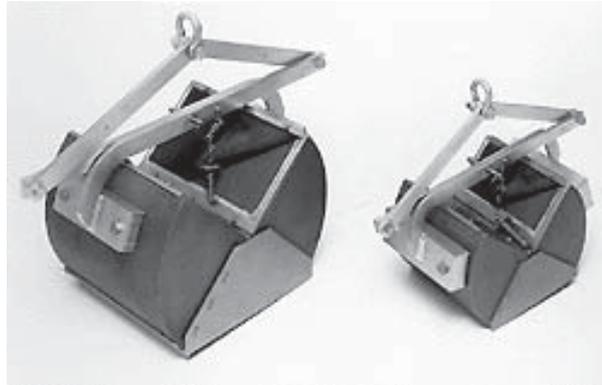


Figura N° 29. Draga Ponar. Fuente: Wildlife Supply Company

3.6.1.6. Muestreadores de sedimentos en suspensión (partículas)

Existen en diferentes diseños y tamaños y se fundamentan en la bajada a la profundidad elegida de una trampa de agua, que se coloca en la dirección del flujo y mediante válvulas abre un habitáculo que permite el paso del agua a su través, cerrando mediante filtros la salida de los sólidos en suspensión. Su volumen es de 1,25 litros.

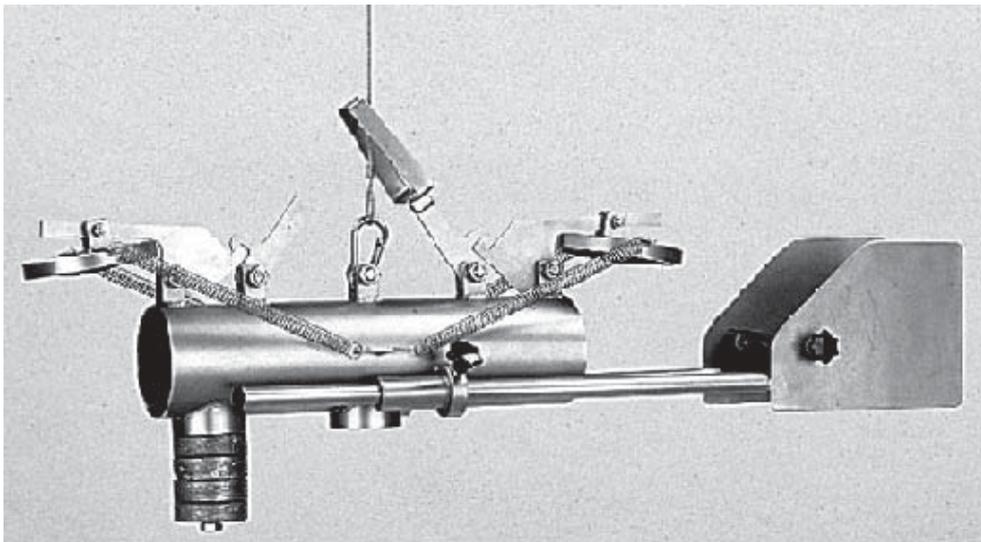


Figura N° 30. Muestreador de sedimentos en suspensión. Fuente: catálogo Eijkelkamp

3.6.2. SISTEMAS DE MUESTREO DE SEDIMENTOS

Los sistemas de muestreo son diferentes en función del tipo de equipo utilizado, pudiendo dividirse esencialmente en los manuales mediante sonda y en muestreos mediante dragas.

3.6.2.1. Muestreo mediante sondas

El muestreo mediante sondas de tipo manual y directo de sedimentos suele realizarse en lugares donde los fondos sedimentados estén a poca profundidad, es decir, en arroyos, canales, etc. La dificultad de obtención de la muestra se incrementa con la profundidad de la capa líquida. Para estos muestreos se deben seguir las recomendaciones y sistemas reflejados en los sistemas de muestreo manuales. La única diferencia estriba en que el muestreador o sonda en punta se introduce mediante empuje, permaneciendo la aleta que cubre el habitáculo de muestreo en posición cerrada, no permitiendo la entrada de sedimentos hasta que se alcanza la profundidad adecuada. En este punto es cuando se realiza un giro con el mango del muestreador, lo cual hace que se abra la aleta o puerta y se rellene del sedimento el habitáculo de muestreo, volviéndose a cerrar a continuación mediante un giro en sentido contrario. Por ello es utilizado en fondos limosos, arenosos y de tipo fangoso, donde este giro es posible en función de la escasa cohesividad del terreno. Se deben mantener las precauciones señaladas en anteriores capítulos acerca de la limpieza de las sondas y de la operación de la toma de muestras. Tras ésta se introducirá la muestra en el recipiente correspondiente, siendo correctamente etiquetado y herméticamente cerrado, del mismo modo que se describió en los sondeos manuales.

3.6.2.2. Muestreo mediante dragas

Es normalmente empleado en muestreos donde la capa de agua es mayor y la profundidad de los sedimentos impide la utilización de los equipos anteriores. Muy indicadas para los muestreos en ríos, lagos, embalses, etc.

Una vez escogido el punto de muestreo, y ya sea el muestreo realizado desde una barca o puente, se debe fijar el cable que sustenta la draga a un soporte, para evitar el riesgo de perderla durante el muestreo. Las puertas superiores de la draga deben quedar libres para poder abrirse según descende la draga y permitir que el agua pase a su través, no almacenándose en el habitáculo. La draga se descenderá cuidadosamente a continuación hasta el fondo sedimentario. En este punto, se accionará desde la superficie el resorte

que cierra las mandíbulas de la draga (normalmente consiste en un botón o en un mensajero). A continuación, se elevará la draga lentamente hasta la superficie (lo que hace que se cierren las puertas superiores de ésta), decantándose con cuidado el agua de la muestra a través de las citadas puertas. Esta decantación es importante, ya que realizarla de forma apresurada puede suponer que se pierda una fracción importante de los finos contenidos en la muestra. La muestra será posteriormente depositada en el correspondiente recipiente de muestreo y se seguirán idénticas prescripciones a las señaladas en anteriores capítulos. Este es el sistema más general de muestreo, que puede presentar diferencias en función del tipo de draga utilizada y de los resortes o material accesorio al equipo de muestreo (ej. dragas más pesadas que requieren de trípodes de sujeción y poleas).

Otros sistemas son menos utilizados y constituyen variantes de estos tipos de equipos de muestreo.

Los equipos auxiliares que serán necesarios para el muestreo de sedimentos serían principalmente los siguientes: recipientes para muestras, etiquetas de identificación, guantes de goma para el trasvase de la muestra, pulverizador con agua destilada y/o acetona para limpiar la herramienta, rollo de papel «tissue» tipo industrial y tejido tipo «cotton», bolsas para recoger los desechos; así como en función del modelo de draga: cables para elevación/bajada de la draga, trípode o soportes para las dragas, poleas, etc.

3.7. MUESTREOS DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS CONTAMINADOS

Se entiende por elementos constructivos contaminados aquellos constitutivos de edificios de procedencia industrial, que en base a las actividades que hayan sido realizadas durante la actividad de la industria, hayan sido susceptibles de ser contaminados, o aquellos elementos estructurales que independientemente de la actividad llevada a cabo en su interior supongan un riesgo para la salud debido a su propia composición.

Los contaminantes más típicos que pueden encontrarse en elementos constructivos son los siguientes:

- Amianto (en suelos, paredes, techos, aislamientos, paneles, instalaciones anti-incendios, etc.).
- Compuestos orgánicos (aceites, alquitranes) y metales, presentes principalmente en superficies.

Las técnicas y equipos de muestreo se encuentran dirigidos principalmente al estado y características físicas del material a muestrear, y de la penetrabilidad intrínseca que posean los contaminantes en los materiales potencialmente afectados.

En la toma de muestras de elementos constructivos no es necesario el empleo de equipos de gran tamaño o complejidad, ya que normalmente el muestreo se reduce a la adhesión o a la separación de una parte del elemento constitutivo sobre un recipiente o una superficie de muestreo.

De este modo, 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 los contaminantes son de tipo penetrante.
- Secado, mediante el secado de una superficie determinada con un pañuelo de papel que posea el agente de extracción que absorba el contaminante.

Las técnicas de muestreo, al tratarse en muchos casos de contaminantes que representan un riesgo para la salud, ya sea por inhalación o por contacto, deben ser acompañadas de las correspondientes medidas de seguridad. Es recomendable la utilización de equipos de muestreo (guantes, etc.) de tipo desechable, los cuales deberán ser gestionados posteriormente de forma adecuada. Deberá impedirse que en el punto de muestreo se pueda producir una posterior difusión de los contaminantes, tapando la zona muestreada, (*Ver Guía Técnica de Seguridad para la Investigación y Recuperación de Suelos Contaminados*).

3.8. TOMA DE MUESTRAS DE MATERIALES Y RESIDUOS ABANDONADOS

Se entiende por materiales y residuos abandonados aquellos materiales que no siendo constitutivos de los edificios, han quedado abandonados en

recintos de tipo industrial tras el cese de la actividad, en la mayoría de los casos sin ningún tipo de instalaciones de seguridad, y que pueden contener sustancias que presenten riesgo significativo para la salud o el medio ambiente.

Esencialmente es posible encontrar los siguientes:

- Materias primas o productos de fabricación, envasados o no.
- Residuos y rechazos de fabricación.

Para este tipo de muestreo se emplearán paletas o espátulas, introduciéndose la muestra en un recipiente de cierre hermético. Es posible también emplear los equipos más simples que se utilizan para el muestreo manual (sondas Edelman, Riverside, etc.). En estos muestreos es importante una exhaustiva descripción de la muestra, así como de su estado físico (sólido, pastoso), situación, volumen aproximado, etc. Se deben extraer las muestras provistos de medidas de seguridad tales como guantes o máscaras, impidiendo el contacto con el contaminante ya sea por inhalación o por contacto. Por supuesto debe utilizarse material fungible o de un solo uso para cada muestra.

Es importante señalar que se deben tomar grandes precauciones en el momento de abrir envases o recipientes de los cuales se ignore la procedencia y el estado, precauciones que serán descritas a fondo en el capítulo relativo a toma de muestras de residuos líquidos (*Ver Guía Técnica de Seguridad para la Investigación y Recuperación de Suelos Contaminados*).

4. POZOS DE CONTROL

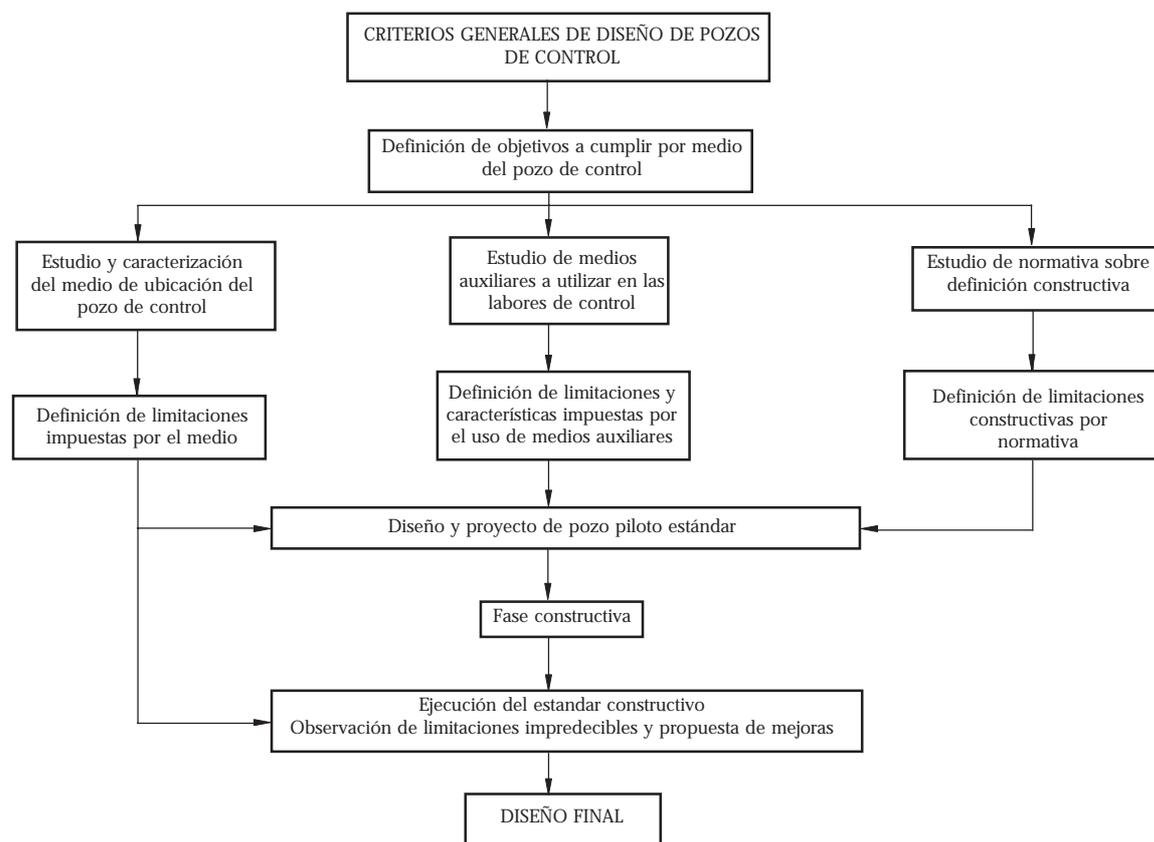
4.1. INTRODUCCIÓN

A menudo, dentro de los objetivos principales de los proyectos de investigación de suelos contaminados se incluyen el conocimiento y la situación de los fluidos presentes en los mismos. La perforación de un sondeo no suministra suficiente información acerca de estos objetivos, ya que tras su ejecución, las condiciones estructurales y físicas del suelo habrán sido alteradas, y por tanto el medio acuoso que pueda estar en contacto con él puede encontrarse en diferentes condiciones que las originales. Es por ello necesario llevar a cabo una serie de operaciones tras la ejecución de un pozo que permitan posteriormente extraer muestras representativas. Los pozos de control permiten obtener una serie de registros puntuales y/o continuos de los parámetros hidráulicos o de calidad físico/química o el muestreo de los fluidos, en cuyo caso funcionan simplemente como un pozo de captación. También es posible enfocar su uso hacia la creación de barreras hidráulicas de contención o hacia la recuperación de espacios contaminados.

En definitiva, los pozos de control son construcciones que pueden llevarse a cabo a partir de una perforación ya realizada o diseñarse especialmente, y que requieren de una serie de operaciones complejas de acondicionamiento del pozo para que el control y el muestreo de los fluidos presentes en el suelo se pueda considerar representativo.

En el Cuadro N° 4 se presentan los criterios generales de diseño de los pozos de control, marcando los estudios y limitaciones que han de tenerse en cuenta para el proyecto del pozo piloto.

Cuadro N° 4. Criterios generales de diseño de los pozos de control



4.2. CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE CONTROL

4.2.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES

Antes de llevar a cabo la construcción de un pozo de control se deben seguir una serie de pautas o procedimientos que permitan alcanzar los objetivos previstos, lo cual exige una preparación y una planificación previa al comienzo de los trabajos.

Los programas de muestreo que incluyan la ejecución e instalación de pozos de control deben ser supervisados y planificados por profesionales experimentados, en función de los múltiples factores que pueden encontrarse relacionados con las actividades que conlleva una investigación de estas características.

En cualquier caso, la planificación, selección y ejecución de un pozo de control debe incluir los siguientes puntos:

- Revisión histórica de toda aquella información geológica, hidrogeológica del emplazamiento o lugar donde se prevea ejecutar el pozo de control. Esta revisión incluirá todo tipo de publicaciones, fotos aéreas, datos de calidad de las aguas, inventario de puntos de aguas en las cercanías, mapas, etc. Las fuentes de información serán diversas: organismos regionales y locales, inventarios o registros de confederaciones hidrográficas, bases de datos de organismos diversos, etc.
- Evaluación e identificación de los problemas de accesibilidad de los equipos de sondeo, ubicación previa de los puntos de sondeo, localización de las fuentes de abastecimiento de aguas o de energía cercanas, preparación de una zona de almacenamiento de equipos.
- Preparación y solicitud de permisos para realizar la investigación.
- Localización de posibles redes de distribución de aguas, electricidad, gas, etc. en el área de perforación, tanto de tipo subterráneo como aéreas, y anotación en mapas de la zona. Este hecho debe ser posteriormente consultado y corroborado sobre el terreno por personal perteneciente al emplazamiento o mediante adquisición de información local.
- Preparación de un Plan de Seguridad específico para el emplazamiento (*Ver Guía Técnica de Seguridad para la Investigación y Recuperación de Suelos Contaminados*).
- Selección del método a emplear de perforación, desarrollo y muestreo

que va a ser empleado.

- Determinación de las especificaciones de diseño del pozo/s de control (ej. tipo de revestimiento, tipo de tubos piezométricos, diámetro de entubado y abertura del filtro, longitud e intervalo previsto de filtro, tipo de filtro anular, etc.).
- Preparación y ubicación de zonas de depósito y almacenamiento de los materiales extraídos de los sondeos, tanto sólidos, como líquidos.
- Preparación de un plan de trabajo durante la ejecución de los sondeos, incluyendo una estimación del tiempo necesario para llevar a cabo todas las actividades relacionadas con éste. Información a los diferentes equipos de trabajo de los cronogramas de actuación previstos.
- Movilización de todas las partes, equipos, y personal implicado en la ejecución del pozo de control para el comienzo de los trabajos.

Tras realizarse las actividades anteriormente descritas, el equipo de sondeos y todo aquel equipamiento accesorio debe ser descontaminado por medio de agua caliente a presión, para extraer cualquier tipo de restos que pudieran encontrarse de anteriores investigaciones. Esta operación deberá ser seguida igualmente entre cada uno de los puntos de perforación que se lleven a cabo, así como tras la finalización de los trabajos.

4.2.2. CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE CONTROL

La construcción del pozo de control se llevará a cabo a través de diferentes fases, siendo todas importantes para la consecución de los objetivos. Estas fases deberán seguirse con rigurosidad, aunque las características de los diferentes emplazamientos impidan la estandarización del diseño y construcción de un pozo de control. En cualquier caso, se describirán estas fases en base a aquellos factores y condicionantes más característicos.

Las fases constructivas de un pozo de control son las siguientes:

- Perforación del pozo. Esta fase ya ha sido descrita en el capítulo 3, donde aparecen reflejados aquellos equipos y métodos más utilizados para esta actividad.
- Limpieza de la perforación tras su ejecución, aunque en ocasiones se realiza simultáneamente a las labores de perforación.
- Entubado, equipamiento (diseño e instalación del filtro de grava, colo-

cación de elementos accesorios) y acabado (cementación, sellado y acabado final) del pozo de control. La entubación es diferente a la realizada durante las labores de perforación para impedir colapsos de las paredes, contaminación cruzada, etc.

4.2.2.1. Limpieza del pozo de control

Las operaciones propias de la perforación del pozo habrán producido cambios de tipo estructural en los suelos inmediatamente adyacentes a la perforación (erosión, compactación), además de que los detritus producto de la perforación se acumularán en el fondo del pozo. Esto hace necesaria la limpieza del pozo antes de proceder a la instalación o entubado y el resto de fases constitutivas del proceso de construcción. Estas labores de limpieza producirán agitación en el entorno del pozo, por lo que deberá ser evitada la movilización de contaminantes debido a esta actividad, en aquellos casos en que exista esta posibilidad.

A continuación se citan el ámbito de aplicación y la metodología de trabajo de las técnicas mecánicas de limpieza de mayor utilización, obviándose las de tipo químico por los efectos medioambientales negativos que producen en el entorno del pozo.

4.2.2.1.1. Limpieza durante la perforación mediante la batería de perforación

Realmente no es considerada una técnica de limpieza, pero debe ser incluida, ya que corresponde con la propia limpieza que realiza la batería de perforación (ej. en perforación mediante coronas y tomamuestras Shelby) en el fondo del sondeo entre cada maniobra ejecutada. De este modo, los detritus van quedando en la parte del tubo tomamuestras más alta, de donde no se escoge muestra. Igualmente, se aconseja por ello el desecho de las partes de terreno en contacto con el muestreador. Esta limpieza es también importante en los casos de aumento del diámetro de perforación por encamisado del sondeo, que genera detritus al introducir el revestimiento, los cuales deben ser posteriormente extraídos tras la bajada de éste, mediante una o más maniobras, hasta que el sondeo alcance de nuevo la profundidad original de perforación.

4.2.2.1.2. Limpieza con válvulas o cucharas

Esta técnica permite la eliminación de detritus de perforación en el trans-

curso de ésta y tras su finalización. Es utilizado con sondas de perforación a percusión y tiene una baja incidencia en el entorno del pozo.

La metodología consiste en la introducción en el pozo de una cuchara provista de una válvula en su extremo inferior, que recoge el detritus y lo retira fuera del pozo.

El principal inconveniente radica en que no limpia las paredes del sondeo, que pueden estar parcialmente cegadas por la acción compactadora del trépano.

4.2.2.1.3. Limpieza mecánica con agua o lodo

Se aplica a perforaciones realizadas con equipos de rotación. Para su ejecución se necesita llenar el pozo de agua o lodo una vez finalizada la perforación. A continuación se lleva a cabo la limpieza del pozo mediante circulación del fluido, para lo cual se bombea fluido limpio al interior del pozo, lo que origina el desplazamiento del que se encuentra cargado de detritus. Este se recoge posteriormente en una balsa de decantación y se reintroduce una vez limpio.

Debe tenerse en cuenta que este método de limpieza no es recomendable en zonas fracturadas o de extrema permeabilidad, en las que se producen pérdidas totales de circulación.

4.2.2.1.4. Limpieza con aire a alta presión

Se aplica cuando la perforación se ha llevado a cabo por métodos de rotación. La limpieza del pozo se lleva a cabo mediante la circulación de aire a presión lo que provoca una importante movilización en el entorno del pozo, motivo por el que su uso está restringido a determinados casos como por ejemplo en zonas de pérdidas totales de circulación.

4.2.2.2. Entubado, equipamiento y acabado del pozo de control

4.2.2.2.1. Colocación y características del entubado

Una vez finalizada la limpieza del sondeo debe colocarse la tubería de revestimiento del pozo para mantener la estabilidad permanente de las paredes del mismo, además de constituirse en el posterior vehículo de observación y toma de muestras.

Aunque las técnicas de entubación tienen algunas diferencias en función de cual haya sido el método de perforación del pozo, en general los procesos a seguir son similares.

En ocasiones durante la ejecución de la perforación en seco se ha ido colocando una entubación temporal, para impedir el derrumbe de las paredes del pozo debido a la falta de cohesión de las formaciones atravesadas, o para prevenir posible contaminación de capas adyacentes. Cuando a continuación se va a realizar una entubación permanente se debe proceder a la retracción o retirada de la entubación temporal. El proceso de retracción se llevará a cabo de la siguiente manera:

- Si el pozo se va a equipar con macizo o filtro de grava, la retracción de la camisa (o entubación simultánea) no comenzará hasta que se inicie la fase de engravillado. Tras el engravillado de la zona más profunda del sondeo, se irá extrayendo el revestimiento o camisa lentamente para no producir la subida simultánea de la tubería piezométrica. La extracción de cada tramo de camisa producirá un asentamiento de la grava en el fondo, por lo que esta operación de engravillado se deberá realizar simultáneamente a la retracción de la camisa hasta que el macizo de grava suba hasta la profundidad requerida.
- Si no se va a equipar un macizo de grava en el anular del pozo, la retracción de la camisa comenzará tan pronto como la columna de perforación llegue al fondo del sondeo.

El proceso del entubado se resume generalmente en los siguientes pasos característicos:

- Elección de los tramos de tubería filtro o ciega y diseño de la columna del entubado acorde con las características del medio y los objetivos posteriores del pozo de control.
- Limpieza de los segmentos de tubería filtro y ciega con agua libre de contaminación.
- Acople de las herramientas del segmento de fondo de la entubación o zapata de la misma e introducción en el pozo sujetando su extremo superior con una mordaza.
- Colocación del tubo en posición vertical para el enganche o enrosque del siguiente segmento. Las roscas no deben ser forzadas en ningún momento.
- Enganche con el extremo inferior de la siguiente sarta de tubos y así sucesivamente hasta completar toda la columna en el interior del pozo.

Fuera de esta descripción general quedan los métodos especiales de entubación como la entubación de los pozos de hinca. En este método de perforación, la propia entubación definitiva va penetrando en el terreno según avanza el proceso de perforación.

Las características del entubado también constituirán uno de los factores a tener en cuenta, debiendo elegirse aquel más apropiado para los objetivos y condicionantes de la investigación. Entre las principales características se encuentran las siguientes:

- **Material constituyente**

Los tubos de los pozos de control han sido tradicionalmente de tipo metálico, aunque progresivamente se ha ido abandonando el uso de este material debido a que con el paso del tiempo las condiciones del medio pueden provocar su corrosión y deterioro. Actualmente, los materiales más utilizados para los tubos de pozos de control se han dirigido hacia el acero inoxidable, PVC, U-PVC y PEAD (polietileno), e incluso se han desarrollado en Teflón y fibra de vidrio. La elección del material constitutivo del entubado ha de realizarse en base a varios factores como coste económico, idoneidad de los materiales según las características del medio de instalación, normas de fabricación, método de instalación, diámetro del pozo, uso futuro, tipo de contaminación presente, etc. En el Cuadro N° 5 adjunto se describen las características comparativas de diferentes materiales que componen los tubos piezométricos.

Cuadro N° 5. Características comparativas de diferentes materiales que componen los tubos piezométricos

T ipo	V entajas	Desventajas
PVC (Cloruro de polivinilo)	<ul style="list-style-type: none"> - Ligero - Excelente resistencia química frente álcalis débiles, alcoholes, hidrocarburos alifáticos y aceites - Buena resistencia química frente ácidos minerales fuertes, ácidos oxidantes concentrados y álcalis fuertes - Fácil de obtener - Bajo precio en comparación con el acero inoxidable y el teflón 	<ul style="list-style-type: none"> - Más débil, menos rígido y más sensible a cambios de temperatura que los materiales metálicos. - Puede absorber alguno de los constituyentes del agua subterránea - Puede reaccionar con el agua subterránea y liberar algunos constituyentes - Pobre resistencia química a ketones, ésteres e hidrocarburos aromáticos
Polipropileno	<ul style="list-style-type: none"> - Ligero - Excelente resistencia química a ácidos minerales - De buena a excelente resistencia química frente a álcalis, alcoholes, ketones y ésteres - Buena resistencia química a los aceites - Resistencia química media a ácidos oxidantes concentrados, hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos - Bajo precio en comparación con el acero inoxidable y el teflón 	<ul style="list-style-type: none"> - Más débil, menos rígido y más sensible a cambios de temperatura que los materiales metálicos - Puede reaccionar con el agua subterránea y liberar algunos constituyentes - Pobre manejabilidad y difícilmente ranurable
Teflón	<ul style="list-style-type: none"> - Ligero - Muy resistente a los golpes - Notable resistencia a ataques químicos, insoluble en sustancias orgánicas excepto en unos pocos disolventes fluorados 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja resistencia a la tracción y al deterioro comparado con otros plásticos - Caro en relación con otros plásticos y el acero inoxidable
Kynar	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor dureza y resistencia al agua que el teflón - Resistencia a la mayoría de disolventes químicos - Más barato que el teflón 	<ul style="list-style-type: none"> - No es fácil de obtener - Pobre resistencia química a ketones y acetona
Acero	<ul style="list-style-type: none"> - Duro y rígido. Su sensibilidad a cambios de temperatura no suele suponer un problema - Fácil de obtener - Bajo precio en relación al acero inoxidable y el teflón 	<ul style="list-style-type: none"> - Más pesado que los plásticos - Puede reaccionar con el agua subterránea y liberar algunos constituyentes - No es tan resistentes químicamente como el acero inoxidable
Acero inoxidable	<ul style="list-style-type: none"> - Muy duro en un amplio rango de temperaturas - Excelente resistencia a la corrosión y a la oxidación - Fácil de obtener - Precio moderado para el entubado 	<ul style="list-style-type: none"> - Más pesado que los plásticos - Puede corroerse y liberar algo de cromo en aguas muy ácidas - Puede actuar como catalizador en algunas reacciones orgánicas - Las rejillas son mucho más caras que las de plástico

- **Ranuración del tubo-filtro**

Los filtros, cuya ranuración se elige en función del filtro de grava y granulometría del suelo, se encuentran en ranuraciones desde 0,2 a 6 mm, debiendo venir ranurados mecánicamente de fábrica. Este hecho permite conocer exactamente el área libre para cada diámetro nominal. Además, se evita el uso en obra de herramientas cortantes o punzantes para llevar a cabo las ranuraciones.

- **Diámetro Nominal**

La elección del Diámetro Nominal de instalación de tuberías y filtros ha de hacerse con arreglo a los siguientes factores:

- Diámetro de perforación.
- Tipo de operaciones a realizar en el interior del pozo de control.
- Profundidad del sondeo.

Como principio de trabajo, sólo en casos excepcionales o por modificaciones debidas a imposibilidades técnicas el diámetro de entubación se elegirá en función del diámetro de perforación. Resulta más apropiado la elección del diámetro de perforación después de definir cuales van a ser los objetivos a cubrir por el pozo de control y que características de equipamiento permitirán la obtención de dichos objetivos. Con la profundidad del sondeo aumenta además la tensión de carga de los tubos que produce la sarta del entubado. Los diámetros de los tubos piezométricos dependen de los fabricantes y marcas, aunque existen estándares de fabricación tales como DN-50, DN-80, etc. Deben consultarse estas medidas antes de la adquisición de los tubos piezométricos, ya que puede diferir el diámetro nominal de las medidas exactas de diámetro externo del tubo (OD) y de diámetro interno (ID), que será el que nos defina los equipos de muestreo o medición que después se podrán introducir en el pozo de control.

- **Tipo de conexión entre tubos**

Existen multitud de tipos de conexión entre los segmentos del entubado (abridados, abotargados, roscados, etc.), siendo los más utilizados los tubos roscados. El tipo de conexión debe proporcionar una buena impermeabilidad de la unión, una suficiente resistencia a la tracción y asegurar la verticalidad del sondeo. En cualquier caso, las uniones no deben ser soldadas o pegadas, evitándose en todo momento el uso de agentes químicos que pudieran influir en posteriores determinaciones.

Aunque la elección de las características del entubado parezca complicada, una gran parte de éstas vienen dadas conjuntamente en base a los objetivos del sondeo, y otras se encuentran ajustadas desde su fabricación a las características requeridas para un pozo de control, por lo que es importante que el entubado cumpla las normas DIN correspondientes.

A continuación se proporcionan algunas recomendaciones de cara a conseguir una estandarización de equipamientos del mayor grado posible:

- La realización de desarrollos por sobrebombeo o ensayos de bombeo requiere normalmente el uso de bombas de al menos 4", por lo que se recomienda el equipamiento de tuberías de 5", pues aunque existen actualmente bombas sumergibles de reducido diámetro, es posible que en función del caudal que sea necesario desarrollar y de la profundidad del pozo resulten finalmente insuficientes para realizar las actividades antes mencionadas.
- La introducción de tomamuestras, sondas multiparamétricas, etc., requiere un diámetro de entubación de al menos 2".
- Los diámetros mayores de tuberías proporcionan una mayor resistencia a ésta frente a la tensión de carga y a la presión lateral producida por el filtro de grava y el propio acuífero (colapsamiento), ya que aumenta el espesor del entubado, pudiendo utilizarse en sondeos de mayor profundidad.

Como recomendación general puede concluirse que un pozo de control entubado con pequeños diámetros ofrecerá siempre menores posibilidades de estudio y mayores dificultades de operación, aunque los costes asociados a la perforación y la propia entubación sean menores que con mayores diámetros.

4.2.2.2. Equipamiento del pozo de control

Tras la introducción en el hueco de la perforación del entubado, se deberá proceder al equipamiento del pozo, lo que incluirá todos aquellos elementos auxiliares al entubado que proporcionarán al pozo de control las características finales de éste, para que pueda ser posteriormente utilizado según los objetivos de la investigación. Estos elementos auxiliares son de muy diversa índole y aplicación, aunque se describirán a continuación los más comúnmente empleados en esta fase. Entre ellos se deben mencionar:

- **Tapones de fondo**

La función de los tapones de fondo es el cierre inferior de las columnas de

entubación contribuyendo a que una vez terminado el pozo de control, todos los flujos que en él convergen sean horizontales. Asimismo, evita la entrada de finos, lodos, etc., por el fondo del pozo. Pueden ser preferentemente roscados (de PVC, Polipropileno, HDPE) o de madera no roscados. Se colocarán antes de la bajada del entubado en el tramo que se vaya a instalar en el fondo de la perforación.

- **Centrador es**

Los centradores confieren verticalidad y centran la columna de entubación en el interior del pozo. Su instalación facilita además las labores de cementación y engravillado. Pueden ser de PVC o acero y su colocación se recomienda cada 10 m de columna de entubación evitando fijarlos sobre tramos filtrantes. En pozos de control de poca profundidad su uso no es frecuente.

- **Filtro de grava**

El filtro de grava será colocado en el espacio anular entre el entubado y las paredes de perforación del pozo de control, tras su ejecución. Como precaución durante la colocación del filtro, las entubaciones existentes en las paredes del pozo han de ser retraídas simultáneamente al depósito de la grava. Del mismo modo, en pozos situados en suelos contaminados, resulta prioritario no potenciar la migración de sustancias contaminantes. Por tanto, se evitará el uso de técnicas que impliquen aplicación de flujos ya sea de lodos, agua o aire a presión elevada. Por otra parte, la segregación de la grava en caso de un vertido desde superficie por gravedad será mayor si toda la grava se vierte de una vez. Una dosificación de vertido de larga duración hace que las segregaciones sean de menor importancia.

Los filtros de grava presentan una serie de ventajas y desventajas que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar cualquier pozo. Sin embargo, en pozos de control se recomienda su instalación de forma sistemática, usándose grava silíceo lavada y calibrada con el mayor grado de redondez posible.

Las principales ventajas que presenta la instalación de macizos de grava en pozos de control son las siguientes:

- Aumento de la permeabilidad en todo el espacio anular rellenado por el macizo de grava.
- Produce un efecto de filtrado sobre los fluidos que acceden al pozo de control.
- Proporciona estabilidad a las paredes de la perforación.
- Su instalación es además imprescindible en acuíferos no consolidados

arenosos ya que si no se instalara acabaría cegando el pozo debido al acceso de arenas al interior del mismo.

Los principales inconvenientes que presenta la instalación de macizos de grava en pozos de control son las siguientes:

- Mayor costo de la perforación.
- Costo del propio material y su transporte.

La selección del filtro se considera esencial a la hora de la construcción de éste, y debe ser acorde con las características del medio circundante.

Como ocurre en otras fases constructivas de un pozo de control, la heterogeneidad de las situaciones a la hora de diseñar un filtro de grava, hace imposible la estandarización del mismo.

Por tanto, cada caso conlleva un proceso de selección que podremos subdividir en 3 fases:

- **Selección del tipo de material a utilizar** .

Este material debe cumplir las siguientes premisas:

- Mineralogía silíceas con un contenido en $\text{SiO}_2 > 97\%$ y ausencia de partículas calcáreas. (proporciona estabilidad ante posibles contaminantes)
- Buena redondez y esfericidad.
- Buen grado de selección. Uniformidad.
- Buena limpieza. Ausencia de finos.

- **Selección granulométrica.** Los métodos de selección de granulometría de un filtro de grava se basan en que el filtro retenga un elevado porcentaje de partículas del suelo que potencialmente pueden acceder al pozo de control. Una buena selección granulométrica se basa por tanto en análisis granulométricos de la zona del pozo donde se van a instalar los filtros, y condicionará la ranuración de las rejillas o tuberías filtrantes que se coloquen.

- **Selección de espesor del filtro o de grava.** Puesto que la teoría de diseño de la gradación de los filtros de grava se basa exclusivamente en la retención mecánica de las partículas del suelo, el espesor de filtro teóri-

camente necesario deberá ser sólo 2 ó 3 veces el tamaño de grano. En la práctica se ha demostrado que 1 cm. de filtro bien seleccionado consigue la retención perseguida sea cual sea la velocidad de flujo a través de él.

- **Reducciones**

En principio, no se contempla la ejecución de pozos de control telescópicos, pero si por cualquier causa extraordinaria se equipa algún pozo de control telescópico, el paso entre 2 diferentes diámetros de tubería se hace por medio de reducciones. Se recomienda que las reducciones sean de PVC o HDPE con uniones roscadas. Estas tuberías de tipo telescópico son más aplicables a estudios realizados en vertederos o en lugares de relleno no compactado, ante la posterior compactación que puede sufrir el suelo.

4.2.2.3. Acabado del pozo de control

El acabado del pozo de control se denomina a todas aquellas operaciones que permitirán que tras su ejecución se encuentre en perfectas condiciones de uso y preparado para cumplir con los objetivos bajo los que fue diseñado.

Las operaciones normalmente necesarias para llevar a cabo estos objetivos, además de proporcionar al pozo de control seguridad ante agentes externos, son las siguientes:

- **Cementación y sellado**

Se define la cementación como la colocación y el fraguado de suspensiones de cemento en determinadas zonas de un pozo y con la principal finalidad de unir la tubería ciega de un pozo con las paredes del sondeo rellenando el espacio anular y otros espacios existentes.

Mediante el relleno se consigue:

- Aislar las zonas no productoras del pozo. Con ello se evita el paso a través del espacio anular de las diversas formas de contaminación por fluidos superficiales. Adicionalmente, se evitan los desprendimientos del terreno hacia las zonas de admisión.
- Evitar siempre que interese la comunicación entre acuíferos. Bien para sellar acuíferos contaminados que puedan ejercer inyección «in ascensum» o «in descensum» en acuíferos no contaminados, o bien para impedir la

conexión sistemática entre acuíferos de potencial hidráulico, características hidroquímicas o nivel de contaminación diferentes.

- Material de inyección. Mezcla y dosificación

Para la realización de cementaciones, se usan suspensiones de cemento o suspensiones de cemento-bentonita, ambas en agua. En condiciones excepcionales, se utilizan áridos como arena para lograr el cierre de fracturas sin que haya una pérdida excesiva del fluido.

Las suspensiones de cemento-bentonita son más estables que las de cemento y aún cuando la adición de bentonita disminuye algo la resistencia, reduce la retracción y favorece la manejabilidad de la suspensión, por lo que resulta recomendable el uso de este tipo de suspensiones.

La dosificación de la suspensión es muy variable aunque como regla general se admite como objetivo la consecución de densidades de suspensión en torno a $1,9 \text{ g/cm}^3$. También habrá que tener en cuenta la adición de aceleradores y retardadores del fraguado (Cl_2 , Ca, Cl Na, lignosulfatos, etc.).

No siempre se puede determinar con exactitud el volumen necesario de mezcla. Porque con frecuencia irregularidades y pérdidas en el anular requieren que el vertido de volúmenes sea 2 y 3 veces superiores al volumen teórico.

Las aguas que se utilicen para las mezclas deben corresponder con una calidad similar a la de aguas potables.

- Procedimientos de cementación

Antes de acometer la cementación, habrá que tener en cuenta que ésta se asienta casi siempre sobre espesores anulares rellenos de grava silíceas y que a veces, un espesor reducido de anular donde se ha colocado un filtro o macizo de grava, se encuentra aislado por zonas cementadas según el proyecto de cementación. Debido a ello, las zonas de unión entre el macizo de grava y la cementación se sellarán según la secuencia de capas que se indica a continuación.

Por último, y entre la zona cementada y el colchón de arena se coloca un sello de bentonita granular (pellets) también de espesor variable. La bentonita es un material expansible y se emplea también para el aislamiento de zonas que se pretende no estén en contacto con la tubería filtro. No se empleará bentonita en polvo, ante la posibilidad de que pueda flotar en caso de existir agua en el espacio anular y aislar zonas no deseadas. Los sellos de bentonita deberán tener un espesor mínimo de 0,5 m.

Aunque la cementación de pozos de control medioambiental, puede llevarse a cabo por diferentes procesos, el método de cementación recomendado es el de inyección con tubería a través del espacio anular, en el cual la cementación se hace a través de una tubería de inyección de 1,5 ó 2" de diámetro. El extremo inferior de la tubería de inyección se coloca a 30-40 cm del límite inferior de la zona a cementar y se procede a cementar con lo que el anular sufrirá un relleno en sentido ascendente. Siempre se debe cerrar la parte superior del entubado o boca con un tapón roscado para evitar cualquier posible entrada de los materiales sellantes en el interior de la tubería.

La inyección se puede producir por gravedad pero se prefiere el bombeo que facilita cementaciones más rápidas.

- **Acabado final**

El acabado final de un pozo de control determinará el aspecto que va a presentar y será importante en cuanto que permitirá aumentar la operatividad de éste, ante posibles daños que pudiera sufrir en el futuro.

Existen diversos elementos de cierre de boca de los pozos de control. En función del tipo de acabado que se de al pozo podrá elegirse entre tapas de cierre, tubos de cierre, arquetas y registros.

- Tapas de cierre

Deberán estar provistas de algún mecanismo de apertura y cierre mediante llaves para impedir el acceso al interior del pozo de control de personas ajenas a su utilización. En cualquier caso serán roscadas o abridadas para su unión al tramo superior de la columna de entubación.

- Tubos de cierre

Si la boca del pozo de control se coloca elevada sobre el nivel del suelo, se recomienda que el metro superior de la columna de entubación sea de acero constituyendo un tubo de cierre.

El uso de acero en lugar de PVC se justifica por su mayor robustez, para dotar al cierre del pozo de cierto grado de protección frente a golpes accidentales o actos vandálicos.

- Arquetas y registros

En caso de que la boca del pozo de control se sitúe a nivel de la superficie del suelo o por encima de ésta, el pozo estará provisto de una arqueta o registro de cierre de acero, fundición, polietileno, hormigón, poliéster prensa-

do, etc. La arqueta o registro se embutirá sobre una solera de hormigón y tendrá un ancho de luz suficiente para permitir la apertura y cierre de la tapa de cierre del pozo, y para permitir la entrada en el pozo de bombas, tomamuestras y cuantos elementos auxiliares sean necesarios. A ser posible, las arquetas serán sifónicas.

Si el pozo de control se encuentra en una zona de fácil acceso para maquinaria pesada, la arqueta o registro se deberá elegir con una capacidad de carga a rotura suficiente y será debidamente señalizada.

En los casos de cerrarse el pozo por debajo de la rasante, se utilizarán para su cierre una tapa roscada de PVC o acero y se alojará en una pequeña arqueta de hormigón cúbica o rectangular cerrada en superficie por un registro de fundición, acero, hormigón o plástico con cierre sifónico, que debe ser capaz de soportar cargas procedentes del tráfico de vehículos pesados.

4.2.3. TIPOS DE POZOS DE CONTROL

Se ha descrito hasta el momento la construcción de un típico pozo de control, aunque el diseño final de éste pueda diferir en función de los objetivos de su construcción y de las operaciones que vayan a ser realizadas posteriormente en éste. De este modo es posible describir diversos tipos de pozos de control en función de sus características.

4.2.3.1. Pozo de control tipo

Los pozos de control tipo presentan la posibilidad de diseñar la profundidad de los rangos o intervalos de control y seguimiento que se desea, pero una vez elegido este intervalo y completada la construcción del pozo no será posible realizar determinaciones a otras profundidades. Este hecho puede suponer un problema si la instalación del tubo-filtro piezométrico se ha realizado en un intervalo reducido, que posteriormente resulte insuficiente para medir las fluctuaciones estacionales del freático o incluso suponga en periodos prolongados de sequía la desaparición del agua en el pozo de control. En cualquier caso, la instalación y diseño del filtro piezométrico debe realizarse de forma que estos posibles cambios no inhabiliten el posterior uso del pozo de control, mediante el conocimiento de aquellos factores que pueden afectar al área donde va a ser instalado.

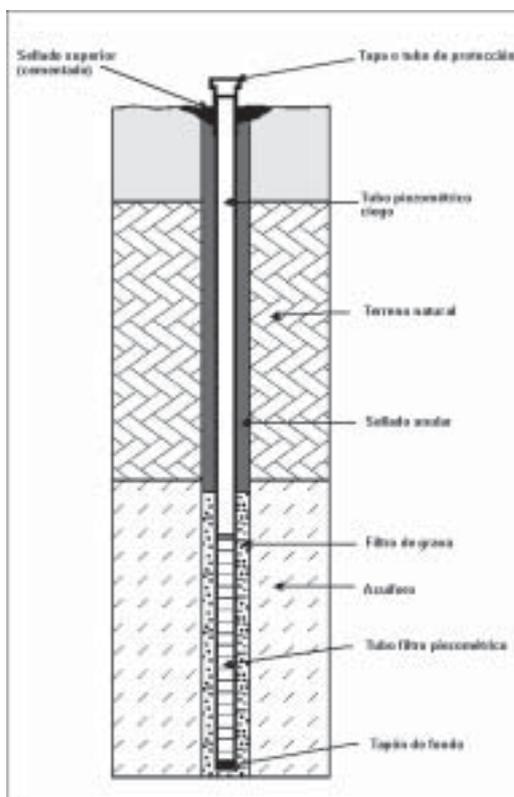


Figura Nº 31. Pozo de control tipo.

Un caso especial podrían constituirlo aquellos pozos de control contruidos para la el seguimiento de aguas contaminadas en las cuales el contaminante pueda formar una fase diferenciada con el agua (ej. aguas contaminadas por hidrocarburos). En este caso, será necesario instalar el sellado, filtros de grava e intervalos de filtro de entubación en base a la presencia de fase libre sobre la lámina de agua.

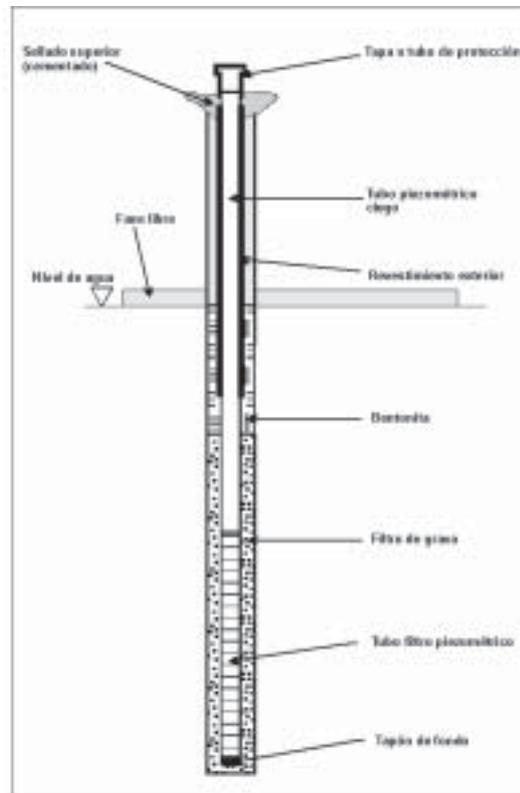


Figura N° 32. Pozo de control para aguas subterráneas con fase libre.

4.2.3.2. Grupo de pozos de control

Cuando no es posible o se considera inadecuada la información que puede obtenerse de un único pozo de control en una zona, es posible llevar a cabo la instalación o construcción de pozos de control de mayor complejidad. En estos pozos es posible realizar la determinación y caracterización de diferentes parámetros de calidad de las aguas, a diferentes profundidades o en distintas capas del terreno, de modo separativo e independiente.

Los diseños de pozos de control de tipo más complejo comúnmente utilizados pueden centrarse en los siguientes:

- **Racimo de Pozos de Control**

Este tipo de medición múltiple se corresponde en realidad con la construcción y diseño de pozos simples pero situados en un área reducida, en los cuales el intervalo de filtro ha sido situado a diferentes profundidades en cada

uno de ellos, siendo el resto del tubo piezométrico de tipo ciego. De este modo es posible el control y seguimiento de los parámetros objetivo y la realización de todos los ensayos requeridos, en una zona de influencia que puede considerarse única a efectos del estudio, pero a diferentes profundidades.

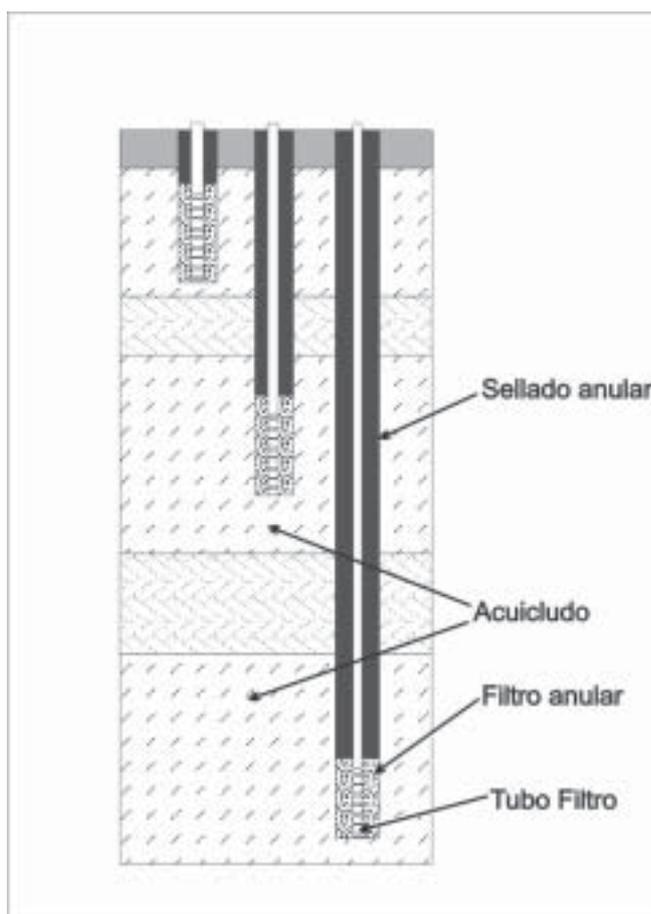


Figura Nº 33. Racimo de Pozos de control.

- **Pozos de control anidados**

En este caso los diferentes tubos piezométricos se instalarán en el mismo hueco de perforación, por lo cual será necesario sellar convenientemente mediante bentonita el espacio anular entre los diferentes intervalos de filtro de cada uno de ellos. Este sistema tiene la desventaja de que es necesario realizar una perforación de gran diámetro, por lo que los costes aumentan en gran medida, además de dificultar todas las operaciones relacionadas con la

perforación. Del mismo modo, el diseño de los diferentes intervalos de filtro es difícil, y en especial el posterior engravillado, cementado y sellado de los intervalos requeridos, ya que la separación debe ser realizada a las profundidades correctas para evitar la conexión posterior de distintos niveles acuíferos.

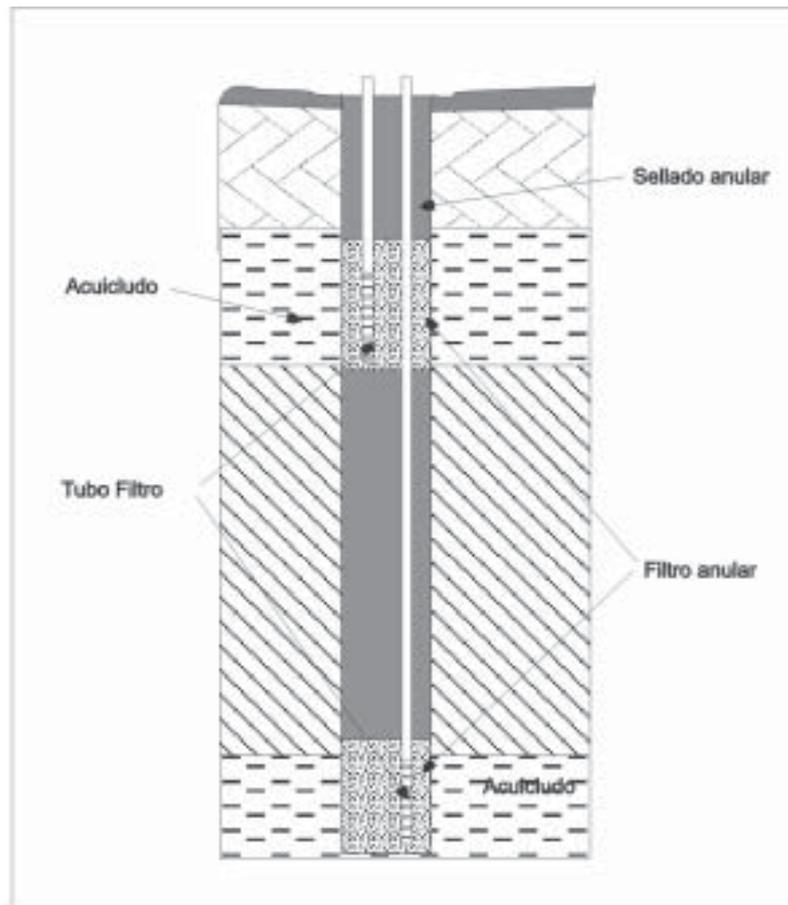


Figura N° 34. Pozos de control anidados.

4.2.3.3. Pozo de control individual con muestreadores a diferentes profundidades

Estos pozos de control representan un tipo especial de diseño de pozos, en el cual se instalan en la parte interna del tubo piezométrico una serie de equipos muestreadores en línea y a diferentes profundidades, los cuales extraen muestras independientes y únicamente de la zona donde están situados, encontrándose entre ellos los sellos de bentonita anulares. Cada zona de

muestreo se compone (en el interior del tubo piezométrico) de un punto de bombeo, de unos paquetes superior e inferior de sellado interior del tubo piezométrico (que son inflados hidráulicamente aislando unas zonas de otras) y de un medidor de la presión de sellado. De este modo, es posible seleccionar en que zona se quiere bombear o extraer la muestra, existiendo además registradores de datos disponibles para la medición en continuo de las zonas deseadas.

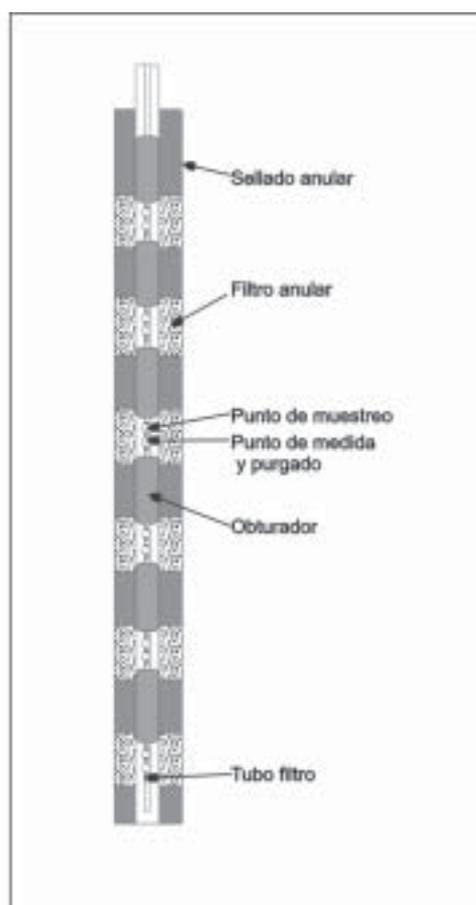


Figura N° 35. Pozo de control de multimuestreo. Fuente: catálogo WestBay

4.3. ENSAYOS DE CAMPO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE CONTROL

Durante la construcción de un pozo de control es posible llevar a cabo diversos ensayos que proporcionen información previa acerca de las características hidráulicas del acuífero sobre el cual se van a realizar posteriores

determinaciones.

Los ensayos generales más empleados en las investigaciones de suelos contaminados son los ensayos de permeabilidad. La permeabilidad o conductividad hidráulica es la facilidad por la cual un material (en este caso serían los materiales constituyentes del terreno) deja pasar el agua a su través. Los ensayos de permeabilidad en pozos de control durante su construcción 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.

En cualquier caso proporcionan información que puede ser útil, aunque no debe ser determinante. Para todos ellos existen fórmulas de aplicación comúnmente aceptadas de los datos extraídos durante los ensayos, que permiten el cálculo de la permeabilidad del terreno. Los métodos más tradicionales dentro de estos ensayos son los siguientes:

4.3.1. ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON

Los ensayos Lugeon son realizados normalmente en terrenos rocosos consolidados y su base es la medición del volumen inyectable en un tramo de longitud conocida de la perforación y bajo una presión determinada. Es necesario por tanto que los terrenos sean muy poco permeables, ante la posibilidad de pérdidas de presión o pérdida de carga. Se emplea para ellos un equipo donde debe incluirse como mínimo:

- Bomba de inyección de al menos 100 l/min a una presión de 10 kg/cm².
- Doble obturador del hueco de perforación. Los obturadores deben tener una longitud de al menos 5 veces el diámetro de la perforación.
- Manómetro.
- Medidor de caudal.
- Cronómetro.

Durante el ensayo se inyecta el agua a presión conocida y se anota el volumen introducido en tiempos conocidos. Este agua se introducirá entre el espacio de la perforación determinado por los obturadores que limitan la capa del terreno en la cual se realiza el ensayo. Normalmente se realizan escalones de presión a 15, 30 y 45 psi, que deben ser mantenidas durante al menos 10

minutos. Los datos del caudal o el volumen de agua introducido por tiempo, proporcionará información acerca de la permeabilidad del sustrato. De este modo, si los escalones de presión aumentan sin un incremento de caudal significativo, nos encontraremos ante una formación de tipo muy impermeable. Cuando el volumen introducido de agua vaya aumentando con la presión significará que éste es menos impermeable. Habrá que impedir alcanzar la presión de rotura de los materiales durante la realización de éstos ensayos, lo que es observable por la bajada repentina de la lectura de presión en el manómetro.

Este tipo de ensayos requieren normalmente del encamisado de las paredes por encima de los obturadores, para impedir el paso del agua a través de éstos, ya que el cierre tiene que ser hermético.

La permeabilidad en estos ensayos será proporcional al caudal introducido por metro de longitud y unidad de presión, de modo que:

$$K = \frac{V}{t \cdot \lambda \cdot P}$$

donde λ = longitud del tubo filtrante.

V = volumen de agua introducido.

t = tiempo.

P = presión.

4.3.2. ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC

Los ensayos Lefranc se realizan preferentemente en terrenos de tipo no consolidado. El sondeo debe estar revestido para no provocar los derrumbes de las paredes, excepto en el punto o tramo donde se realizará el ensayo de permeabilidad. Se introducirá un volumen de agua conocido en un tiempo determinado mediante una bomba de pistón a través de un conducto o por el interior del varillaje, de forma que llegue hasta la parte del tramo a ensayar. El agua introducida podrá salir, o bien a través de los materiales que conforman las paredes del sondeo, o bien a través del espacio anular existente entre el revestimiento y el tubo de introducción del agua, hasta llegar a un depósito exterior (ver Figura Nº 36). El volumen de agua que realmente se ha perdido a través de las paredes de la perforación será el que proporcione información

acerca de la permeabilidad relativa del sustrato. Este será la diferencia entre el volumen introducido total y el de retorno al depósito exterior.

La fórmula general sería la siguiente:

$$K = \frac{V}{2 \pi \cdot d \cdot h_m \cdot t}$$

donde V = volumen de agua introducido.

t = tiempo.

d = diámetro de la cámara de inyección.

h_m = presión de inyección medida en altura de agua sobre el nivel estático del agua.

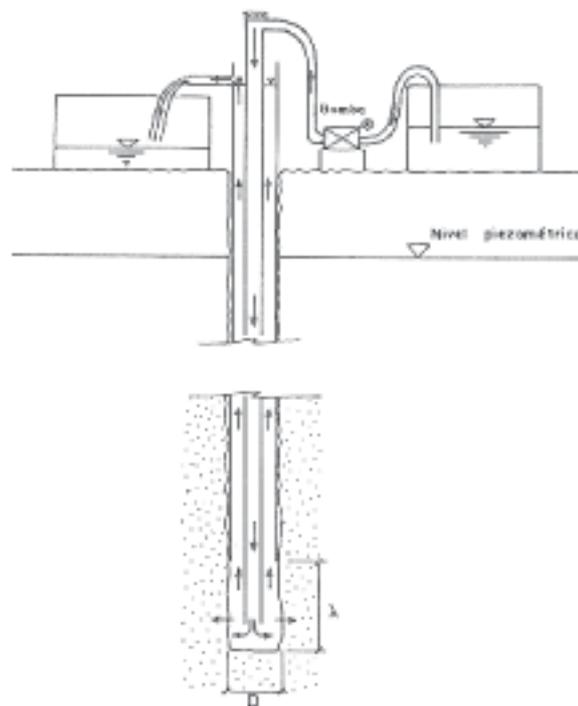


Figura N° 36. Ensayo de Lefranc. Fuente: Custodio/Llamas

4.3.3. ENSAYO DE PERMEABILIDAD GILG-GAVARD

El método Gilg-Gavard se centra en la introducción de agua en la perforación hasta la boca de ésta y en la posterior medida de los descensos del nivel que se producen con el tiempo. Son aplicables principalmente a terrenos poco permeables o de permeabilidad media. Estos ensayos pueden ser de dos tipos:

- método de nivel variable, en el cual se llena la perforación de agua hasta la boca y se registra posteriormente el descenso del nivel de agua mediante sondas de nivel, en intervalos de tiempo que permitan después elaborar gráficas de descenso y hallar la permeabilidad del sustrato ensayado. Normalmente se registran datos hasta que la tasa de descenso es muy reducida o insignificante. Este ensayo es quizás el más sencillo de llevarse a cabo al no ser necesario un gran equipamiento accesorio para su realización. La fórmula general sería la siguiente:

$$K = \frac{1,308 \cdot d^2 \cdot \Delta h}{A \cdot h_m \cdot \Delta t}$$

donde: Δh = descenso del nivel en el intervalo Δt .

A = coeficiente dependiente de la longitud del tubo filtrante (λ) y del diámetro del tubo ranurado (d).

d = diámetro del sondeo.

h_m = altura media del nivel de agua en el intervalo Δt .

- método a nivel constante, en el cual el caudal introducido es el que proporciona los datos principales para la determinación de la permeabilidad. En este método el agua se introduce de forma que el nivel de agua se mantenga constante en la boca de la perforación por periodos no menores a 10 minutos. Por tanto deberán ser cuidadosamente registrados los volúmenes introducidos mediante depósitos aforados o medidor de caudal, así como los tiempos en que se introducen estos volúmenes.

$$K = \frac{Q}{600 A \cdot h_m}$$

donde: A = coeficiente dependiente de la longitud del tubo filtrante (λ) y del diámetro del tubo ranurado (d).

Q = caudal introducido.

h_m = altura media del nivel de agua en el intervalo Δt .

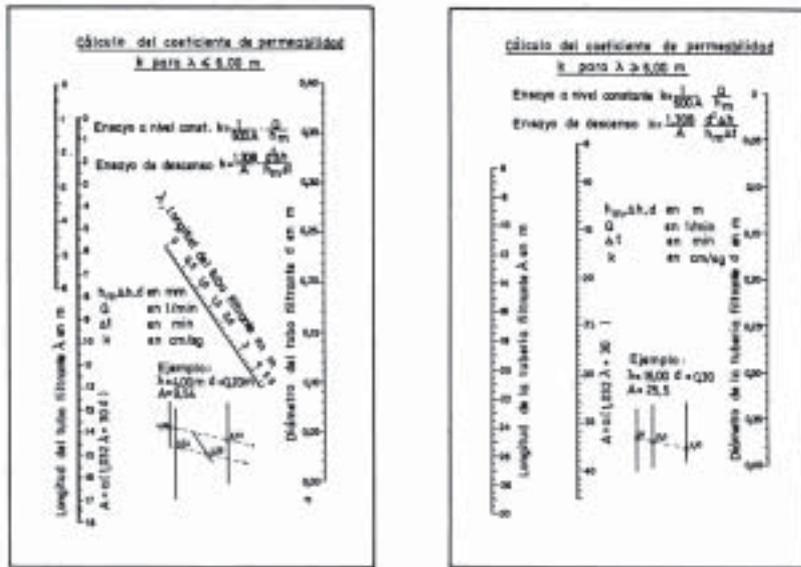


Figura N° 37. Gnomogramas para el uso de las fórmulas de Gilg-Gavard.
Fuente: Custodio/Llamas

Como es posible apreciar, los test de permeabilidad se fundamentan en las pérdidas de agua relativas a través de los materiales en contacto con la perforación. Unos son de tipo más complejo que otros, pero la selección del método más conveniente vendrá sobretodo definido por el tipo de terreno y su composición, ya que no todos los métodos serán aplicables a todos los terrenos. Del mismo modo y como ya se ha señalado, los resultados de un ensayo de estas características no describen con exactitud las características reales de los materiales atravesados, debiendo ser tratados con la consiguientes precauciones. Los ensayos descritos presentan además un problema relacionado con la posible contaminación presente en los terrenos perforados, ya que el agua introducida efectuará el lavado de partículas contaminantes presentes en los materiales con los que haya tenido contacto, siendo necesaria posteriormente el tratamiento de ese agua (agua en depósitos de retorno, etc.) y la limpieza de los depósitos de control.

4.3.4. SLUG-TEST

Este test o método es actualmente muy aplicado en los ensayos de campo, y representa la introducción o extracción instantánea de un volumen conocido de agua o de un cilindro sólido de volumen conocido, que provocará un cambio o fluctuación del nivel de agua. Por tanto, se pueden citar dos alternativas o métodos para este test:

- Slug-out, en el cual se mide el cambio provocado en el nivel de agua por la remoción de un volumen de agua determinado o de un cilindro sólido (normalmente de PVC) que había sido anteriormente introducido. Estos volúmenes (slug) deben ser extraídos con la mayor rapidez posible, ya que el ensayo se fundamenta en la medición de los cambios en el nivel de agua provocados respecto a los niveles de partida en un tiempo determinado.
- Slug-in, en el cual el procedimiento es el inverso, introduciéndose en este caso el volumen conocido de agua (similar al Gilg-Gavard en sus fundamentos) o de sólido de PVC en la perforación, y midiéndose el ascenso que se provoca a continuación.

Este tipo de ensayos presentan las siguientes ventajas, sobretodo aplicables cuando se utiliza como agente que provoca los cambios de nivel, el cilindro de PVC de volumen conocido:

- rapidez con que puede realizarse el ensayo.
- evita la introducción o extracción de agua, y la posterior posibilidad de tener que gestionar la posible agua contaminada.
- posibilidad de extraer datos fiables debido a la utilización de registradores que miden las variaciones del nivel de agua de forma continuada y precisa (el registro del mayor número posible de mediciones en los primeros momentos tras la extracción o introducción del cilindro se considera de gran importancia, ya que es cuando se producen las mayores diferencias de nivel).
- provoca escaso estrés hidráulico de la formación o materiales circundantes a la perforación, al no ser sometidos a presiones diferenciales.
- necesidad de escaso equipamiento accesorio al ensayo.

Por el contrario presenta las limitaciones de que al no ser un método en continuo o que provoque cambios en un tiempo prolongado, estima realmente la conductividad hidráulica en el área inmediatamente circundante a la

perforación, además de que el coeficiente de almacenamiento no es generalmente determinable mediante este método.

Los slug tests utilizan un transductor de presión conectado a un registrador en continuo de la presión. El transductor convierte las presiones que registra en niveles de agua, por lo que tras la medición del suficiente número de registros, es posible determinar la tasa de cambio que produce la introducción del sólido en los niveles de agua.

Existen diversos métodos de interpretación de los slug-test, siendo los más utilizados los establecidos por Bower and Rice, Horslev, y Cooper et al.. El método más simple de interpretación es el método de Horslev, cuya expresión es la siguiente:

$$K = \frac{r^2 \cdot \ln(L/R)}{2L \cdot T_0} \quad \text{para } L/R > 8$$

donde: r = radio del revestimiento.

L = longitud de tubo-filtro piezométrico.

R = radio del filtro de grava.

T_0 = valor de t en una representación semilogarítmica de $H-h/H-H_0$ frente al tiempo, donde:

$$H-h/H-H_0=0,37$$

H_0 = nivel de agua a $t=0$.

h = registros de nivel de agua a $t>0$.



Figura N° 38. Slug-test

4.4. DESARROLLO DE POZOS DE CONTROL

Como ocurre con la construcción de pozos de control, a la hora de desarrollarlos no hay técnicas perfectas ni reglas válidas para todos los casos.

Se entiende por desarrollo o estimulación de un pozo al conjunto de técnicas físico-químicas aplicadas tras la construcción del mismo y cuyo objetivo es eliminar las perturbaciones provocadas en el proceso de perforación y estabilizar la zona circundante al pozo. El proceso de desarrollo conlleva a su finalización el restablecimiento de la conductividad hidráulica original del terreno en el pozo de control, y la remoción de los finos existentes que puedan entrar en el entubado o se encuentren en el filtro de grava.

El término estimulación a su vez, implica una mejora en el rendimiento de

un pozo En el caso de un pozo de control, únicamente tiene sentido el desarrollo ya que la obtención de altos rendimientos de caudal no forma parte de los objetivos. En aquellos casos en que se prevea la posterior utilización del pozo de control como pozo de recuperación sí interesará conseguir un mayor rendimiento del pozo. Tan solo serán aplicables técnicas mecánicas o físicas estando totalmente descartados los métodos de desarrollo químico.

La aplicación de técnicas de desarrollo en pozos de control tiene evidentes desventajas. Por un lado, todo desarrollo mecánico provocará una agitación física del medio que a menudo es indeseable y siempre inevitable, por otro lado la eficacia de los métodos mecánicos a la hora de eliminar finos no es total por lo que a menudo se llevan a cabo desarrollos incompletos.

En la medida de lo posible, el desarrollo de un pozo debe asegurar la extracción de muestras de agua representativas de la unidad hidrogeológica en estudio.

4.4.1. MÉTODOS O SISTEMAS DE DESARROLLO DE POZOS DE CONTROL

A continuación, se citan algunos de los principales métodos de desarrollo de pozos de control, los cuales tienen el objetivo común de la limpieza y estabilización de las condiciones originales existentes en el sustrato.

4.4.1.1. Sobrebombeo con bombas sumergibles

Es la técnica más común y probablemente la más recomendable. La bomba se descende al nivel manométrico de bombeo previsto y se inicia un bombeo escalonado con bajos regímenes de bombeo que se aumentarán en progresivos escalones hasta lograr un sobrebombeo. El escalonamiento puede llevarse a cabo de 2 maneras:

- Por medio de un variador de frecuencia.
- Sin variador de frecuencia bombeando a régimen continuo y estrangulando con una válvula la descarga de la impulsión.

Se recomienda el segundo método por ser menor el costo del material empleado.

En la utilización de esta técnica hay que tener en cuenta que una excesiva presencia de finos podrá perjudicar a la bomba por abrasión de sus partes menos resistentes, aunque hay numerosas bombas sumergibles que ya han superado ese problema.

Existen en el mercado bombas de 3" y hasta 2" que pueden utilizarse, sin embargo sus capacidades son muy limitadas recomendándose el uso de una bomba de 4".

Durante esta técnica será recomendable la medición de los caudales extraídos y de los niveles de descenso del agua, que podrán ser empleados posteriormente en el momento de la toma de muestras. Por supuesto, todos los materiales (bomba, tubos de aspiración, conexiones, etc.) deben encontrarse limpios y ausentes de contaminación. Es recomendable la utilización de tubos de teflón para extraer el agua al exterior.

4.4.1.2. Bombeos de desarrollo con aire

El bombeo de desarrollo con aire ("Air-lift") es un método muy utilizado, que consiste en la inyección en el fondo del pozo de aire a presión. Provoca un flujo ascendente de burbujas que afectan al filtro de grava y al entorno del pozo.

La inyección se lleva a cabo por medio de tubos eyectores que se descenden al pozo de control, colocándose un poco por encima del filtro, siendo los sedimentos extraídos fuera del sondeo. Es importante que la inyección no se realice a la altura del filtro del entubado, ya que podría causar la colmatación de éste por los finos presentes. Es una técnica de uso restringido debido a la agitación que provoca y a que favorece la dispersión de sustancias contaminantes.

4.4.1.3. Bombeo de vacío

Es una técnica introducida recientemente para su aplicación en pozos de control.

Para efectuar el vacío se usan unidades portátiles especialmente diseñadas, denominadas agujones ("stingers"). Son piezas cilíndricas de PVC de 1" de diámetro que se bajan a un pozo de control unidas a una manguera de vacío.

El agua no asciende como una fase única sino que lo hace en forma de emulsión aire-agua. Según desciende el nivel piezométrico en el interior del pozo ha de ir descendiendo poco a poco el stinger.

Esta técnica tampoco evita que haya una cierta agitación mecánica en el entorno del pozo y presenta la desventaja de que no es muy efectiva en ciertas profundidades.

4.4.1.4. Bombeo de pulso mecánico

Es una técnica basada en un sobrebombeo con una bomba que funciona elevando el caudal por impulsos. En principio no supone una mejora sustancial a cualquier sobrebombeo.

4.4.1.5. Lavado e inyección

Una pieza que sufre un movimiento simultáneo descendente y giratorio emite una inyección de agua, aire o mezcla a presiones elevadas (hasta 10 kg/cm² aprox.). Es una técnica bien desarrollada para pozos de agua pero poco recomendable en pozos de control medio ambientales.

Algunos han desarrollado una variante aplicada a la Ingeniería Medioambiental llamada Cilindro Inyector (Daugherty y Paczkowski).

Esta técnica consiste en la colocación de una bomba sumergible y una herramienta de inyección sobre ella para que actúen conjuntamente. No es una técnica que obtenga grandes resultados.

4.4.1.6. Bombeo mediante bailer

Se realiza mediante la repetida introducción de un tomamuestras de válvula o bola en el pozo y la posterior extracción del agua contenida en él. Este método no es aplicable en pozos que posean una gran recarga, pero por el contrario es recomendable para aquellos en los cuales la recuperación del nivel es muy baja.

4.4.2. PROCEDIMIENTOS Y RECOMENDACIONES DE ACTUACIÓN

El desarrollo de un pozo de control debe llevarse a cabo a través de unos procedimientos que aseguren que la actividad se ha realizado de forma correcta. A continuación se resumen los **procedimientos** más generales:

- Tras abrir el pozo de control se deben registrar algunas medidas iniciales tales como: nivel de agua, profundidad final del sondeo, pH, temperatura del agua y conductividad. Los equipos de medida in-situ (conductímetro, pHmetro, etc.) deberán haber sido calibrados con anterioridad a la toma de registros.
- Se marcará el punto de medición o punto de referencia (por ejemplo,

boca del pozo) mediante algún tipo de señal indeleble. Este punto servirá además para la posterior nivelación del pozo de control, en caso de ser necesario.

- Los equipos que vayan a ser utilizados durante el desarrollo del pozo de control serán cuidadosamente limpiados, previniendo el aporte de contaminación cruzada al pozo. En la medida de lo posible, y en dependencia de la técnica empleada, los accesorios o equipos empleados serán de un sólo uso (ej. tubos de aspiración, bailers, etc.).
- En caso de sospecharse la existencia de contaminación en el agua, se deberá disponer de containers o depósitos adecuados para el almacenamiento de ésta durante su extracción.
- Tras la preparación de los equipos e introducción en el pozo de control, se comenzará el desarrollo de éste, que será diferente en función de la técnica empleada.
- Durante el desarrollo se tomarán medidas del tiempo de extracción de agua, caudal de extracción, conductividad, pH y se observará la disminución de finos en el efluente.
- Se deberá continuar el desarrollo hasta que el agua extraída esté limpia y carente de finos. Se considera que un pozo ha sido convenientemente desarrollado cuando la conductividad y pH presentan valores estables. Los valores finales registrados de los diferentes parámetros serán debidamente anotados.
- Tras el desarrollo del pozo se deberá de nuevo limpiar todo el material utilizado para esta actividad

Algunas **recomendaciones** básicas a seguir durante el desarrollo de un pozo de control son las siguientes:

- El desarrollo del pozo de control debe ser llevado a cabo lo más pronto posible tras su finalización, aunque siendo rigurosos se deberá esperar al menos 48 horas tras la cementación del terreno superficial, para no provocar movimientos o inestabilidad en la instalación.
- La elección de los equipos que se van a emplear durante el desarrollo dependen básicamente del diámetro del pozo, de la profundidad a la que se encuentre el nivel de agua y del método elegido.
- Se deben preparar para la realización del desarrollo formatos tipo en los cuales se reflejará la identificación del pozo, fecha de instalación, fecha del desarrollo, medidas realizadas de los diferentes parámetros (antes,

durante y al término de la actividad), cantidad de agua extraída, caudales de extracción empleados, y descripción del sistema o método empleado.

- Si es posible, se medirá en pozos de control o en puntos de agua cercanos la afección que puede producir la extracción del agua en el pozo que se está desarrollando, registrándose posibles fluctuaciones de los niveles de agua antes y después de la actividad en estos puntos de observación.
- No debe ser añadida agua al pozo de control para ayudar a su desarrollo. Sólo en caso de que se considere absolutamente necesario extraer los finos presentes y de que la cantidad de agua extraída sea insuficiente a causa de la permeabilidad del sustrato (nula recuperación) o de que el filtro se encuentre colmatado de finos, será posible introducir pequeñas cantidades de agua potable en el pozo. Si el caudal de extracción de agua aumenta tras esta operación, será necesario extraer 5 veces el agua introducida anteriormente.
- En caso de que no quiera favorecerse la dispersión en un medio de las sustancias contaminantes local o extensamente contenidas en él, habrá que extremar las precauciones durante cualquiera de los métodos de desarrollo citados, incluso no llegar a desarrollar los pozos de control que se puedan construir.
- El desarrollo de un pozo es una herramienta válida siempre y cuando la propia actividad no pueda generar desplazamientos del filtro de grava, o creación de canales y huecos en éste, por lo que debe ser realizado mediante técnicas lo menos agresivas posible.
- Tras la realización del desarrollo del pozo es recomendable realizar un test de recuperación, midiéndose los ascensos respecto al tiempo. Estos datos podrán ser de utilidad posteriormente para determinar caudales máximos de bombeo, conos de depresión provocados por el bombeo, así como otros parámetros hidráulicos de interés.

Los datos obtenidos durante el desarrollo del pozo de control servirán además a posteriori para conocer los caudales más aconsejables bajo los cuales se deben extraer las muestras de agua.

5. TOMA DE MUESTRAS DE LA FASE LÍQUIDA

5.1. INTRODUCCIÓN

A los efectos de este manual, quedarán incluidas dentro de la fase líquida tanto las aguas subterráneas (zona saturada y no saturada), como las superficiales y los residuos de tipo líquido.

Se debe considerar por tanto, que el objetivo del muestreo será variable entre ellas, ya que en aguas subterráneas y superficiales el muestreo va dirigido principalmente a la detección y en su caso, posterior caracterización de contaminantes, mientras que en los residuos procedentes de actividades industriales irá enfocado a su caracterización, al conocerse la presencia de contaminantes de antemano en base a las características intrínsecas de un residuo industrial.

Los métodos y sistemas de toma de muestras, en base a las características del medio en que se encuentran los distintos tipos de aguas que van a ser objeto de la investigación, variarán también respecto a los equipos y a los procedimientos empleados para la obtención de la muestra.

El aspecto principal en un muestreo de fase líquida es asegurar que la muestra sea efectivamente representativa de las características y condiciones de las aguas muestreadas, lo que conllevará realizar todas las actividades asociadas al muestreo mediante precauciones aplicadas tanto durante la toma, como durante su manipulación, transporte y análisis.

En el Cuadro N° 6 se resumen los principales procesos que pueden causar alguna pérdida de la representatividad de la muestra.

Cuadro N° 6. Procesos que pueden modificar la muestra

PROCESO	PRODUCE / AFECTA A
Actividad biológica: bacterias, algas, ...	- Consumo de constituyentes de la muestra - Modificación de la naturaleza de la muestra - Producción de nuevos constituyentes - Afectan al oxígeno disuelto, CO ₂ , compuestos nitrogenados, de fósforo y a veces de silicio.
Oxidación (oxígeno disuelto o del aire)	Compuestos orgánicos, Hierro (II), Sulfuros
Precipitación	CaCO ₃ , metales y compuestos metálicos: Al(OH) ₃ , Mg ₃ (PO ₄) ₂
Volatilización	Oxígeno, cianuros, mercurio
Absorción de CO ₂ del aire	pH, conductividad, contenido en CO ₂
Absorción sobre las paredes del recipiente y sobre la materia sólida en suspensión	Metales disueltos coloidalmente, compuestos orgánicos
Polimerización/despolimerización	---

A continuación se describirán los equipos, sistemas y procedimientos de muestreo comúnmente utilizados para la toma de muestras de aguas subterráneas, dentro de la diversidad y variedad existente.

5.2. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN POZOS DE CONTROL

Los procedimientos estándar de operación en la toma de muestras de agua subterránea pueden variar en función de las condiciones del emplazamiento, las limitaciones impuestas por el equipo y las propias limitaciones del procedimiento. Este es un campo que se halla muy desarrollado en la actualidad, tanto en equipos y accesorios, como en los procedimientos más convenientes a seguir en una campaña de muestreo, siendo clave en muchos casos para determinar la posible contaminación producida por una actividad determinada.

5.2.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES

El muestreo de aguas subterráneas puede variar en función de que el pozo de control sea un pozo ya existente, o un pozo construido especialmente para el muestreo de aguas subterráneas. En el caso de un pozo ya existente se

deberán realizar algunas actividades adicionales a las habituales, entre las cuales es posible citar:

- Recopilación de información del pozo en gabinete (bases de datos de puntos de agua existentes). Los datos que es posible obtener en gabinete en caso de encontrarse registrado el pozo se pueden centrar en: coordenadas del punto, cota de la boca del pozo, datos constructivos, perfil geológico, profundidad del pozo y niveles de agua históricos, datos del aforo, tipo de bomba instalada (potencia, profundidad de instalación), régimen de bombeo, caudal máximo, usos del pozo, analíticas realizadas anteriormente, etc. El mayor problema reside en que las bases de datos existentes no reflejan todos los puntos de agua, sino sólo aquellos que han sido registrados en confederaciones, industria, etc., además de poseer en muchos casos datos incompletos. Por ello se hace necesaria una inspección exhaustiva del pozo en el campo, antes de proceder al muestreo.
- Recopilación de datos en campo. La inspección del pozo nos podrá facilitar datos acerca del tipo de pozo (excavado, perforado, reperforado, etc.), de su diámetro, profundidad, nivel de agua, presencia o no de bomba, y situación de éste (en uso, abandonado). Otros datos constructivos se podrán extraer en ocasiones del propietario, así como usos del agua, frecuencia de bombeo, tipo de bomba, etc. Como mínimo se considera necesario conocer la profundidad y diámetro, así como el nivel de agua, para poder calcular el volumen de agua contenida en el pozo.
- Elección del equipo de toma de muestras y del método que mejor se pueda adaptar a los condicionantes o limitaciones del pozo. En ocasiones, si el pozo se encuentra equipado, será posible extraer el agua por medio de la bomba ya instalada en éste, lo que facilitará la realización del muestreo.

En el caso de un pozo construido especialmente para la toma de muestras, también será necesario poseer los datos anteriores, aunque se supone que se conocen, en base a que la construcción del pozo ha constituido una fase dentro de la investigación general del emplazamiento y se ha llevado a cabo según los procedimientos descritos en capítulos anteriores.

La toma de muestras de un pozo es posible dividirla en tres fases:

5.2.1.1. Mediciones in-situ

Antes del comienzo del muestreo se deberá abrir todo sistema de protec-

ción del pozo (arquetas, tubos de cierre, tapas de cierre, etc.). Se deberá a continuación medir el nivel existente de agua en el pozo y calcular el volumen de la columna de agua en función de su diámetro. El nivel de agua se medirá desde el punto de referencia (por ejemplo la boca del pozo), que en caso de no existir deberá ser señalado para futuras mediciones. Se realizará un croquis de la situación del punto de referencia, altura de la boca del pozo sobre el nivel del suelo, etc. Del mismo modo será registrada la fecha y hora en que se procede a la toma de muestras.

5.2.1.2. Purgado del pozo

El purgado del pozo se realiza con el objetivo de que la muestra sea representativa, extrayéndose el agua contenida en el pozo y la inmediatamente adyacente a éste (zona de influencia). Aunque el pozo fue limpiado tras su ejecución durante las operaciones de desarrollo de éste, el tiempo transcurrido entre el desarrollo y la toma de muestras puede ser variable, por lo que el agua contenida en el pozo puede corresponder a agua estancada. El volumen purgado del pozo dependerá del equipo utilizado y de las condiciones hidrogeológicas del área.

Se deberá preparar el equipo que va a utilizarse para la extracción de agua o purgado, que debe haber sido previamente limpiado para no inducir contaminación cruzada.

La purga del pozo se realizará mediante bombeo, siendo los equipos disponibles de muy diversa índole. Se considera que como mínimo es necesaria la remoción del volumen de columna de agua contenida en el pozo, aunque preferiblemente es recomendable extraer este volumen 3 veces si se desea una muestra suficientemente representativa, ya que esta cantidad se corresponde con la necesaria para extraer el agua estancada en el pozo y la presente en el terreno en contacto con el pozo, sin llegar a provocar un flujo procedente de otras áreas. En aquellos pozos situados en terrenos muy poco permeables será en ocasiones difícil llevar a cabo esta tarea, en base a la escasa recuperación que pueden presentar. En cualquier caso, se intentará extraer la máxima cantidad de agua posible del pozo, e incluso esperar a que recupere el nivel de agua que permita extraer de nuevo, si no es excesivamente prolongado el tiempo de espera. En estos casos se puede bombear hasta la estabilización de parámetros como pH, conductividad, o turbidez (ver capítulo 4). Durante el bombeo se deberán tomar datos acerca de los niveles de agua a intervalos que pueden variar en función de las características del acuífero (transmisividad, etc.), estos datos serán utilizados con posterioridad para evaluar la transmisividad del acuífero y otras características hidráulicas.

5.2.1.3. Toma de muestras

La toma de muestras se podrá llevar a cabo con el mismo equipo empleado para el purgado del pozo, aunque esto no es totalmente necesario. El tipo de análisis que se va a llevar a cabo posteriormente determinará el tipo de envase y su volumen, la necesidad de emplear reactivos o no, el tiempo máximo de integridad de la muestra antes de su análisis, la necesidad de filtración de ésta, etc.

Cuando se haya extraído la suficiente cantidad de agua del pozo se procederá a la toma de una muestra en el recipiente elegido, el cual será herméticamente cerrado, etiquetado y embalado para su envío al laboratorio. La muestra puede ser introducida en la mayoría de los casos directamente desde el equipo de bombeo (tubo de aspiración u otros) al envase, ya que es importante que el muestreo tenga lugar inmediatamente después de la purga. Durante la toma de muestras se guardarán las debidas precauciones en referencia al manejo de ésta y la inducción de contaminación cruzada (guantes desechables, recipientes nuevos y homologados, etc.). Es importante señalar que aunque los métodos de laboratorio han avanzado en gran medida durante los últimos años, tanto en límites de detección, como en control de calidad, no son capaces de compensar los errores cometidos en campo, por lo que la toma de muestras debe guardar un similar aseguramiento de la calidad mediante buenos procedimientos.

La toma de muestras en pozos de control donde aparezcan compuestos orgánicos volátiles (COV's) deberá seguir unos patrones de comportamiento algo distintos a los habituales, en base a la posibilidad de permitir la volatilización de estos compuestos durante las operaciones de muestreo, debiendo emplearse accesorios especiales para la transferencia de la muestra entre el dispositivo de extracción del agua y el recipiente donde va a ser introducido, de forma que el agua quede expuesta lo menos posible al ambiente y no se volatilicen sus componentes, además de impedirse cualquier tipo de turbulencia o agitación en el momento de depositarse el agua en el envase (deberá dejarse resbalar lentamente sobre la superficie interna del recipiente).

Otro tipo de muestreo que difiere del muestreo habitual de aguas subterráneas es el muestreo de fase libre, cuando exista una fase diferenciada (LNAPLs) sobre la lámina de agua. Este muestreo se lleva a cabo de forma manual mediante tomamuestras de válvula o bola, que deben ser de teflón o polietileno, y preferentemente de tipo transparente. Se intentará extraer únicamente el sobrenadante o fase diferenciada. Otro sistema aplicable utiliza bombas especialmente diseñadas para el muestreo de fase libre, que normalmente son de tipo neumático, y extraen selectivamente la fase libre superficial en base a

diversos sistemas (membranas especiales, flotadores diseñados para densidades menores que el agua, filtros selectivos, etc.).

5.2.2. OPERACIONES AUXILIARES

Las operaciones auxiliares más comunes durante la realización de un muestreo, un purgado o incluso un desarrollo de un pozo de control, se centran principalmente en las medidas de niveles de agua, conductividad, pH y otros parámetros.

5.2.2.1. Medición del nivel de agua

Se emplea con el objetivo de determinar direcciones de flujo subterráneo o elaborar mapas de isopiezas, dentro de otras características del acuífero, principalmente cuando es posible la medición de diferentes puntos en un área determinada, siendo los valores obtenidos fiables si las mediciones han sido efectuados dentro de un periodo de 24 horas (aunque en dependencia del tipo de acuífero, si existen extracciones, precipitaciones, o cambios de presión atmosférica acusados será necesario realizar mediciones en periodos más cortos de tiempo). Los equipos típicos de medición de nivel de agua, sondas de nivel o hidroniveles, se fundamentan en el cierre de un circuito eléctrico al entrar en contacto con el agua, que acciona una señal luminosa, acústica, o ambas. Están formadas por un soporte o carro en el cual se arrolla una cinta métrica en cuyo interior se alojan dos cables conductores separados; la cinta tiene en su extremo la sonda metálica, que al entrar en contacto con el agua cierra el circuito. También es posible medir el nivel mediante un tomamuestras tipo bailer transparente o translúcido al que se ha acoplado una cinta métrica, aunque es menos preciso, presenta ventajas en los casos de presencia de fase libre flotante sobre la lámina de agua.

En general las mediciones de niveles de agua deben seguir siempre los siguientes principios:

- realizarse siempre desde el mismo lugar (punto de referencia) del pozo de control, que se encontrará debidamente documentado en los formatos de mediciones utilizados.
- las mediciones deben realizarse con una precisión de al menos 0,01 m, la mayoría de medidores de nivel de agua o sondas de nivel actuales, son capaces de ofrecer este nivel de precisión. Esto es debido a que en ocasiones los gradientes hidráulicos entre diferentes puntos presentan

diferencias de escasa magnitud.

- se debe medir la distancia desde el punto de referencia hasta la superficie de la lámina de agua del pozo, preferentemente dos veces para que la medida sea segura. La medida debe ser registrada con identificación del pozo de observación, fecha y hora exacta.
- se debe trabajar siempre con material descontaminado. En el caso de medirse diversos puntos de observación, se debe realizar siempre en la misma secuencia.
- se debe anotar cualquier observación que pueda proporcionar datos accesorios: ej. olor extraño o aspecto oleoso de la sonda al ser extraída.
- Debe tenerse especial cuidado con las mediciones de nivel en pozos donde el agua pueda entrar a través del filtro rápidamente y en forma de cascada, pues puede interferir en la medición antes de llegar realmente a la superficie de la lámina de agua. Asimismo, la sonda se deberá bajar con cuidado en pozos donde estén instaladas bombas, ya que puede quedar bloqueada en las bridas o enredada en los cables de la bomba.

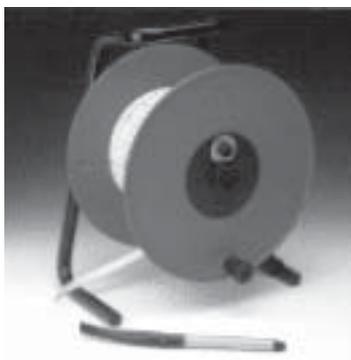


Figura N° 39. Sonda de nivel de agua

5.2.2.2. Medición del espesor de fase libre

5.2.2.2.1. Sonda de Interfase

Existen casos en que pueden aparecer fases libres o fases diferenciables respecto al agua en la superficie o en el fondo del piezómetro. En estos casos se deberán utilizar medidores especiales de los distintos niveles observables. Normalmente esta fase libre corresponderá con niveles de saturación de hi-

drocarburos, aceites inmiscibles con el agua, u otros, y la medida no deberá realizarse con las sondas de nivel típicas, ya que estos compuestos pueden aislar los contactos del electrodo de la sonda, debiéndose emplear una sonda de interfase (sonda que utiliza la refracción por infrarrojos para la detección de la fase flotante y la conductividad para el agua).

Estos compuestos son los denominados NAPLs (Non-Aqueous Phase Liquid) y se dividen en LNAPLs (compuestos orgánicos menos densos que el agua y relativamente insolubles, p.e. gasolina) y DNAPLs (más densos que el agua, p.e. tricloroetileno). Forman en base a sus densidades capas diferenciables cuando llegan a su límite o concentración de saturación en el agua (ya que una parte de ellos sí podrá presentarse en forma disuelta) y sus espesores deben medirse diferencialmente mediante la sonda antes mencionada o bailers de fase libre (típicamente transparentes).

5.2.2.2. Cálculo del espesor real de fase libre

Las mediciones de espesores de fase libre en pozos de control pueden llevar a error respecto al verdadero espesor que se encuentra en el acuífero, por lo que se habla normalmente de un espesor real y un espesor aparente de fase libre. Esto es debido a que el espesor que se mide en el pozo de control es la suma del espesor en la franja capilar, más el espesor real y más el espesor que se encuentran deprimiendo el nivel de agua. Existen diversos sistemas para correlacionar las mediciones del espesor aparente con el real de fase libre, pudiéndose realizar los cálculos tanto en base a fórmulas como mediante ensayos de tipo empírico.

- Ensayo de “Bail-Down”

El ensayo empírico para el cálculo del espesor real de fase libre es el denominado “Ensayo de Bail-Down”, el cual no es aplicable en aquellos casos en que tras el purgado del pozo, la recuperación de los niveles de fase libre o agua son muy rápidos o demasiado lentos, o cuando la fase libre presenta menos de unos 5 mm de espesor. Mediante este ensayo se deben extraer todos los fluidos presentes en el pozo de control, de modo que ambos puedan posteriormente recuperarse. Posteriormente se deberá medir los espesores y niveles de la recuperación de ambas fases (normalmente en los intervalos siguientes: 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos) hasta que 3 mediciones sucesivas presenten valores estables o cuando los niveles de recuperación hayan alcanzado aproximadamente el 90% de los niveles anteriores al purgado. La recuperación se representará gráficamente, correspondiendo según un típico patrón con una curva exponencial ascendente

que sufrirá un punto de inflexión acusado en ambos parámetros (nivel de agua y de producto), siendo éste el punto aproximado de espesor real de fase libre en el acuífero. El espesor aparente es el correspondiente a la estabilización de ambos parámetros, que es mayor al real. En algunos casos, y cuando la recuperación total tiene lugar en menos de unos 5 minutos, el espesor de fase libre medido inmediatamente tras el purgado, se corresponderá aproximadamente con el espesor real en el acuífero. Ver Gráfica 1 (Ensayo de Bail-Down).

- Cálculo del espesor real de fase libre

El espesor real de la fase libre existente en un acuífero se puede calcular también a partir de algunos datos obtenibles en campo, mediante la siguiente ecuación aplicable a los LNAPLs:

$$hf = hw \left(\rho_{\text{agua}} - \rho_{\text{LNAPL}} \right) / \rho_{\text{LNAPL}}$$

donde: hf = espesor de los LNAPL en la formación.

hw = espesor de los LNAPL en el pozo.

ρ_{agua} = densidad del agua.

ρ_{LNAPL} = densidad de los LNAPL.

Al producir los LNAPLs la depresión del agua subterránea, las medidas del nivel piezométrico en los pozos de control deberán ser también corregidas mediante la siguiente ecuación:

$$WTc = WTm - (Ht \cdot SGp)$$

donde: WTc = profundidad del nivel piezométrico corregido.

WTm = medida tomada del nivel piezométrico.

Ht = espesor medido de los LNAPL.

SGp = densidad específica del producto (LNAPL).

Como es posible apreciar, se deberá conocer la densidad específica de los LNAPL que aparecen en el pozo de control, aunque en ocasiones es posible conocer ésta a priori en función del compuesto que presumiblemente aparezca en el pozo (ej. gasolina).

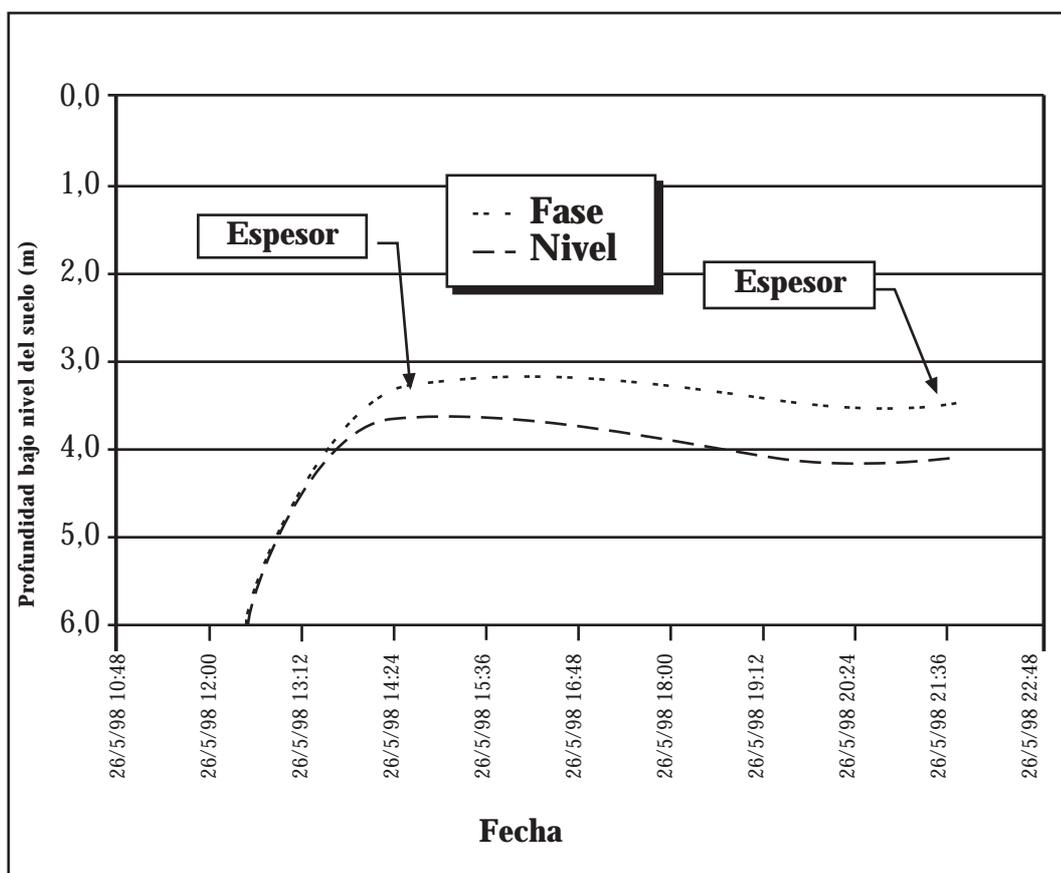


Gráfico 1. Ensayo de Bail-Down

5.2.2.3. Otras mediciones

Otras mediciones que se llevarán a cabo durante el desarrollo de una toma de muestras en un pozo de control serán principalmente las siguientes: mediciones de pH, que podrán realizarse mediante las típicas tiras de pH, o mediante pHmetros de campo, de los cuales existen en la actualidad multitud de modelos; así como mediciones de conductividad, turbidez, y T^a , que son llevadas a cabo normalmente también mediante diferentes modelos de medidores, de los que algunos registran varios de estos parámetros simultáneamente. Estas medidas deben realizarse porque algunos de estos parámetros in-situ son susceptibles de cambiar hasta su analítica en laboratorio, siendo conveniente poseer una comparación de los resultados obtenidos con las determinaciones efectuadas en campo. Es importante además, que estos parámetros sean estables en el momento de tomar la muestra, indicando que la extracción se está realizando del agua efectivamente correspondiente al acuífero, y no al agua estancada en el tubo piezométrico.

En ocasiones, y cuando la contaminación pueda proceder de COV's, se deben realizar mediciones mediante detectores portátiles de COV's en el momento de realizar la apertura de la tapa o tubo del pozo. En el Capítulo 7 se encuentran descritos algunos de estos instrumentos portátiles para determinaciones analíticas en campo.

5.2.2.4. Filtrado de las muestras

El filtrado no siempre será necesario para tomar una muestra representativa, pero irá en dependencia de la limpieza, desarrollo y purgado del pozo que se haya realizado, así como de los requerimientos analíticos y de los compuestos que van a ser muestreados. No existen conclusiones totalmente aceptadas acerca de la idoneidad del filtrado de las muestras en unas circunstancias u otras, aunque como regla general las muestras de agua para análisis de compuestos orgánicos no deben ser filtradas. El filtrado de las muestras en que se encuentran presentes compuestos inorgánicos extraerá del agua la mayor parte de los coloides y partículas que han sido aportadas artificialmente a las muestras de agua durante los procesos de construcción del pozo y muestreo, aunque en ocasiones también se podrían extraer algunos compuestos contaminantes que se adhieren a estas partículas. De este modo, el filtrado de las muestras debe seguir un tratamiento específico para cada situación, que dependerá de: los contaminantes y constituyentes que van a ser muestreados y su susceptibilidad a ser alterados en el proceso de filtrado, de las características hidrogeológicas del acuífero, de las características químicas del agua, y del objetivo final de los resultados analíticos de las muestras filtradas frente a las no filtradas. En muchos casos, el estudio de cada situación particular y la definición de los parámetros de interés, facilitará la decisión de realizar el filtrado o descartarlo para asegurar la representatividad de una muestra.

Los filtros más comunes son de dos tipos, los filtros de bomba, que fuerzan mediante una pequeña bomba el paso del agua a través del papel-filtro (tamaño mínimo de 0,45 μm) hasta un recipiente; y los filtros de vacío, en los cuales la operación es similar pero ejerciendo una succión desde el recipiente receptor de la muestra. Hay analíticas que requieren el filtrado, tales como aquellas que van dirigidas a la detección de metales.



Figura N° 40. Filtro de muestras

5.2.2.5. Acondicionamiento y conservación de muestras

Las muestras requerirán en ocasiones de la adición de conservantes o reactivos que impidan que se produzcan reacciones indeseadas en el agua hasta su llegada al laboratorio, o que la muestra pierda sus características originales. La adición de estos reactivos o conservantes deberá por tanto asegurar la integridad y representatividad de la muestra extraída. Los recipientes, el tiempo y sobre todo las técnicas y precauciones para la conservación de las muestras dependen de cual sea la sustancia a analizar, por todo ello se recomienda consultar la *Guía Metodológica de Análisis Químico*, que desarrolla estos aspectos.

En el capítulo 8 se describe en más detalle las operaciones de acondicionamiento y conservación de muestras en campo.

5.2.3. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los equipos de muestreo y purgado del pozo deben estar limitados en su diseño a materiales tales como acero inoxidable, teflón, cristal, o polipropileno y PVC (aunque este tipo de material debe ser evitado cuando el muestreo se lleve a cabo para análisis de COV's, pues puede alterar los resultados obtenidos en el laboratorio)

Existen multitud de equipos aplicados al purgado y toma de muestras de pozos de control, de los que se van a describir los más importantes o utilizados, ante la profusión de diferentes modelos y sistemas.

5.2.3.1. Sistemas manuales de depósito

Los utilizados más habitualmente hasta hace pocos años consistían en recipientes o depósitos que eran bajados hasta el pozo para extraer la muestra (cazoletas), o en tubos o barras huecas provistas de agujeros para permitir la entrada del agua. En la actualidad, y sobre la idea básica de la barra hueca se han desarrollado diferentes tomamuestras adaptando válvulas, que son los que más auge han supuesto en este tipo de muestreadores.

5.2.3.1.1. Tomamuestras de válvula o bola

Los tomamuestras de válvula o bola (“bailers”) son los más utilizados actualmente entre los sistemas manuales de depósito, ya que han sido desarrollados y diseñados en multitud de diámetros y tamaños, materiales de composición (metálicos, de teflón, PVC, polietileno, etc.) y aplicaciones, además de ser de coste muy reducido. En general, consisten en un tubo cilíndrico hueco que posee en su parte inferior una válvula o bola, que permite el paso del agua al interior del tomamuestras cuando éste se sumerge en el agua, pero que queda cerrado cuando se asciende éste al exterior, por la propia presión que ejerce el agua de su interior sobre la válvula o bola. Existen también modelos que están dotados de otra válvula superior que impiden el paso de agua al interior cuando este es subido a la superficie, e incluso modelos en los cuales las válvulas pueden manipularse desde el exterior mediante cables para permitir la extracción de la muestra a una profundidad exacta. Es preferentemente aconsejable para aquellos pozos en que el volumen a purgar es reducido. Su bajo coste permite además su uso individual en cada pozo (un sólo uso). Su versatilidad en cuanto a materiales de composición le hace ser aplicable a la gran mayoría de muestreos, independientemente de la analítica a realizar. Permite además medir la existencia de capas de flotantes o fases diferenciadas en la superficie del agua, al poderse encontrar en materiales transparentes. Es posible utilizarlo tanto para el purgado (si el volumen a purgar es reducido o existe una escasa recuperación del pozo), como para la toma de muestras final tras el purgado realizado preferentemente mediante otros equipos.

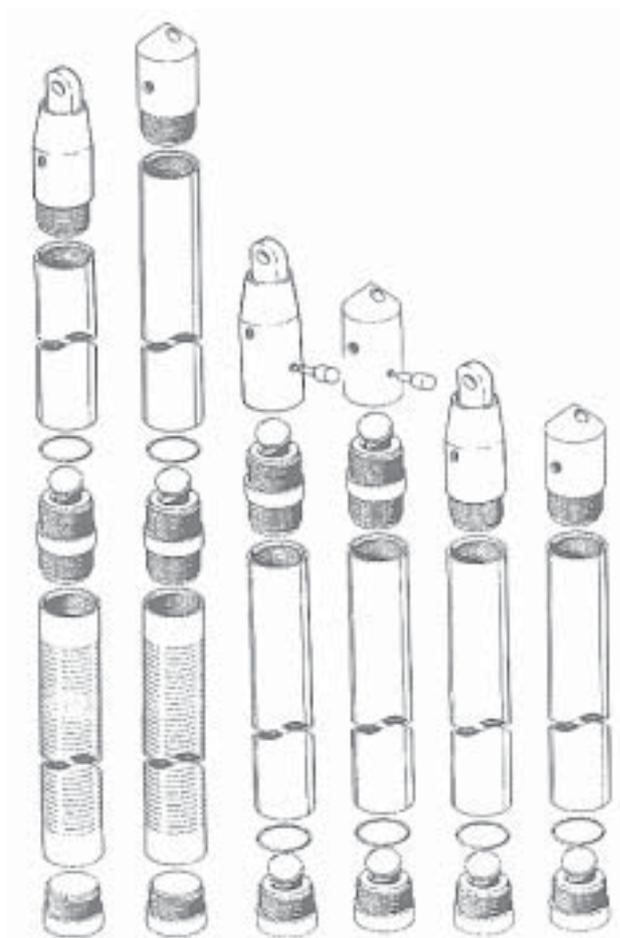


Figura N° 41. Tomamuestras de válvula. Fuente: Wisconsin Department of Natural Resources

5.2.3.2. Sistemas de bombeo

5.2.3.2.1. Bomba de pistón o cebado manual

Su modelo más simple consiste en un pistón que se mueve dentro de un cilindro, el cual es sumergido bajo la superficie del agua. Cuando el pistón se mueve hacia arriba, una válvula de pie en el fondo del cilindro permite el paso del agua a través, y cuando el pistón se mueve hacia abajo cierra la válvula y fuerza el movimiento del agua hacia la superficie. El pistón es accionado desde la superficie mediante una palanca manual. Es por tanto, un sistema de pulsaciones manuales, similar al de las antiguas fuentes de agua

con palanca para elevar el agua. Estas bombas son relativamente poco costosas, fáciles de utilizar y son capaces de conseguir razonables caudales, además de la ventaja que supone ser totalmente portátiles y no requerir ninguna fuente de energía accesoria. Pueden llegar a utilizarse hasta profundidades de aproximadamente 30-35 m. Su desventaja radica en lo laborioso que es un purgado y muestreo mediante este sistema, sobretodo en caso de pozos bastante profundos, además de que en ocasiones es difícil realizar el cebado de la bomba.

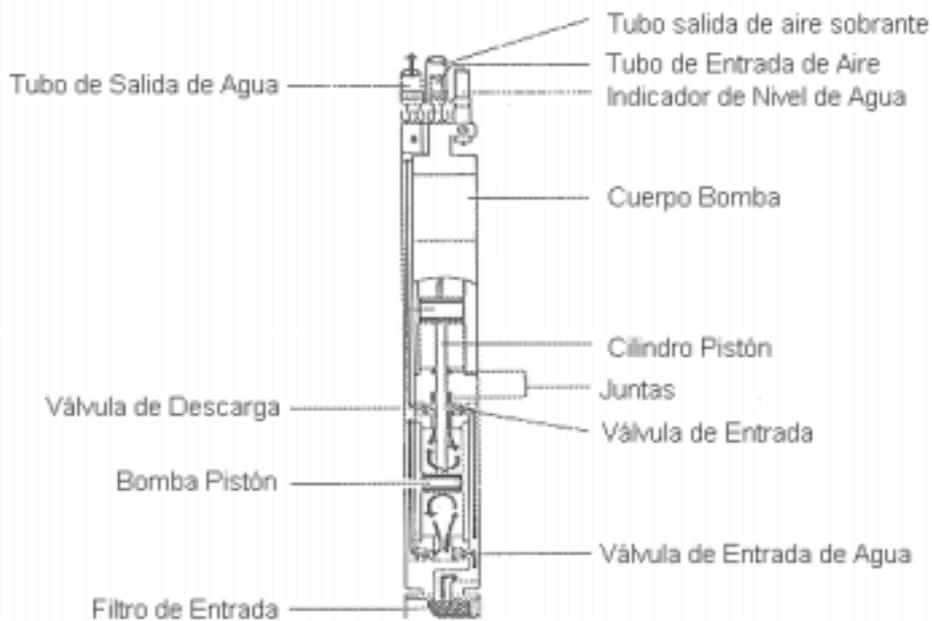


Figura N° 42. Bomba de pistón. Fuente: Wisconsin Department of Natural Resources

5.2.3.2.2. Bombas sumergibles convencionales (eléctricas)

Son bombas mecánicas de accionamiento eléctrico, usualmente de tipo rotorio que utilizan un mecanismo centrífugo o un rotor helicoidal para forzar al agua a ascender a la superficie a través de un tubo conectado a la bomba. Las bombas funcionan mediante un motor eléctrico que se encuentra en la superficie, que puede ser accionado mediante la batería del coche, una batería portátil, o un generador eléctrico o de gasolina. Se pueden encontrar en una gama muy diversa de tamaños, diámetros y composición, de los cuales dependerá los pozos en que son aplicables y las profundidades y caudales que son capaces de alcanzar. Existen modelos que son de tipo desechable, por lo que sirven para muestreos como material de un sólo uso. De idéntica forma hay modelos que requieren y disponen de variadores de potencia que permiten

regular los caudales de extracción a conveniencia, por lo que pueden ser utilizados para el muestreo final (a muy bajo caudal), el purgado (caudales más altos) e incluso el desarrollo de los pozos de control y tests de bombeo (a caudales variables y escalonados). Las muestras pueden transferirse directamente desde el tubo de extracción al recipiente elegido en muchos casos y en dependencia del tipo de análisis y composición de la bomba. La profundidades que alcanzan estas bombas son variables, así como sus costes. Su mayor desventaja radica en que en dependencia del modelo, necesitan equipos accesorios de elevado coste y peso, como generadores, variadores, etc.

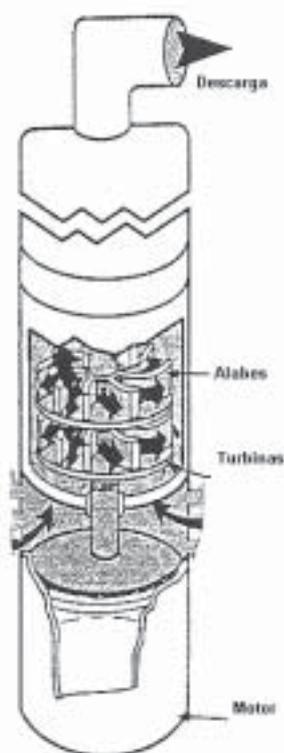


Figura N° 43. Bomba sumergible eléctrica. Fuente: Wisconsin Department of Natural Resources

5.2.3.2.3. Bombas sumergibles neumáticas

Son bombas que utilizan el aire como fuerza de ascensión del agua. Llevan en su interior una camisa de teflón, donde se aloja el agua, que es del mismo modo bombeada al exterior a través de un tubo de teflón. Tiene asociadas unas cajas de control que son las que dirigen el mecanismo de bombeo, y donde es posible variar la duración de los pulsos de bombeo y la frecuencia

de éstos, además de la presión de los pulsos, siendo posible así controlar el caudal de extracción. Son normalmente utilizadas en pozos de control en los que se requiere una alta calidad de las muestras (ej. muestreo de compuestos orgánicos volátiles), al estar compuestas las partes en contacto con el agua normalmente de teflón, y dedicarse frecuentemente cada bomba y equipamiento accesorio a un solo pozo. Presentan la desventaja de su elevado coste, y de la necesidad de suministro eléctrico o de aire (compresores de aire eléctricos o de gasolina), además de que si la bomba va a ser utilizada en varios pozos es complicado el desmontaje y lavado de todas las partes internas de ésta.

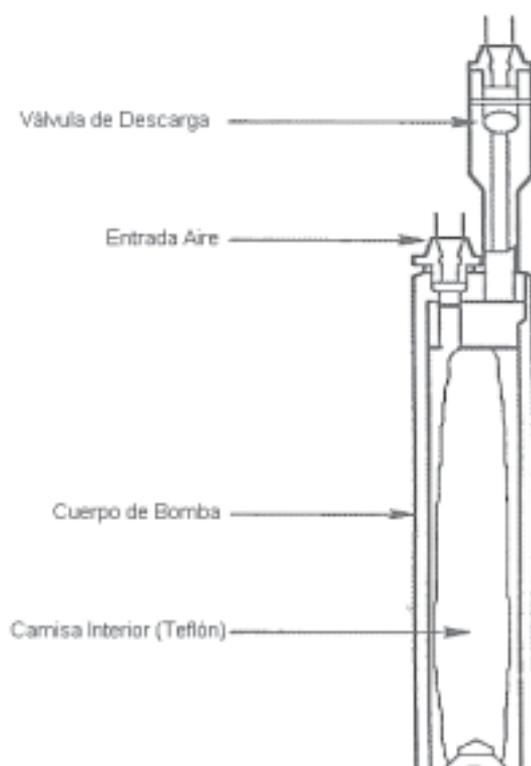


Figura N° 44. Bomba sumergible neumática. Fuente: Wisconsin Department of Natural Resources

5.2.3.2.4. Bomba peristáltica

Su funcionamiento se basa en la producción de un vacío mediante una progresiva constricción o presión de un segmento del tubo. La bomba se dispone en superficie, mientras que el tubo es el que se desciende al fondo del pozo. Presenta la ventaja de que el agua sólo se encuentra en contacto con el tubo (frecuentemente de teflón) y las muestras extraídas son de alta calidad (aunque cuando se muestreen compuestos orgánicos volátiles el vacío puede

repercutir en la pérdida relativa de éstos), además de sus costes reducidos. Sus limitaciones se encuentran en la baja capacidad de bombeo(máximo de 2l/min), lo que centra su aplicabilidad exclusivamente a la toma de muestras final, no siendo suficiente por lo común para realizar el purgado del pozo. De igual manera, su profundidad máxima de bombeo es de unos 8 m. Necesitan además de una fuente de energía (batería de coche, batería interna u otras)

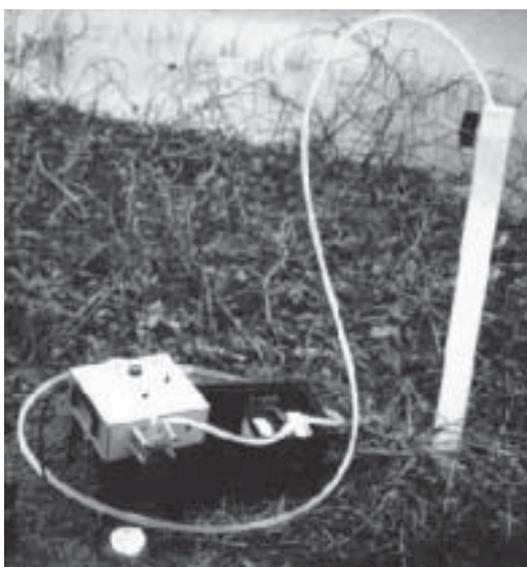


Figura N° 45. Bomba peristáltica

5.2.3.2.5. Tomamuestras automático.

Dispone de una bomba peristáltica eléctrica y un sistema temporizado para la toma de muestras. Son equipos que representan normalmente un coste elevado, y son más aplicados cuando se desea obtener muestras de determinados puntos con frecuencias específicas y a lo largo de un tiempo dilatado.

En el Cuadro N° 7 se exponen las ventajas e inconvenientes entre diferentes equipos de muestreo de aguas subterráneas

Cuadro N° 7. Ventajas e inconvenientes entre diferentes equipos de muestreo de aguas subterráneas

SISTEMA O EQUIPO DE MUESTREO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
BAILER (TOMAMUESTRAS DE VÁLVULA DE BOLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible en diversos materiales y tamaños, peso reducido • No necesita fuente de energía accesoria • Costes muy reducidos, modelos desechables • Posibilidad de individualizar su uso para cada pozo de control • Escasa pérdida de orgánicos volátiles en su interior • Fácilmente disponible • Fácil preparación y uso sin experiencia previa • Rápido y simple para purgado de pequeños volúmenes de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • No recomendable en pozos profundos o de recuperación alta, pues se debe emplear mucho tiempo para la extracción • La transferencia entre bailer-recipiente puede causar aireación de la muestra, a menos que se empleen accesorios especiales • El purgado no es realmente continuo, entre que se introduce y extrae el bailer
BOMBA DE PISTÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Peso reducido, portátil • No necesita fuente de energía accesoria • Modelos menores de 2" disponibles • Costes reducidos • Fácil aprendizaje de uso • Caudales de hasta aprox. 25 l/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco indicada para muestreo de COV's (suele estar diseñada en PVC) • Pérdida de volátiles durante el bombeo y la transferencia de la muestra al recipiente • Elevado tiempo para su cebado y puesta en funcionamiento • Elevado tiempo para bombeo en pozos profundos y muy laborioso en estos casos • Máxima profundidad de bombeo de 30-35 m • Alteración de propiedades de solubilidad de componentes inorgánicos presentes • La descontaminación entre distintos pozos exige tiempos medios de actividad
BOMBA SUMERGIBLE ELÉCTRICA	<ul style="list-style-type: none"> • Portátil, utilizable en un número ilimitado de pozos • Diversos modelos, tamaños, diámetros y costes, amplia difusión • Pueden alcanzar altos caudales de bombeo, incluso posibilidad de variar el caudal de extracción • No requiere cebado • Pueden alcanzar profundidades de bombeo de hasta 80 m aproximadamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Voluminosa y pesada en función de su tamaño y de la profundidad del pozo • Costes elevados y necesidad de equipamiento accesorio en función de sus características • Necesaria fuente de energía accesoria • Fácilmente dañada internamente por presencia de limos o sedimentos (abrasión de componentes) • Poco práctica en pozos de reducido diámetro o que necesiten caudales muy reducidos de extracción
BOMBA SUMERGIBLE NEUMÁTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Mantiene la integridad de la muestra, alta calidad de muestras • Fácil aprendizaje de uso • Recomendable para muestreo de COV's • Caudal variable 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil de descontaminar en sus partes internas • Profundidades máximas de bombeo de hasta 30-35 m • Necesaria fuente de energía accesoria (compresores de aire eléctricos o de gasolina) • Costes elevados
BOMBA PERISTÁTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de obtención de muestras de calidad alta • Portátil y de reducido peso • Costes reducidos • La bomba no entra en contacto con el agua (no es necesaria la limpieza de ésta) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos caudales de extracción • Profundidad máxima de bombeo de unos 8 m • Necesita fuente de energía accesoria (batería) • Aplicable a la toma de muestras, normalmente no al purgado

Fuente: EPA

5.2.4. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS SIN INSTALACIÓN DE POZOS DE CONTROL

Esta técnica es relativamente moderna, y se basa en la toma de muestras de aguas subterráneas mediante hinca, hasta la profundidad necesaria, de sondas de reducido diámetro (generalmente 2-3 cm) que permitan la extracción de la muestra, sin deberse ejecutar para ello un pozo de control.

Permiten el muestreo rápido de un gran número de puntos, por lo que son normalmente utilizados en las investigaciones en que se desea realizar un control y seguimiento de amplias áreas ("screenings"). No son aplicables a terrenos rocosos, o en suelos que presenten contenido significativo de gravas o cantos. En condiciones favorables, es posible llegar hasta aproximadamente 30 m de profundidad, pero realmente no se superan los 10-15 m.

La hinca emplea similares equipos a los mecánicos para la introducción de los muestreadores en el terreno (gatos hidráulicos, etc.), y es aplicable también a muestreos de suelos y gases, con pequeñas variantes.

Típicamente, el extremo de la sonda que es introducido en el terreno es de tipo cónico, con un doble cilindro, el externo de protección y el interno perforado para permitir la entrada del agua. Mediante diversos mecanismos, cuando la sonda llega a la profundidad requerida para la toma de muestras, el cilindro exterior deja al descubierto el interno, entrando el agua a través del filtro. Tras esta operación, se cierra de nuevo el cilindro exterior, con lo que el agua queda definitivamente acumulada en la sonda. Algunos sistemas extraen a continuación el aparato del terreno, mientras que otros elevan el agua al exterior mediante una bomba peristáltica y un tubo interno que llega hasta la sonda, quedando el aparato en el terreno para extraer más volumen de agua si es necesario.

La ventaja de este tipo de muestreo radica en su rapidez, aunque en los casos en que sean necesarias varias determinaciones analíticas de las muestras y un volumen mayor de agua, será necesario realizar muestreos consecutivos en el mismo punto. Del mismo modo, y debido a sus características, no genera residuos procedentes de la perforación y no produce una gran alteración de las características hidrogeológicas del terreno. Las desventajas principales radican en los costes más elevados en comparación con otras técnicas, en la necesidad de movilizar equipos más complejos, y en la limitación en cuanto a los terrenos en que es posible aplicar este método de muestreo.

Muchos de los modelos disponibles se encuentran actualmente en desarrollo, siendo el más conocido el penetrómetro cónico.

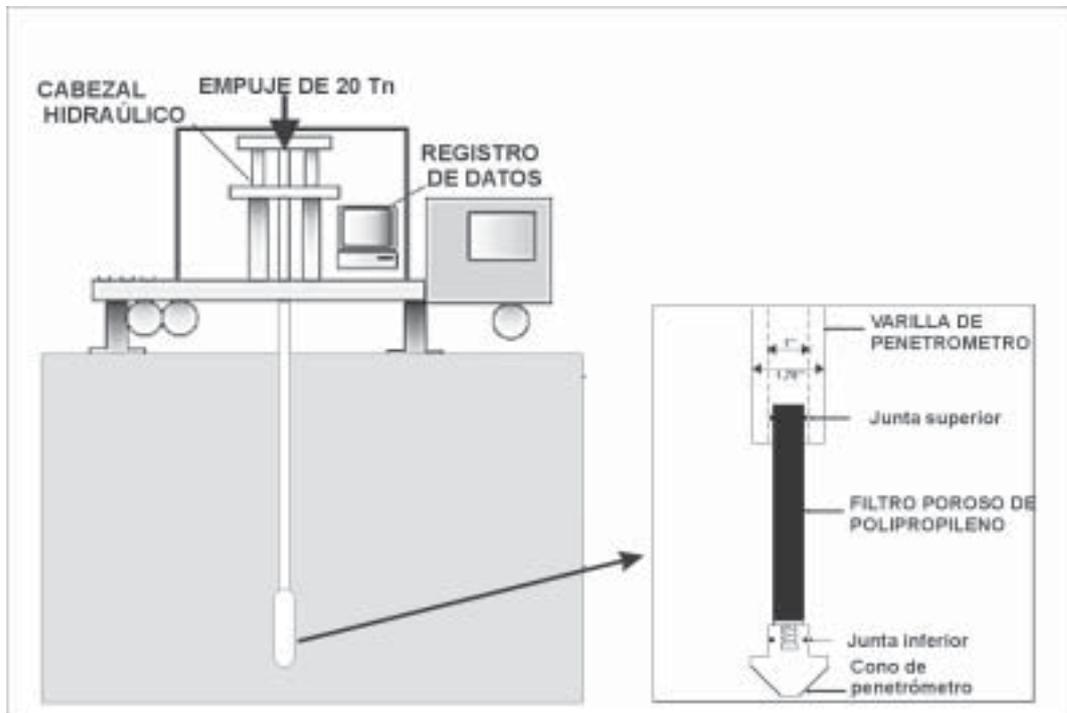


Figura N° 46. Penetrómetro cónico

5.3. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA NO SATURADA

La zona vadosa es el área subsuperficial que se extiende desde la superficie del terreno hasta el nivel freático. Incluye la franja capilar, donde es posible que el terreno se encuentre saturado, además de poder existir zonas de saturación colgadas, por lo que se le denomina preferiblemente zona vadosa.

La zona vadosa se muestrea normalmente como precaución de que la contaminación se pueda estar moviendo a su través y pueda llegar a afectar a las aguas subterráneas. Los contaminantes que puedan haberse depositado en la superficie migrarán a través de la zona vadosa bajo la fuerza de la gravedad, la tensión superficial y por capilaridad, siendo posible que alcancen niveles saturados, acelerándose la dispersión de la contaminación.

Los medios más habituales de extracción de muestras de agua a partir de los suelos de la zona vadosa se fundamentan en la succión o vacío aplicado al suelo.

Los equipos empleados en este tipo de muestreos dependen de varios factores tales como: tipo, características y restricciones impuestas por el terreno,

profundidad de muestreo, régimen de flujo en la zona vadosa, volumen requerido de muestra, etc.

Existen una gran variedad de equipos, de los cuales se describen a continuación los utilizados más habitualmente.

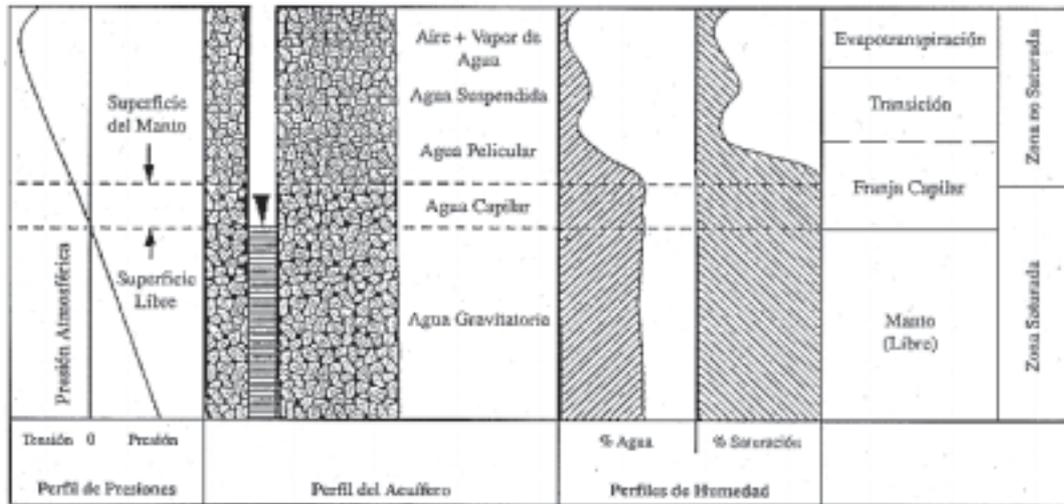


Figura N° 47. Zonalidad suelo/agua subterránea. Fuente: Guía metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y Seguimiento de Contaminantes en el suelo y en las Aguas Subterráneas

5.3.1. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO

5.3.1.1. Lisímetros

Son equipos compuestos de un cilindro tubular hueco de pequeño diámetro con el extremo usualmente acopado y de cerámica porosa. La humedad retenida en el suelo pasa al interior del aparato a través del filtro poroso. De este modo, la utilización de un lisímetro requiere en muchas ocasiones el empleo previo de tensiómetros para determinar la tensión superficial de la zona a muestrear.

Los lisímetros pueden funcionar también mediante diversos sistemas de vacío, siendo típicamente aplicado un vacío, o un vacío seguido de una presión de descarga (lisímetros de vacío, lisímetros de vacío-presión, lisímetros de vacío-presión con válvulas). Estos diferentes sistemas determinan la profundidad a la que es factible extraer la muestra del agua contenida en los poros del suelo, aunque los principios de funcionamiento sean similares en todos ellos.

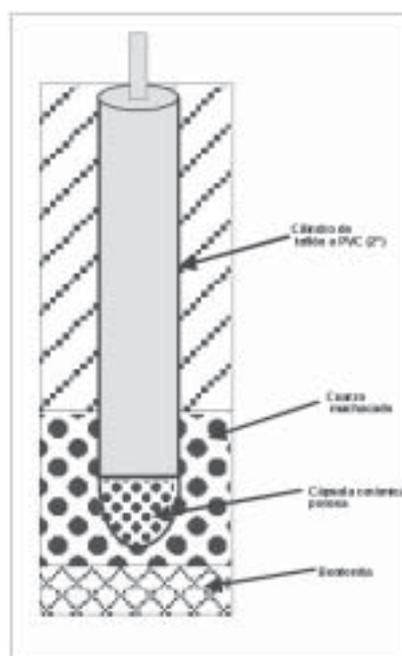


Figura N° 48. Lisímetro

5.3.1.2. Filtros de membrana

Los filtros de membrana son membranas compuestas por filtros de celulosa-acetato que van unidos a mechas o tiras de fibra de vidrio y colectores o receptores. Funcionan de forma pasiva bajo el principio de capilaridad, de forma que la humedad del suelo penetra de las tiras y del filtro para su recolección. Presentan las ventajas de que se disponen en hojas que pueden entrar en contacto con grandes áreas de suelo. Se pueden utilizar hasta profundidades de aproximadamente 4 m

5.3.1.3. Cajas o varillas porosas

Las cajas o varillas porosas son recipientes que son pesados antes de su introducción en el suelo y tras su posterior extracción, para determinar el volumen de agua extraída. Después son sometidas a ebullición en un volumen conocido de agua destilada, consiguiéndose la lixiviación del agua retenida. La solución es analizada y la concentración determinada mediante la proporción de agua absorbida por la caja o varilla frente al volumen de agua sometida a ebullición.

5.3.1.4. Tomamuestras de succión

Los tomamuestras de succión son similares a los lisímetros, estando compuestos por una cápsula de cerámica, teflón u otro material, colocada al final de un tubo de PVC, teflón, vidrio o aluminio, de longitud variable y cerrado en el otro extremo por un tapón equipado con dos tubos de vidrio por los que se realiza el vacío del tomamuestras y el muestreo de la solución del suelo. Pueden ser instalados tanto horizontal como verticalmente. La efectividad y profundidad de muestreo de estos aparatos es variable en dependencia de la presión de vacío aplicada. Cuanto menor sea la humedad del suelo y su conductividad hidráulica, menor será el flujo que entrará en el muestreador. Tensiones superficiales por encima de aproximadamente 60 cm de presión barométrica para suelos de grano medio-grueso, y de unos 80 cm para suelos de grano fino no permitirán la entrada de la humedad al muestreador.

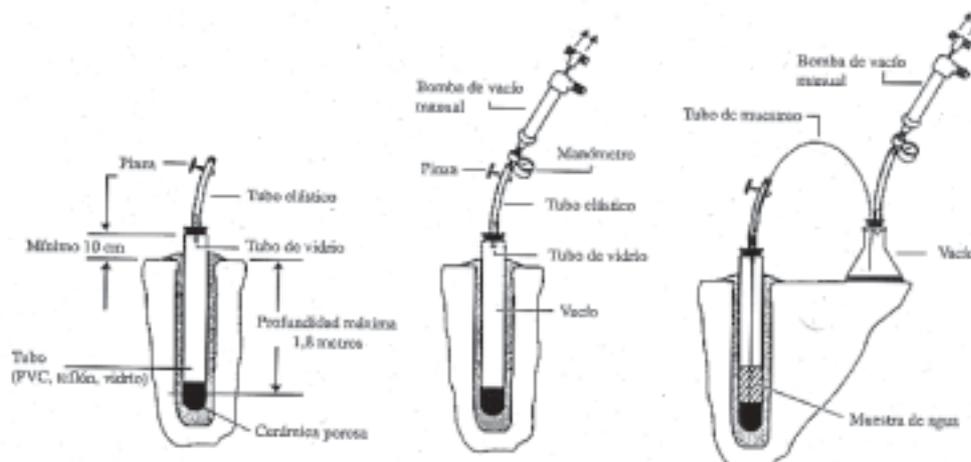


Figura N° 49. Tomamuestras de succión. Fuente: Guía metodológica de Análisis de Riesgos: Migración y Seguimiento de Contaminantes en el suelo y en las Aguas Subterráneas

5.4. TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS SUPERFICIALES

El muestreo de aguas superficiales se encuentra relacionado con las investigaciones de suelos contaminados en aquellos casos en los que la contaminación procedente de algún emplazamiento pueda afectar a cursos de agua superficiales, ya sea porque exista una conexión entre ambos medios o debido a una recarga de las aguas superficiales a partir de acuíferos contaminados.

Las aguas superficiales se caracterizan generalmente en los siguientes ambientes: manantiales, surgencias, ríos, arroyos, lagos, lagunas, embalses, y estuarios, como más representativos. Con frecuencia, y simultáneamente al muestreo de aguas superficiales se lleva a cabo el muestreo de sedimentos. Debido al amplio rango de características generales que presentan los distintos ambientes, como puedan ser tamaño, caudal, profundidad, etc., la técnica de muestreo debe ser adaptada a las condiciones específicas del lugar o ambiente de muestreo. Por ejemplo, el número y ubicación de las muestras necesarias para caracterizar un río diferirá en gran manera de las necesarias para la caracterización de un lago, por lo que debe programarse un muestreo de forma que sea razonable y consistente con los objetivos de la investigación. De este modo los muestreos de aguas superficiales van normalmente precedidos de estudios previos de caracterización de parámetros tales como patrones de flujo, caudales, estratificación de las aguas, etc.

5.4.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES

Ante las características antes mencionadas de los muestreos en aguas superficiales, se pueden describir a continuación algunos de los procedimientos generales de actuación en la toma de muestras de este tipo de aguas.

- **Muestreo en manantiales y surgencias**

Los manantiales y surgencias son elementos que derivan de la salida al exterior de las aguas subterráneas, bien por elevaciones del freático, por diferencias de presión o por la presencia de acuíferos colgados entre capas relativamente impermeables que pueden encontrar salida en algún punto, representando por ello las condiciones de los acuíferos que los forman. Las muestras deben ser tomadas en la boca de la surgencia o manantial, o punto de salida de las aguas al exterior.

- **Muestreo en ríos y arroyos**

Para asegurar la representatividad de las muestras, éstas deben ser obtenidas inmediatamente por debajo de un área que presente turbulencias, o aguas abajo de algún tipo de cambio físico notable en el cauce. Además, las muestras serán recogidas de forma que sean proporcionales al flujo principal de la corriente. En aquellos ríos o arroyos donde se pretenda muestrear o caracterizar la posible influencia de un tributario o descarga procedente de aguas que puedan estar contaminadas, debe recogerse una muestra aguas arriba y otra aguas abajo de la descarga.

- **Muestreo en lagos o lagunas**

Debido al reducido o inexistente flujo en estos ambientes, existe una tendencia a la estratificación de las aguas muy acusada, lo que exige normalmente un muestreo mayor que en el caso anterior para representar las condiciones existentes. Por ejemplo, si la estratificación es debida a diferencias de temperatura del agua (como en el caso de un río de aguas más frías que descargue a un lago cuya temperatura del agua sea mayor), será necesaria la toma de muestras procedente de las diferentes capas por separado. La estratificación se determinará mediante la medida de temperatura, conductividad, pH y perfiles verticales de oxígeno disuelto. Del mismo modo, también será un factor a tener en cuenta la profundidad de la lámina de agua.

Existen actualmente diversos sistemas y equipos preparados específicamente para el muestreo de aguas superficiales, de los cuales se van a describir a continuación brevemente los más utilizados. La elección del equipo dependerá principalmente del ambiente a muestrear, así como de la analítica requerida para las muestras. La mayoría de equipos se encuentran disponible en materiales diversos tales como acero inoxidable, cristal, PVC o teflón.

5.4.2. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO DE AGUAS SUPERFICIALES

5.4.2.1. Muestreadores Kemmerer

Los muestreadores o botellas Kemmerer son cilindros metálicos que llevan unas válvulas, las cuales se abren cuando el aparato es descendido en posición vertical permitiendo el libre paso del agua al interior del cilindro hasta llegar a la profundidad escogida para la toma de muestras. Un mensajero que corre a través del cable de suspensión de la botella, cierra las válvulas cuando es liberado a la profundidad elegida, quedando la muestra en el interior del cilindro.

Las botellas Kemmerer se utilizan principalmente en situaciones donde el acceso al lugar de muestreo se realiza desde un bote o un puente, y cuando es necesario el muestreo en profundidad.

Una variante de los muestreadores Kemmerer son los muestreadores Van Dorn, que son de tipo plástico y descienden en posición horizontal. Algunos modelos se encuentran revestidos de teflón, con lo que es posible utilizarlos para el muestreo de compuestos orgánicos.



Figura N° 50. Muestreador Kemmerer

5.4.2.2. Muestreador de bomba Bacon

Es un muestreador similar a los anteriores, pero en este caso el sistema de apertura/cierre de el cilindro o recipiente para la muestra está controlado desde la superficie mediante un cable que acciona un resorte. El resorte libera el mecanismo de apertura consistente en una válvula, que puede ser igualmente cerrado desde la superficie tras la entrada del agua al muestreador, para evitar la mezcla con aguas de otras profundidades.

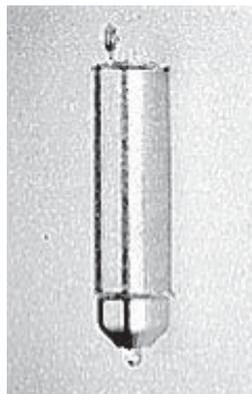


Figura N° 51. Muestreador de bomba Bacon. Fuente: EPA

Existen otros métodos de extraer muestras de aguas superficiales, como son el método directo, mediante el cual se sumerge el recipiente de muestreo directamente bajo la superficie del agua, o las botellas lastradas, las cuales se

sumergen mediante una cuerda o cable hasta la profundidad elegida, teniendo en cuenta que en este caso al ascender la botella, su contenido podrá mezclarse con las aguas que encuentre durante su recorrido. Otros equipos utilizan sistemas de pesos que invierten la botella cuando ha llegado a la profundidad deseada. También en ocasiones se utilizan pequeñas bombas peristálticas para la extracción de muestras a través de un tubo de teflón que se desciende hasta la profundidad de muestreo.

Las precauciones o recomendaciones más importantes respecto a la toma de muestras en aguas superficiales se centran en las siguientes:

- en caso de ser posible, la toma de muestras en ríos, corrientes, etc., debe realizarse cerca o en una estación de aforo existente, pudiéndose relacionar la descarga del río posteriormente con la muestra. En caso de no existir, se deberá medir la velocidad del flujo mediante diversas técnicas existentes.
- las tomas de muestras deben extraerse de una zona donde el flujo sea representativo de las características direccionales, de velocidad, etc., de la corriente a muestrear.
- los equipos de muestreo deben ser descendidos con el máximo cuidado bajo la superficie del agua, para evitar provocar turbulencias y la mezcla del agua con los sedimentos, lo que redundaría en una mayor turbidez de la muestra.
- en la toma de muestras de aguas superficiales, a no ser que el propio plan de muestreo lo especifique, se debe evitar la extracción de muestras en los márgenes, ya sea de ríos o lagunas, pues pueden no ser representativas de toda la lámina de agua.
- se deben seguir similares precauciones en cuanto a la limpieza y manejo de los equipos de muestreo y de las muestras que las contempladas en anteriores capítulos.

5.5. TOMA DE MUESTRAS DE RESIDUOS LÍQUIDOS

La toma de muestras de residuos líquidos se dirige principalmente al muestreo de aquellos materiales producto de una actividad industrial que puedan encontrarse en forma líquida o de lodos, y de los que se desconocen sus características. Este tipo de muestreo presenta importantes diferencias con los descritos anteriormente para la fase líquida, y requieren unos procedimientos diferentes a las muestras de tipo ambiental en base a su potencial toxicidad y peligro. Las principales diferencias están determinadas por dos características:

- requerimientos personales de seguridad en cuanto al manejo y extracción de muestras, incluyendo procedimientos, vestimenta, etc.
- requerimientos especiales de transporte de muestras, ya que no pueden ser transportadas como el resto de muestras descritas debido a su carácter.

Los elementos más comúnmente caracterizados a través de los muestreos de residuos líquidos corresponden con tanques y depósitos superficiales o enterrados, bidones, etc.

5.5.1. PROCEDIMIENTOS GENERALES

Las operaciones que se deben llevar a cabo para el muestreo de residuos líquidos incluyen en su caso, la excavación y desenterrado de aquellos elementos que no se encuentren en superficie (bidones), la inspección exterior de los envases (ya sean depósitos, bidones, etc.) y su estado (con el objeto de averiguar posibles características de los residuos que se encuentran en su interior), el almacenamiento por separado de los residuos según hayan sido clasificados, la apertura de los recipientes y por último, el muestreo final de la fase líquida.

Como procedimiento general, las muestras de residuos líquidos no serán preservadas en campo, al poder reaccionar con el conservante o reactivo. Deberán ser conservadas en frío, así como protegidas de la radiación solar para minimizar cualquier posible reacción debida a sensibilidad a la luz. Los recipientes de muestreo suelen ser típicamente jarras o botes dotados de un tapón ancho con teflón. El laboratorio debe determinar el volumen necesario de muestra en dependencia de la analítica requerida.

A continuación se describirán brevemente algunos procedimientos a seguir antes de la toma de muestras:

- **Excavación de los recipientes (bidones enterrados)**

Los recipientes que se encuentren enterrados (existen diversas técnicas geofísicas para la detección) deben ser excavados y extraídos por personal experimentado en el desenterrado de bidones. Los equipos de excavación deben estar dotados de elementos que no puedan provocar chispas en las inmediaciones de la excavación, y en el terreno alrededor de los residuos o bidones se debe excavar mediante técnicas manuales. Cualquier bidón que presente señales de rotura, o que se encuentre abombado no debe ser movi-

do, ante el peligro de un derrame o de explosión. Los depósitos enterrados no deben ser excavados y extraídos del terreno ante posibles roturas y derrames accidentales procedentes de tuberías o roturas del depósito.

- **Inspección y almacenamiento**

Durante la inspección debe anotarse cualquier señal identificativa del bidón o depósito (indicativos de peligro, explosivo, radioactivo, inflamable, tóxico, etc.), así como las condiciones de éstos (corrosión, escapes, abolladuras, punciones, etc.). Se deben realizar asimismo (en función de los posibles residuos generados por la industria) mediciones en el exterior de radioactividad, vapores orgánicos, explosividad, etc. En el caso de los bidones o similares se clasificarán según su continente o características y almacenarán separados por grupos. Hay que tener en cuenta también que en muchas ocasiones las etiquetas identificativas de bidones pueden contener productos distintos a los señalados, o no describir con exactitud su contenido.

- **Apertura de bidones y depósitos**

Este es el procedimiento más peligroso de los mencionados, por lo que debe ser llevado a cabo con suficientes medidas de seguridad. En lo posible, el personal que vaya a realizar la apertura de los bidones o depósitos debe presentar una dilatada experiencia en estas labores.

Para la apertura de bidones y depósitos existen en la actualidad numerosas herramientas especialmente adaptadas y específicas para este tipo de recipientes, de tipo manual, y neumáticas e hidráulicas a distancia. Tras la apertura se medirán de nuevo explosividad o presencia de vapores orgánicos, y nunca se trabajará cuando existan niveles en los medidores por encima de 25% LEL (Límite inferior de explosividad), debiendo esperarse para el muestreo a que estos valores desciendan por debajo del 10% LEL

5.5.2. EQUIPOS Y SISTEMAS DE MUESTREO

Muchos de los equipos o sistemas de muestreo utilizados son similares a los que se emplean para otros tipos de muestreos de fase líquida, y entre ellos se pueden mencionar los siguientes como más característicos.

5.5.2.1. Tubo de vidrio y bailer

El tubo de vidrio es simplemente un tubo tipo pipeta abierto el cual se introduce en el bidón o depósito hasta la profundidad requerida, siendo tapa-

do con un dedo en su parte superior cuando la muestra se encuentre en su interior, traspasándola posteriormente al recipiente adecuado. Su longitud aproximada es de 120 cm, con diámetros típicos entre 6-16 mm. Se deben utilizar guantes en todas estas operaciones. El bailer o tomamuestras cilíndrico ha sido ya descrito en capítulos anteriores. La mayor ventaja de estos muestreadores reside en su coste y carácter desechable, teniendo en cuenta que en virtud de los residuos que puedan estar presentes su descontaminación en campo será dificultosa.

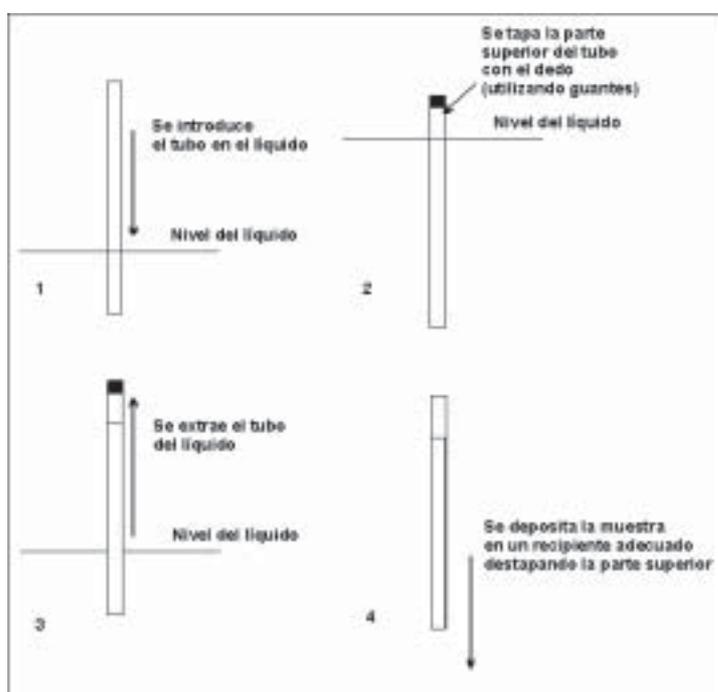


Figura N° 52. Muestreo mediante tubo de vidrio

5.5.2.2. Muestreador Coliwasa

Este muestreador es utilizado para la toma de muestras compuestas de residuos líquidos (COMPOSITE LIQUID WASTE SAMPLER). Está diseñado para extraer la muestra de toda la profundidad de un bidón o depósito, por lo que permite la toma de muestras representativas de residuos líquidos que presenten multifases. Su diseño típico es un tubo a través del cual corre una barra que conecta con un tapón de cierre/apertura de neopreno en su extremo inferior, la barra interna está unida a un mango en T que es manipulado por el técnico de muestreo, abriendo y cerrando el tapón a voluntad desde el exterior del recipiente. Su longitud habitual es de 152 cm con diámetro de 4 cm. Su desventaja radica en la dificultad de descontaminarlo tras la toma de muestras,

por lo que debe emplearse preferentemente si la toma de muestras es de multifases. Actualmente es posible encontrar muestreadores Coliwasa de tipo desechable.

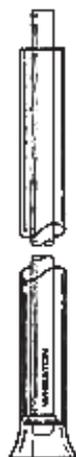


Figura N° 53. Muestreador Coliwasa.

5.5.2.3. Muestreador de bomba Bacon

Es el mismo muestreador que ha sido descrito para el muestreo de aguas superficiales, aplicado en este caso a este tipo de muestreo.

5.5.2.4. Muestreador subsuperficial

Consiste típicamente en un tubo de aluminio o acero inoxidable conectado a un recipiente de 1 litro a través de una rosca con teflón o polipropileno. El tubo cierra o abre la entrada de líquido a la botella mediante una válvula de muelle, por lo que la muestra puede ser tomada a diferentes profundidades.

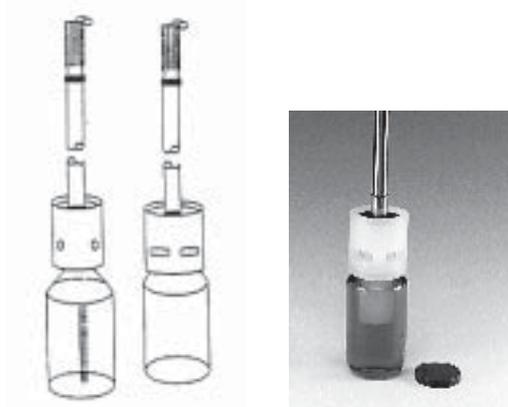


Figura N° 54: Muestreador subsuperficial

6. TOMA DE MUESTRAS DE LA FASE GASEOSA

6.1. INTRODUCCIÓN

La toma de muestras de la fase gaseosa comprende en el presente capítulo tanto el muestreo de la fase gaseosa o aire intersticial del suelo, como el muestreo de aire ambiente.

Los muestreos de aire ambiente difieren en sus características de los descritos hasta el momento, ya que poseen condicionantes y factores distintos a otros medios, debido al gran dinamismo de los componentes o elementos que los definen. Resultan determinantes sobretudo en estudios o investigaciones destinados a definir el grado de afección a la salud humana (ambiente interior).

El muestreo de gas intersticial del suelo es una técnica más reciente que las anteriores, para la que se han desarrollado diversos métodos de muestreo y detección.

La detección de compuestos volátiles en el suelo proporciona, de forma rápida y económica, información acerca de la superficie afectada por la contaminación, por lo que suele constituir una herramienta de optimización para los muestreos.

En cualquier caso se deben conocer las características de los componentes o compuestos que van a muestrearse, al presentar en muchos caso diferencias de comportamiento en dependencia de la fase en que se encuentren (líquida o gaseosa). Por ello no siempre es posible correlacionar la presencia de unos compuestos existentes en determinadas concentraciones en la fase gaseosa con la concentración de los mismos en las aguas subterráneas.

6.2. MUESTREO DEL AIRE INTERSTICIAL DEL SUELO

El objetivo de la toma de muestras de gas intersticial es la obtención de muestras representativas, es decir, muestras cuya composición y concentración en gases sean similares a las presentes a la profundidad a la que se han tomado las mismas. Para asegurar su representatividad se deben purgar los equipos de muestreo, recomendándose una vez más que se extremen las medidas de limpieza del equipo.

El muestreo del aire intersticial puede ser llevado a cabo mediante sistemas pasivos o mediante sondas de muestreo. También es posible muestrear la fase

gaseosa en pozos de control ya contruidos especialmente para muestreos de gas o para gas y agua subterránea. En estos pozos de control será posible únicamente el muestreo de compuestos volátiles. Los pozos de control contruidos especialmente para esta actividad son de diseño similar a los realizados para aguas subterráneas, en cuanto a filtros de grava, sellado, etc. aunque suelen ser de diámetro menor (2,5-5 cm); en ellos se realiza normalmente el muestreo mediante bombas de vacío. En cualquier caso, la construcción de pozos de control especiales para el muestreo de gas presenta unos elevados costes en relación a su efectividad, ya que necesitan similares equipos de perforación y accesorios que los pozos de control de aguas subterráneas, y son normalmente poco prácticos cuando se desea conocer la difusión de la contaminación en un área, pues obliga a la construcción de gran número de ellos para poder realizar un mapeo o “screening”. De este modo, y en los casos posibles, se emplean sondas especiales o sistemas pasivos para el muestreo de gas como actuación más efectiva y común.

6.2.1. PRECAUCIONES GENERALES EN EL MUESTREO DE AIRE INTERSTICIAL

Existen diversos problemas, tanto procedentes de las condiciones ambientales, como de procedimientos no correctos, que pueden afectar a los muestreos de aire intersticial:

- Los instrumentos detectores de gases in-situ pueden verse afectados por condiciones ambientales tales como la humedad del suelo (empañando la lámpara y reduciendo la sensibilidad del aparato), temperaturas extremas, etc., o por otros factores tales como la presencia de campos eléctricos, interferencias de ondas de FM.
- la calibración de los instrumentos debe ser llevada a cabo mediante los procedimientos estándar de calibración para cada instrumento y éstos deben ser seguidos con rigurosidad, pues una falsa calibración proporcionará datos erróneos a las consiguientes mediciones.
- los contaminantes pueden verse absorbidos por compuestos inorgánicos del suelo o disueltos en los componentes orgánicos de éste, lo que afectará las concentraciones detectadas. La cantidad de espacios o huecos en la matriz del suelo afectará también a la recarga de gas en los pozos de control. La existencia de zonas saturadas colgadas o de una capa impermeable también puede afectar al muestreo. Por todos estos elementos, es necesario también conocer las condiciones geológicas del terreno, al objeto de que el muestreo sea representativo.

- un problema muy usual consiste en el taponado de la sonda de muestreo, lo que es detectable mediante el cambio en el sonido de trabajo de la bomba de extracción de la muestra o mediante medidores de vacío internos; este problema se elimina normalmente utilizando un cable o alambre para limpiar la sonda.
- la sonda puede poseer contaminación, que debe ser extraída mediante el bombeo de aire a su través o la limpieza en caso de persistir la contaminación mediante metanol y agua.

6.2.2. SISTEMAS PASIVOS DE MUESTREO

Son fundamentalmente materiales o medios absorbentes que se entierran in-situ (usualmente varillas impregnadas de carbón vegetal o de algún elemento absorbente específico) por un periodo de tiempo que va desde días a semanas. La varilla o elemento colector es posteriormente desenterrado y analizado para compuestos orgánicos volátiles en laboratorio. Este sistema de muestreo presenta las siguientes limitaciones:

- una insuficiente exposición puede proporcionar resultados falsos o negativos.
- la sobreexposición puede enmascarar diferencias relativas de contaminación en puntos de muestreo distintos.
- resulta difícil obtener perfiles verticales de concentración de contaminantes en el suelo.
- puede no detectar aquellos contaminantes que no se encuentran en fase vapor, como los metales pesados.
- la capacidad de detección de compuestos que presentan gran adherencia a los suelos, como los PCBs y pesticidas es bastante reducida.

Actualmente se han desarrollado sistemas para realizar el control y seguimiento de los gases existentes en determinadas superficies o áreas de investigación, en los que las varillas o apéndices son introducidos en el suelo a profundidades de hasta 1 m, para posteriormente ser extraídos y analizados, pudiéndose determinar las concentraciones de gases contaminantes en amplias zonas, lo que permite utilizar sistemas informáticos para la modelización o la representación gráfica de la pluma contaminante.

6.2.3. SISTEMAS ACTIVOS DE MUESTREO

El muestreo de gas intersticial mediante sondas consiste en la introducción de modo manual o mecánico de sondas hasta la profundidad deseada, desde donde se extraerá la muestra mediante algún tipo de bomba, para ser posteriormente traspasada a un recipiente o medio receptor absorbente adecuado (tubos Tenax, bolsas Tedlar, etc.) para su envío a laboratorio, o medida mediante analizadores o detectores de campo (ver capítulo 7).

6.2.3.1. Sonda manual de muestreo

Tradicionalmente para el muestreo se utiliza una sonda consistente en una barra hueca, en cuyo interior se aloja un tubo de teflón a través del cual se aspira el gas mediante una bomba manual, recogándose éste en el extremo inferior de la sonda en tubos de carbón activo, (ver Figura N° 55). La sonda es introducida en el suelo mediante golpeo hasta la profundidad deseada. La punta de la sonda se encuentra cerrada durante el descenso de ésta debido al avance, y puede ser abierta al llegar a la profundidad de muestreo mediante una pequeña subida de la sonda. A continuación se introducirá a través del interior del tubo hueco de la sonda el tubo de extracción junto con su cámara de recogida o tubo de carbón activo, que será conectado a un casquillo. El aire intersticial será extraído mediante bombeo de vacío y quedará absorbido en el tubo de carbón activo, el cual deberá ser tapado por ambos extremos una vez absorbida la muestra y etiquetado para su análisis posterior. Para cada compuesto que se desea analizar se necesita tomar una muestra. Esta sonda se utiliza también para realizar mediciones in situ mediante tubos colorimétricos, con los que puede conocerse en campo, de forma semicuantitativa, las concentraciones de los gases analizados. Este tipo de muestreo no permite alcanzar grandes profundidades debido a sus características (golpeo de la sonda), pero es un método muy útil para la caracterización de la dispersión de la contaminación en zonas extensas.

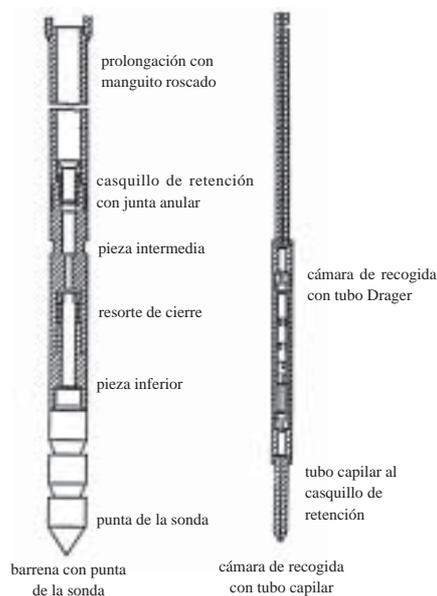


Figura N° 55. Sonda Stitz de Dräger. Fuente: catálogo Dräger

6.2.3.2. Sonda mecánica de muestreo

Para el muestreo de gas a mayor profundidad, hasta los 15 m, se ha desarrollado métodos basados en similares principios de funcionamiento que los sondeos a percusión.

Este sistema se encuentra habitualmente instalado en un pequeño camión de tracción a las cuatro ruedas y dotado de un martillo interno en el sistema de perforación. Las varillas son introducidas en el suelo mediante empuje, utilizándose en los casos necesarios el martillo percutor para facilitar el avance.

El método consiste en acoplar una barra en el extremo inferior del instrumental de perforación, en la que se aloja un dispositivo denominado “de punta perdida”, y que por su extremo superior se acopla igualmente al martillo percutor a una barra de extensión hueca. Estas barras, de alrededor de 1 m de longitud, se pueden unir entre sí hasta alcanzar la profundidad deseada con un máximo de unos 15 m. El dispositivo de punta perdida es una válvula que permite el paso del gas hacia el interior de las barras una vez accionado. Cuando se ha alcanzado la profundidad deseada se procede a la extracción de la muestra de gas intersticial. Estas sondas han sido muy desarrolladas y actualmente son útiles asimismo para el muestreo de aguas subterráneas y suelos.

El procedimiento de muestreo consta de las siguientes fases:

- Penetración o clavado mediante martilleo de las barras de sondeo hasta la profundidad deseada (en dependencia de las características del terreno).
- Acoplamiento del sistema de purga.
- Purga del conjunto de barras de sondeo.
- Muestreo y/o detección de los compuestos volátiles.
- Extracción de las barras de sondeo.

Para llevarlo a cabo se coloca la barra con la punta perdida verticalmente en el suelo y se clava en el mismo, conectándose barras de extensión a medida que se introduce en el suelo. Durante el proceso deben extremarse las precauciones para evitar roturas, inclinaciones o simplemente desconexiones de las barras que motivarían la pérdida o rotura del equipo.

Una vez alcanzada la profundidad de muestreo se debe proceder a colocar el sistema de purga y a continuación al purgado del equipo, para lo cual se dispondrá de una bomba de vacío y un manómetro.

Normalmente se recomienda que el volumen purgado sea tres veces el volumen del equipo de muestreo con el fin de asegurar que la muestra obtenida sea real.

El volumen de gas a purgar, se relaciona con el volumen de aire introducido con el equipo de muestreo y la presión existente en el suelo, dado que la presión externa es la atmosférica (1 atm) y la temperatura se mantiene constante durante todo el proceso. El volumen de gas viene dado por la fórmula:

$$V_{\text{gas}} = 3 \cdot V_{\text{equipo}} / 1 - P_{\text{man}}$$

V_{gas} = Volumen de gas a purgar (ml).

V_{equipo} = Volumen de aire introducido con el equipo de muestreo (ml).

P_{man} = Presión de vacío leída en el manómetro. Como lo que interesa es la presión residual remanente en el suelo, el cociente de la ecuación será $1 - p_{\text{man}}$ (ya que se considera que la presión exterior es 1 atm).

El tiempo necesario para realizar la purga se calcula mediante la fórmula:

$$T = V_{\text{gas}} / Q_{\text{bomba}}$$

T = Tiempo (min).

V_{gas} = Volumen de gas (ml).

Q_{bomba} = Caudal de la bomba (ml/min).

Con la purga se intenta asegurar que la concentración en compuestos orgánicos del gas en la parte superior del sistema de barras sea similar a la concentración en el entorno de la punta perdida. A continuación se procede a la recogida de la muestra.

Una vez recogida la muestra se extraen las barras mediante un sistema de elevación y sujeción, similar al que se utiliza en los sistemas de perforación a percusión.



Figura N° 56. Sonda Geoprobe. Fuente: Geoprobe Systems

Las formas de muestreo hasta ahora descritos denominadas activas tienen el inconveniente de que a pesar del purgado no permiten asegurar con absoluta certeza que no se hayan producido modificaciones en las concentraciones puntuales de los compuestos volátiles, al producirse o al efectuarse el bombeo a través de la sonda.

6.2.4. SISTEMA PARA LA RECOGIDA Y ALMACENAMIENTO DE GAS

A continuación se describen los dispositivos más habituales que permiten el almacenamiento de gas:

- Recipientes de vidrio. Pueden ser jeringas o botellas. Permiten muestreos sencillos y seguros porque los compuestos orgánicos volátiles no se difunden a través de las paredes del recipiente. Además con las jeringas el muestreo es rápido debido a su pequeño volumen. Para obtener la muestra con una jeringa se acopla a ésta una aguja que se introduce en una boquilla de extracción, que se abre mediante una llave y permite el paso del gas. Si la muestra se quiere tomar en una botella se habrá tenido que hacer previamente el vacío de la misma. La ventaja de la botella es que permite su transporte pero como desventaja presenta el inconveniente de necesitar una jeringa para su llenado.
- Agentes absorbentes como el carbón activo, tenax, etc. Son pequeños tubos cilíndricos en cuyo interior se encuentra una sustancia absorbente a la que se adhieren los gases cuando pasan a través de los tubos. La toma de muestras se lleva a cabo conectando el tubo del absorbente en la sonda de extracción. Existen diversos tipos de tubos en función de la sustancia que se utiliza como absorbente o de la analítica que se va a realizar a continuación en laboratorio.
- Bolsas Tedlar, bolsas herméticas especiales de recepción y transporte en las que se introducen los gases aspirados. La bolsa Tedlar se encuentra en el interior de una cámara o caja donde se realiza el vacío a través de una bomba. La caja se encuentra conectada a la sonda de extracción de la muestra, por lo que al realizarse el vacío en la cámara, la presión diferencial hace que la bolsa Tedlar se hinche absorbiendo el gas a través de la sonda de muestreo (Ver Figura N° 57). En todos los casos en los que se utilice una bomba peristáltica para el almacenamiento de gas, ésta deberá ser de caudal regulable, para conocer exactamente el volumen de gas bombeado y recogido.



Figura N° 57. Muestreo mediante bomba de vacío y bolsa Tedlar. Fuente: EPA

Un caso particular es la toma de muestras de gas disuelto en agua, que se lleva a cabo disolviendo el gas en agua limpia (analizada previamente) y haciéndola pasar por un borboteador conectado a una bomba que regula el borboteo. Periódicamente se analiza el agua recogida.

6.3. MUESTREO DEL AIRE AMBIENTE

El muestreo de aire ambiente se va a referir en la presente Guía preferentemente al muestreo del ambiente interior, en aquellos emplazamientos en que la contaminación presente en los suelos puede producir la migración de gases a través de las diferentes capas del terreno, llegando a afectar a zonas aledañas en las cuales pueda generarse un riesgo para la salud. Este tipo de emplazamientos es por ejemplo, los casos de derrames de hidrocarburos, o los gases procedentes de vertederos. No se incluye por tanto, aquellos muestreos de tipo atmosférico, en los cuales los factores que intervienen son variados y complejos, y no son objeto de la presente Guía.

Las mediciones de aire ambiente también implican dos conceptos diferentes:

- Medición o detección, que se define como la lectura directa mediante instrumentos o equipos que proporcionan una información en tiempo real de los niveles de contaminantes en el aire ambiente. Entre ellos se podrían citar el detector de fotoionización (P.I.D) o el detector de ionización por llama (F.I.D.), así como los explosímetros, todos ellos equipos típicamente empleados en estas actividades. Estos aparatos de medición instantánea serán descritos con mayor profundidad en el Capítulo 7 (Técnicas y equipos auxiliares para el diagnóstico).
- Muestreo del aire ambiente, que son aquellas técnicas analíticas y de muestreo que requieren un análisis ya sea on-site u off-site, pero que normalmente no proporcionan resultados inmediatos. El muestreo de aire ambiente o de sus contaminantes se lleva a cabo habitualmente tras el empleo de los detectores instantáneos, que proporciona una reducción consiguiente de los posibles contaminantes presentes, así como una medida cualitativa de la concentración de éstos. De este modo las técnicas de muestreo del aire ambiente se llevan a cabo con la finalidad de detectar, identificar y cuantificar compuestos químicos específicos con mayor seguridad que la mayoría de técnicas de detección instantánea.

6.3.1. PRECAUCIONES GENERALES EN EL MUESTREO DE AIRE AMBIENTE

Existen diversos factores potenciales que pueden afectar o interferir durante los muestreos de aire ambiente a los instrumentos empleados para estas actividades. A continuación se describen brevemente algunos de ellos:

- Ubicación del muestreo, que debe estar situado en puntos representativos de las condiciones en que se encuentra el emplazamiento.
- Fotoreactividad o reacción de parámetros de medición y muestreo con componentes no relacionados, p.e. componentes del nitrógeno con hidrocarburos poliaromáticos (PAH's). Por ello muchos tipos de soportes absorbentes de muestras no deben ser expuestos a la luz durante o tras el muestreo.
- Factores medioambientales tales como la humedad, temperatura o presión, pueden impactar en la eficiencia del muestreo y en los niveles de detección de los instrumentos. Muchos aparatos pueden ser sensibles a la humedad o a temperaturas extremas.

- Incorrecto manejo o calibración de los aparatos de medida y/o muestreo, ya que en ocasiones la propia calibración de éstos exige ser llevada por procedimientos específicos o en base a una experiencia anterior en su manejo.

6.3.2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE AIRE AMBIENTE

Estos equipos se pueden dividir en instrumentos portátiles de barrido (mediciones de contaminantes de tipo cualitativas) o instrumentos de analítica especializada (mediciones cuantitativas). Algunos de ellos (los más frecuentemente utilizados) serán descritos en el capítulo 7 en mayor profundidad, pero se realiza a continuación una breve descripción de los más comunes:

6.3.2.1. Instrumentos de determinación cualitativa

- Medidores de compuestos orgánicos volátiles: PID, FID, determinaciones relativas por fotoionización.
- Medidores de vapores orgánicos: OVA.
- Explosímetros o medidores de gases combustibles, que son detectores aplicados a atmósferas explosivas, miden en porcentajes LEL respecto al gas de calibración.
- Medidores de compuestos específicos, como monóxido de carbono, dióxido sulfúrico, etc.
- Detectores químicos (tubos colorimétricos), son tubos rellenos de un material inerte impregnado con diversas sustancias químicas que reaccionan con los contaminantes presentes en el aire cuando éste es aspirado al interior del tubo, provocando cambios de color.

6.3.2.2. Instrumentos de determinación cuantitativa

- Cromatógrafos de gas portátiles (GC), basados en el principio del tiempo que tarda un compuesto en moverse a través de una columna cromatográfica.
- Espectrómetro de masas (MS), basado en la masa de átomos o moléculas que se encuentran en un compuesto, se utiliza habitualmente en combinación con el anterior instrumento.

Algunos de estos instrumentos pueden ser utilizados mediante registradores en continuo que impiden que el personal de muestreo se deba encontrar permanentemente junto a la fuente de contaminación.

6.3.3. EQUIPOS Y ACCESORIOS DE MUESTREO DE AIRE AMBIENTE

Como se describió anteriormente, estos equipos no son instrumentos de medida en tiempo real o semi-real como los anteriores, sino que se corresponden con aparatos específicos de muestreo, obteniéndose los resultados de las muestras posteriormente en laboratorio. Entre ellos, y ante la gran variedad de modelos de muestreadores y bombas de muestreo existentes en la actualidad, sería posible citar:

- Muestreadores PS-1 de alto volumen, que hacen atravesar la muestra a través de una espuma de poliuretano o de una resina especial y un filtro de cristal de cuarzo, este sistema es muy empleado para el muestreo de bajas concentraciones de semivolátiles, PCBs, pesticidas o dioxinas cloradas en aire ambiente. Se emplean también para el muestreo de aire intersticial.
- Bombas de muestreo de áreas, que poseen un mástil telescópico de muestreo. Son utilizadas sobretodo para muestreo de asbestos, así como para metales, pesticidas y PAHs que requieren volúmenes altos de muestreo.
- Muestreadores personales, pequeñas bombas que emplean diferentes medios de muestreo (tubos de resina, filtros, etc.) y de caudales ajustables entre 0,1-4 l/min.
- Recipientes de muestreo en vacío, son recipientes en los cuales se ha realizado el vacío y que mediante un regulador de entrada serán conectados a la muestra, que pasará a su interior por diferencia de presiones hasta que éstas se igualen.

Los medios o accesorios de muestreo para aire ambiente pueden ser filtros absorbentes, bolsas especiales de muestreo (Tedlar, Rilsan), tubos absorbentes, etc. , que varían según los compuestos que se pretende analizar, entre ellos los más habitualmente utilizados son los siguientes:

- Bolsas Tedlar, se utilizan junto a una bomba de muestreo y una caja de vacío en la que se encuentra la bolsa Tedlar; la bomba extrae el aire de una cámara de vacío y crea una presión diferencial que introduce el aire a través de un tubo de teflón en la bolsa Tedlar . Se emplean en muestreos

tanto de volátiles como de compuestos semivolátiles, halogenados o no.

- Tubos Tenax/CMS, se utilizan junto a una bomba muestreadora personal, además de un rotámetro para calibración y ajuste de caudal. Los tubos contienen un compuesto químico inerte de tipo granular (carbón activo) con propiedades absorbentes, y se utilizan principalmente para compuestos orgánicos volátiles, que son retenidos al entrar y pasar a través del tubo impelidos por la bomba, mientras que la mayor parte de constituyentes atmosféricos de tipo inorgánico no quedan retenidos en el tubo.
- Tubos de carbón vegetal (Charcoal tubes), con similar principio de funcionamiento que los anteriores, presenta gran selectividad hacia los disolventes orgánicos no polares como el clorobenceno, tolueno, etc.
- Filtros MCE (ésteres de celulosa mezclados), son filtros de éster de celulosa mezcla de nitrocelulosa y acetato de celulosa a través de los cuales se bombea el aire mediante una bomba de bajo o medio volumen y un regulador de caudal de aire; se utilizan principalmente para el muestreo de metales.

Debido a la gran variedad de compuestos que pueden ser analizados, así como los diferentes equipos existentes y la diversidad de técnicas, medios y procedimientos de medición, muestreo y analítica que pueden emplearse, los muestreos de aire ambiente deben adaptarse específicamente al emplazamiento objeto de la investigación. Los equipos empleados poseerán unos procedimientos de calibración y utilización específicos para cada uno de ellos, por lo que el muestreo de aire ambiente suele exigir un grado de experiencia mayor que para otros medios descritos. Los muestreos de aire ambiente suelen llevar asociados costes elevados, tanto en relación a los instrumentos, equipos y accesorios empleados, como en la posterior analítica requerida.

7. TÉCNICAS Y EQUIPOS AUXILIARES PARA EL DIAGNÓSTICO

7.1. INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de un emplazamiento potencialmente contaminado es complejo y se encuentra sujeto a diferentes consideraciones y factores limitantes. La determinación de las fuentes de contaminación, vías de dispersión de ésta, tipos de contaminantes, y posibles afecciones sobre los distintos medios, debe ser necesariamente evaluada en base a datos que por una parte sean suficientes para realizar la evaluación, y que simultáneamente correspondan con la situación real existente. Los resultados analíticos procedentes de la toma de muestras de los distintos medios serán por ello de vital importancia en una investigación. Cada vez con mayor frecuencia se emplean para la investigación de emplazamientos contaminados instrumentos o equipos auxiliares para el diagnóstico in-situ de la contaminación, los cuales proporcionarán algunas ventajas al desarrollo del estudio:

- Identificación instantánea de posibles contaminantes y fuentes de contaminación.
- Medición en tiempo real de la presencia de contaminantes (ya sea cualitativa o cuantitativamente).
- Optimización de la toma de muestras y analítica a realizar, en cuanto al número necesario y ubicación de las muestras.
- Posibilidad de una planificación dinámica en función de los resultados que se vayan obteniendo, sin tenerse que esperar a los resultados analíticos de laboratorio.
- Análisis comparativo de parámetros en campo y en laboratorio.
- Determinación instantánea de las condiciones de seguridad existentes y de los posibles riesgos para la salud.

Los equipos y técnicas utilizadas suelen tener costes asociados altos sin van a ser empleados para un uso puntual en un emplazamiento, por lo que deben ser determinados como una inversión a medio o largo plazo que aportará las ventajas antes mencionadas a las investigaciones y reducirá con el tiempo los costes asociados a otros conceptos, además de representar mediante buenos procedimientos de actuación, una mejora de la calidad de las investigaciones.

A continuación se van a describir algunos de los instrumentos más utilizados en campo, habiéndose dividido éstos en los enfocados hacia determinación de metales, determinación de compuestos orgánicos volátiles y otros equipos destinados a medición de explosivos.

7.2 . TÉCNICAS Y EQUIPOS PARA EVALUACIÓN DE METALES

La determinación de metales en campo puede llevarse a cabo mediante la técnica de Espectroscopia de Fluorescencia por Rayos X. El instrumento o sonda habitualmente utilizado en la aplicación de esta técnica puede ser de tipo portátil, existiendo diversos modelos disponibles.

Principio de funcionamiento:

Este detector emplea como fuente diversos isótopos radiactivos (ej. Fe-55, Cd-109, Am-241) para la producción de rayos X primarios, que emiten en un rango energético específico de rayos X. Los compuestos que van a ser analizados producen una respuesta en forma de rayos X de fluorescencia, al excitarse tras absorber el haz emitido por los isótopos. Esta respuesta es recibida a través de un detector de berilio y convertida en pulsos eléctricos, cuya amplitud es proporcional a la energía. Un analizador electrónico de canal múltiple mide estas amplitudes de pulsos y los compara ante patrones estándar, que son la base del análisis cualitativo de Rayos X. La utilización de distintos isótopos radiactivos o cambios de la sonda del sistema analítico permiten realizar analíticas de elementos de diferentes rangos de número atómico y características. La muestra se coloca en la sonda de detección tapándola por completo y las lecturas se muestran en la pantalla del instrumento, pudiendo también ser memorizadas en éste.

Aplicaciones:

- Detección de metales pesados en suelo (muestras extraídas de la superficie o procedentes de perforaciones), y líquidos (por ejemplo, plomo en gasolina).
- Detección de elementos ligeros en líquidos (por ejemplo fósforo, azufre, cloro, en soluciones orgánicas).
- Detección de metales pesados en efluentes líquidos industriales.
- Detección de PCBs en aceites de transformadores.
- Detección de metales pesados en partículas en aire, recogidos en filtros de membrana mediante muestreadores personales o de alto volumen.

Potenciales problemas o interferencias:

- Ubicación de la muestra, es una potencial fuente de error ya que la señal de rayos X decrece con el aumento de la distancia a la fuente radiactiva.
- Representatividad de la muestra, que debe ser de tipo homogéneo.
- Interferencias provocadas por distintos elementos entre sí, que pueden solapar las respuestas o medidas individuales; esto se evita mediante modelos matemáticos y calibraciones especiales.
- Efectos debidos a la morfología de la muestra, como muy diferentes tamaños de partícula o uniformidad de la matriz, pueden redundar en diferentes mediciones para dos muestras de similar composición química.
- Contenido en humedad de las muestras.

Existen también una serie de **precauciones de uso** que deben ser contempladas:

- La sonda debe estar siempre en contacto con la superficie del material a analizar, el cual debe cubrir la totalidad de apertura de luz de la sonda cuando el disparador de rayos sea abierto.
- Bajo ninguna circunstancia se debe dirigir la sonda hacia uno mismo o hacia personal adyacente con el disparador abierto.
- La sonda debe ser revisada de acuerdo con las especificaciones de las instrucciones de operación.
- La sonda debe mantenerse a una distancia mínima de 3 m a monitores de ordenador o cualquier fuente de radiofrecuencia.
- La sonda no debe ser sometida a temperaturas extremas, cuyo rango varía en función del modelo.

Ventajas y limitaciones:

Estos detectores se aplican muy bien a materiales de tipo sólido como suelos, pero presentan limitaciones cuando son utilizados con líquidos (se requiere normalmente la preconcentración de las muestras). Los límites de detección varían mucho en referencia a la densidad de la matriz y a la interacción entre distintos elementos. Algunos metales no pueden ser analizados mediante estos equipos (Ej. Hg y Be). Su gran ventaja reside en la posibilidad de analizar un gran número de muestras (200-400) por día.

Como puede apreciarse, son aparatos que utilizan alta tecnología y cuyo uso en un principio puede resultar complejo. Los límites de detección oscilan entre aproximadamente 20 a pocos cientos de ppm, en función del modelo.



Figura N° 58. Detector de metales por XRF

7.3. TÉCNICAS Y EQUIPOS PARA EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS

Existen diversos equipos que pueden ser utilizados en campo para la determinación de compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles, de los que los más utilizados o aplicados son los siguientes:

- Detector por fotoionización (PID).
- Detector por ionización en llama (FID).
- Cromatógrafo de gases/espectrómetro de masas (GC/MS).
- Kits detectores de compuestos orgánicos mediante inmunoensayo.

Difieren entre ellos en el rango de compuestos detectables, en los límites de detección y en el tipo de medida cuantitativa o cualitativa, además de otros factores, tales como los costes asociados.

7.3.1. DETECTOR DE FOTOIONIZACIÓN

El detector por fotoionización (PID) es quizás el instrumento más utilizado y difundido en las investigaciones de emplazamientos contaminados. Existen por ello gran número de modelos, de diferentes tamaños, pesos y complejidad de uso.

Principio de funcionamiento:

Emplea el principio de la fotoionización, que ocurre cuando un átomo o molécula absorbe un fotón con suficiente energía para provocarle un cambio en su estado energético (ionización). El analizador responderá a la mayoría de vapores que tengan un potencial de ionización menor o igual al proporcionado por la fuente de ionización, en este caso una lámpara ultravioleta (UV), que emitirá fotones con un nivel energético suficiente para ionizar la mayor parte de vapores orgánicos, pero no lo bastante alto para ionizar componentes mayoritarios del aire (Ej. nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono). Pueden utilizarse distintas sondas, cada una con diferente voltaje de lámparas y distinto potencial de ionización, que determinarán diferentes rangos de compuestos detectables. Los vapores existentes en el espacio libre (headspace) son introducidos en la cámara de ionización mediante una bomba de succión y a través de la sonda del instrumento. El contenido en moléculas ionizadas será proporcional al contenido de éstas en el espacio analizado.

El PID requiere de frecuentes calibraciones, y su uso debe seguir en todo momento las instrucciones aportadas por el fabricante del equipo. La medición se puede realizar directamente en el aire ambiente, o a través de la punción de la sonda en una bolsa Rilsan (bolsa especial hermética a los gases y que no provoca lixiviación de compuestos sobre las muestras) donde se encuentra alojada la muestra, que puede ser de suelo, agua o gas. Las muestras de suelos o de agua habrán sido introducidas en la bolsa Rilsan sin llenarla por completo, para permitir que los gases procedentes de estos medios puedan medirse en el espacio libre que queda en ella.

Aplicaciones:

- Determinación cualitativa o semicualitativa de vapores orgánicos volátiles procedentes de muestras sólidas, líquidas y gaseosas.
- Determinación cualitativa de algunos vapores inorgánicos (algunos modelos únicamente).

Potenciales problemas o interferencias:

- Las líneas eléctricas o transformadores de electricidad pueden interferir con el instrumento y dar lugar a mediciones erróneas.
- Fuertes vientos o humedad (vapor de agua) afectarán a las lecturas tomadas por el instrumento, por lo que no es utilizable en periodos de niebla.

Existen también una serie de **precauciones de uso** que deben ser contempladas:

- La ventana de la lámpara debe ser limpiada periódicamente para asegurar una correcta ionización.
- Estos instrumentos no están preparados para ser expuestos a la lluvia.
- No deben ser utilizados en lugares en que exista peligro potencial de explosión.
- El rango de concentraciones oscila entre 0,1-2000 ppm, aunque la respuesta no es lineal en el rango completo. Por ejemplo, si está calibrado para benceno, su respuesta es lineal entre 0-600 ppm, por lo que concentraciones mayores que ésta serán detectadas a niveles menores de los reales.
- Cuando se analizan vapores procedentes de una muestra líquida en el espacio libre (headspace) introduciendo la muestra en una bolsa Rilsan, la sonda no debe entrar en contacto con el agua pues la entrada de éste en el interior estropearía el instrumento.
- Las muestras medidas por medio de bolsas Rilsan deben ser analizadas tras un espacio de tiempo similar, para que las determinaciones sean similares.
- Se debe esperar entre mediciones sucesivas de muestras a que el valor que señala la pantalla del instrumento haya retornado al valor “cero” para realizar la siguiente medida.

Ventajas y limitaciones:

Mediante el PID es posible analizar un gran número de muestras por día, por lo que es ideal para elegir y optimizar el envío de muestras y analítica de laboratorio. Su uso y aprendizaje es sencillo, y además está disponible en pequeños tamaños y pesos. No detecta metano, por lo que no se ve afectado en ambientes cercanos a vertederos o residuos que puedan generar este gas e

interferir en las determinaciones de otros compuestos. Además, no produce la destrucción de la muestra, y utiliza una pequeña porción de ésta.

Su desventaja o limitación mayor reside en que no es aplicable a determinaciones cuantitativas, es decir, la medida que realiza es de tipo cualitativo o relativa al volumen de vapores presente y al rango de potencial de ionización utilizado, pero no separa e identifica compuestos individuales. No detecta gases tóxicos como tetracloruro de carbono o ácido cianídrico. La selección de la lámpara es de vital importancia para la fiabilidad de las mediciones sobre los compuestos de interés. Existe la posibilidad de ser conectado en serie a un cromatógrafo de gases a través de la salida de aire exhausto o sobrante, con lo que se podrían determinar compuestos individuales. Los costes del instrumento son elevados.



Figura N° 59. Detector por fotoionización. Fuente: Catálogo Photovac International Incorporated

7.3.2. DETECTOR DE IONIZACIÓN POR LLAMA

El Detector por Ionización en Llama (FID) es un instrumento similar al PID en su funcionamiento, aunque con algunas diferencias importantes que le aportan otras características, ventajas y aplicaciones. Existen también disponibles diferentes modelos que varían en función de su tamaño, peso y complejidad de uso.

Principio de funcionamiento:

Emplea el principio de ionización por llama, que es similar al anterior, pero en este caso la ionización se produce debido a la combustión mediante una llama de hidrógeno puro de los compuestos presentes en la mezcla que se ha introducido en la cámara. Los iones producidos son recogidos en una placa o electrodo polarizado y producen una señal eléctrica, que es proporcional a la concentración de vapores en la muestra. Su utilización es similar al anterior instrumento descrito.

Aplicaciones:

- Determinación cualitativa y semicuantitativa de vapores orgánicos volátiles procedentes de muestras sólidas, líquidas y gaseosas.
- Determinación de hidrocarburos de bajo peso molecular, como metano, etano e incluso de gases tóxicos con gran potencial de ionización, como tetracloruro de carbono o ácido cianídrico.

Potenciales problemas o interferencias:

Las mismas que en el caso del PID, excepto que no es afectado por la humedad, no dando falsas lecturas con vapor de agua

Existen también una serie de **precauciones de uso** que deben ser contempladas:

- Estos instrumentos no están preparados para ser expuestos a la lluvia.
- El rango de concentraciones oscila entre 0,1-2000 ppm, aunque estos rangos pueden variar en función del compuesto medido o del medio que se va a medir.
- Las muestras medidas por medio de bolsas Rilsan deben ser analizadas tras un espacio de tiempo similar, para que las determinaciones sean similares.
- Se debe esperar entre mediciones sucesivas de muestras a que el valor que señala la pantalla del instrumento haya retornado al valor “cero” para realizar la siguiente medida.

Ventajas y limitaciones:

Respecto al PID presenta las ventajas de que algunos modelos pueden funcionar en modo CG (cromatógrafo de gases), siendo capaces de propor-

cionar medidas semicuantitativas. Es capaz de medir en un rango más amplio de compuestos que el PID y no es afectado por el vapor de agua en sus mediciones.

Su mayor desventaja radica en que produce la destrucción de la muestra, al ser ésta sometida a combustión. Los costes de este instrumento, al igual que el anterior, son elevados.



Figura N° 60. Detector por Ionización en llama. Fuente: Catálogo Photovac International Incorporated

7.3.3. TUBOS DE DETECCIÓN

Los tubos de detección mediante inmunoensayo se emplean como alternativa a los métodos más tradicionales de medición y caracterización de la contaminación en campo. Esta técnica se está desarrollando en gran manera, y proporciona buenas determinaciones de contaminación en diversos medios.

Principio de funcionamiento:

La técnica o método de determinación se basa en la utilización de un anticuerpo que ha sido desarrollado para poseer un alto grado de sensibilidad ante el compuesto objetivo del análisis. Esta alta especificidad del anticuerpo va unida con una reacción colorimétrica que proporciona resultados visuales, por lo que la concentración del compuesto en la muestra será inversamente proporcional a la intensidad del color. Las intensidades de color se comparan

con patrones estándar del compuesto de interés a concentración conocida.

Aplicaciones:

- Aplicable a suelos y a aguas.
- Determinación semicuantitativa de un amplio rango relativo de compuestos orgánicos, incluyendo PAHs, pesticidas, PCBs, herbicidas, explosivos, dioxinas e hidrocarburos derivados de la gasolina.
- Existe desarrollado un inmunoensayo para Hg y para metales.

Potenciales problemas o interferencias:

- El ensayo puede verse afectado por moléculas químicamente muy similares a los compuestos que se pretende analizar, alterando el resultado de la determinación.
- La determinación de PAHs y PCBs puede verse afectada por una excesiva humedad de las muestras.
- Temperaturas extremas pueden afectar al inmunoensayo.

Ventajas y limitaciones:

Presenta la ventaja de su rapidez en las determinaciones, siendo posible efectuar unos 30 inmunoensayos/hora. Los kits de inmunoensayo son portátiles y de fácil aprendizaje de uso. Los costes asociados a estos equipos son bajos.

Su mayor desventaja radica en el tiempo de vida limitado de los anticuerpos (entre 1 mes y 1 año), y en la gran especificidad de las determinaciones.

7.3.4. CROMATÓGRAFO DE GASES

El cromatógrafo de gases puede ser utilizado individualmente o conjuntamente con diversos detectores, siendo el más habitual el espectrómetro de masas. Este instrumento es normalmente utilizado con mayor frecuencia en laboratorio, pues aunque existen modelos que pueden realizar mediciones in-situ, no presentan tanta facilidad para su transporte como los anteriores.

Principio de funcionamiento:

La técnica o método de determinación se basa en la separación de la mezcla gaseosa mediante un gas portante o fase móvil (helio o nitrógeno) que dirige la muestra a través de una columna donde se encuentra la fase estacionaria (líquido no volátil o sólido absorbente). Los compuestos que se encuentren en la mezcla gaseosa interaccionarán de manera distinta con la fase esta-

cionaria, separándose y saliendo hacia el detector en diferentes espacios de tiempo (tiempo de retención). En función del tipo de detector acoplado al cromatógrafo de gases será posible detectar y cuantificar un amplio rango de compuestos frente a patrones conocidos.

Aplicaciones:

- Determinación cuantitativa de un amplio rango relativo de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, pesticidas, PCBs, herbicidas, explosivos, dioxinas e hidrocarburos derivados de la gasolina.

Potenciales problemas o interferencias:

- Similares a los detectores anteriormente descritos.

Ventajas y limitaciones:

Los detectores utilizados conjuntamente con el cromatógrafo utilizan diversas técnicas de determinación que pueden abarcar un gran número de compuestos de todo tipo. Incluso aquellos compuestos que no son lo suficientemente volátiles pueden ser sometidos a preparación mediante diversas técnicas para ser posteriormente analizados. Los límites de detección varían en rangos que van de ppbs a ppms en dependencia de la técnica utilizada y los compuestos analizados. El detector utilizado limitará los compuestos susceptibles de ser analizados. Sus costes son muy elevados, y realmente no se encuentra lo suficientemente desarrollado como para ser contemplado como un instrumento totalmente portátil. Requiere ser utilizado por personal experto.

7.4. OTROS EQUIPOS

Otras técnicas o equipos que se utilizan actualmente en las investigaciones de suelos contaminados, son aquellos instrumentos que detectan compuestos individuales, ya sean tóxicos o explosivos. Estos instrumentos o detectores están normalmente enfocados a la medición de parámetros en el aire ambiente, ya sea con el objetivo de determinar el grado de peligrosidad existente en una determinada atmósfera o la medición de los niveles relativos de algún compuesto, por lo que son de tipo cualitativo, no empleándose por lo común para toma de muestras.

7.4.1. EXPLOSÍMETRO

Se utilizan para la medición de gases inflamables o explosivos en la atmósfera.

Principio de funcionamiento:

Opera mediante la acción catalítica de un filamento en contacto con gases combustibles. El filamento se calienta a la temperatura de operación mediante una corriente eléctrica. Cuando los vapores o el gas contactan con el filamento, la combustión hace aumentar la temperatura en proporción a la cantidad de combustibles existentes en la muestra. Un sensor mide el cambio en la resistencia eléctrica debido al incremento de temperatura. La señal es procesada y se muestra en la pantalla como el porcentaje del gas combustible presente respecto al total requerido para alcanzar el LEL (nivel mínimo de explosión) o el porcentaje del gas combustible en volumen.

Aplicaciones:

La utilización de distintos sensores específicos permite diversas aplicaciones o detección de diferentes compuestos, de este modo puede ser aplicado a:

- gases tóxicos, mediante un sensor de gases tóxicos, tales como CO, H₂S, NO₂, SO₂, Cl₂.
- gases explosivos, normalmente CH₄.
- gases como oxígeno o nitrógeno.

Potenciales problemas o interferencias:

- el elemento catalizador tiene vida limitada, por lo que debe ser reemplazado.
- es necesario ajustar o calibrar el aparato periódicamente.

Ventajas y limitaciones:

Su mayor ventaja radica en su versatilidad, reducido tamaño y facilidad de uso. Es además normalmente programable mediante alarmas que avisan en caso de ser superados niveles mínimos de explosión.

Su desventaja mayor ya ha sido descrita y estriba en la necesidad de calibración frecuente. Existen actualmente detectores multigás que poseen distintas células o sensores y son capaces de detectar un gran número de compuestos simultáneamente, únicamente con seleccionar en el instrumento el compuesto que se desea medir.



Figura N° 61. Explosímetro. Fuente: catálogo Neothronics

7.4.2. DETECTORES DE GASES EN VERTEDEROS

Son similares a los anteriores pero se encuentran especialmente diseñados y preparados para la detección de los gases que pueden aparecer típicamente en los vertederos o sus inmediaciones, como el metano (biogás), dióxido de carbono y oxígeno. Funcionan mediante la emisión de un espectro infrarrojo y su absorción relativa por los compuestos de interés. Son muy útiles en investigaciones de vertederos, pues permiten conocer cuando nos encontramos en situaciones de explosividad y deben detenerse momentáneamente los trabajos de perforación, aplicándose también a medidas de gas en pozos de control de vertederos, conociéndose la generación relativa existente de los diferentes elementos gaseosos que pueden hallarse en un emplazamiento de estas características. Pueden además ser calibrados para la detección de otros gases minoritarios pero que también pueden aparecer.



Figura N° 62. Detector de gases en vertederos. Fuente: catálogo Geotechnical Instruments

8. CONSERVACIÓN DE MUESTRAS EN CAMPO

8.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha hecho referencia a los procedimientos, técnicas y métodos más usuales de toma de muestras, enfocados a los distintos medios sobre los que se realizan investigaciones de campo o caracterización de la contaminación. Aunque se determinaron algunas precauciones a observar durante el desarrollo de estos trabajos, especialmente en lo referente a la manipulación de las muestras, se realizará en el presente capítulo un desarrollo más concreto de aquellas actividades que se incluyen desde el momento de la toma de muestras hasta la llegada de éstas al laboratorio. Este lapso de tiempo incluye la conservación, transporte y la manipulación general de las muestras, actividades que por sí solas constituyen un elemento de importancia, en base a que todo el trabajo realizado anteriormente puede resultar estéril de no llevarse a cabo éstas mediante unos procedimientos y normas ampliamente aceptadas y estandarizadas. En la *Guía Metodológica de Análisis Químico* se encuentran descritas todas los procedimientos, técnicas y métodos de conservación de muestras en campo.

8.2. RECIPIENTES Y TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN

El tipo de contaminante a investigar y su estado físico determinan no sólo el recipiente que debe utilizarse sino también como debe tomarse la muestra y preservarla hasta que se lleve a cabo su análisis.

Así, el material en el que se van a alojar las muestras (frascos, tapones, espátulas, etc.) se seleccionará de manera que no cause interferencias con los compuestos que se vayan a analizar, evitando que se puedan producir alteraciones o modificaciones de la naturaleza y/o concentración de los compuestos objeto de análisis, que dan lugar a la pérdida de representatividad de la muestra.

En el Cuadro N° 8 se proporciona, para el muestreo de la fase sólida, una correlación entre los materiales de los recipientes y su adecuación para el envasado de la muestra en relación a diferentes determinaciones.

Cuadro N° 8. Materiales de envasado para muestras de suelo

MATERIAL DEL RECIPIENTE	Muestras para detección de		
	Metales	Compuestos Orgánicos	Otros compuestos y características
Bolsas de papel	+	-	+
Bolsas de plástico	+	-	+
Frascos de plástico	+	-	+
Frascos de vidrio con tapón de PTFE u otro material plástico	+	+	+
Cajas metálicas con tapa de plástico	-	+	+
Cajas metálicas con una capa interior de plástico	+	-	+
Cajas de plástico	+	-	+

+ = Adecuado - = Inadecuado

Estas son consideraciones generales acerca de los materiales de envasado más apropiados, los cuadros adjuntos resumen los materiales de envase y condiciones de conservación en campo de las distintas sustancias o grupos de sustancias

Cuadro N° 9. Normas generales de aclarado de los envases a emplear

Grupo de sustancias	Material envase	Procedimiento de limpieza
Metales pesados	vidrio+PE	Enjuagar con HNO ₃ y seguidamente con H ₂ O desionizada
Sustancias inorgánicas (excepto fluoruros)	vidrio+PE	Enjuagar con agua desionizada
Fluoruros	polietileno	Enjuagar con agua desionizada
EOX y fenoles sustituidos	vidrio	Enjuagar con agua destilada y secar a 120°C
PAHs, PCBs, pesticidas organoclorados, organofosforados y organonitrogenados	vidrio opaco	Enjuagar con hexano
Aceites minerales	vidrio	Enjuagar con freón

8. Conservación de muestras en campo

Cuadro N° 10. Material de envase y condiciones de conservación en el trabajo de campo

Sustancia o grupo	Aguas subterráneas		Suelos	
	Material envase	Conservación campo	Material envase	Conservación campo
I <u>Metales pesados:</u> Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Sn, Ba, Pb	PE+BG	filtrar 0,45 mm	vidrio	ninguna
Hg	vidrio	filtrar 0,45 mm, HNO ₃ a pH 1 + K ₂ CrO ₇	vidrio	ninguna
Cr (VI)	vidrio	filtrar 0,45 mm, refrigerado	vidrio	ninguna
II <u>Sustancias inorgánicas</u> amonio inorgánico	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, pH2 H ₂ SO ₄	vidrio	ninguna
fluoruros	polietileno	filtrar 0,45 mm cianuros(total)	polietileno	ninguna
	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, a pH 12 con base (2M)	vidrio	
bromuros	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, refrigerado, oscuridad	vidrio	ninguna
fosfatos (disueltos y total)	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, pH2	vidrio	ninguna
nitratos	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm	vidrio	sin objeto
nitrítos	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm	vidrio	sin objeto
III <u>Compuestos aromáticos volátiles</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado, acidulado	vidrio + teflón	llenado completo
IV <u>Fenoles</u>	BG + teflón	pH 4 con H ₃ PO ₄ + 1g CuSO ₄ -5H ₂ O/l, refrigerar	vidrio + teflón	llenado completo
V <u>Compuestos aromáticos policíclicos</u>	vidrio ámbar + teflón	llenado 100%, refrigerado (oscuridad)	vidrio + teflón	llenado completo
VI <u>Hidrocarburos clorados volátiles</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo
VII <u>EOX</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo
VIII <u>Policlorobifenilos +insecticidas organoclorados</u>	vidrio ámbar+ teflón+disolvente orgánico	llenado 100%, refrigerado (oscuridad)	vidrio + teflón	llenado completo
IX <u>Insecticidas organofosforados y organonitrogenados</u>	vidrio ámbar+ teflón+disolvente orgánico	llenado 100%, refrigerado (oscuridad)	vidrio + teflón	llenado completo
X <u>Cetonas + aldehídos</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo
XI <u>Aceites minerales</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo

Donde se indique teflón deberán ser recipientes cuyo tapón cierre herméticamente y con teflón interior. La refrigeración se considera a 4°C (hielo). PE corresponde a polietileno y BG a vidrio borosilicatado

Las condiciones de conservación y transporte de las muestras se encuentran en cualquier caso desarrolladas con mayor profundidad en la *Guía Metodológica de Análisis Químico*.

Como pautas generales de procedimiento, se deberán además seguir las siguientes:

- Se consultará con el laboratorio homologado correspondiente antes de proceder a la toma de muestras acerca de los recipientes más apropiados para las determinaciones analíticas que se pretenden realizar, así como de aquellos volúmenes necesarios de muestra para que éste lleve a cabo con suficiente fiabilidad la analítica (en función del método o técnica de laboratorio utilizada pueden diferir los volúmenes necesarios de muestra a recoger).
- Los recipientes deberán ser siempre de primer uso y se desecharán aquellos de los que se ignore su procedencia o no se conozca si han sido previamente utilizados. Se desecharán igualmente aquellos que no se encuentren en perfectas condiciones.
- Los recipientes y envases que vayan a emplearse en un muestreo deberán ser almacenados en un lugar protegido y alejado de cualquier posible fuente contaminante, ya sea en el campo o en un almacén, y deberán ser cubiertos en la medida de lo posible por plásticos que los aislen del exterior, o incluidos en recipientes de mayor tamaño (cajas, contenedores cerrados, etc.).
- Se deberá siempre disponer de un número mayor de recipientes o envases que las muestras a recoger, en prevención de posibles roturas, daños o contaminación en campo de éstos. Una correcta planificación de los muestreos nos facilitará en gran manera la determinación del número de envases correcto.
- En aquellos casos necesarios, se tomarán blancos de transporte y blancos de muestreo, que serán posteriormente comparados con el resto de las analíticas.

8.3. RECOMENDACIONES PARA LA MANIPULACIÓN Y EL TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS

La manipulación y transporte de las muestras son otras de las actividades que pueden suponer, en caso de no llevarse a cabo con las suficientes precauciones, que la muestra no resulte representativa, llegue en deficientes condiciones o rota al laboratorio, o determine falsas interpretaciones a posteriori de la problemática existente en el emplazamiento.

Como **procedimientos de actuación** generales se pueden definir los siguientes:

- Los equipos de muestreo, o aquellos con los que se va a manipular la muestra deben ser apropiados para el medio que se va a muestrear, según se ha definido en capítulos anteriores, debiéndose encontrar en buen estado y descontaminados.
- Durante la manipulación de las muestras se emplearán en la medida de lo posible accesorios de un sólo uso (bailers, guantes desechables, etc.).
- Durante el muestreo se debe llevar un perfecto registro de éste, mediante fichas o formatos específicos para la toma de muestras, incluso individualizados para los distintos medios, en los que se debe indicar como mínimo la ubicación (lugar y profundidad), fecha de toma de muestra, número o código de muestra, técnico de muestreo, medio muestreado, conservantes utilizados, y aquellas observaciones que puedan ser de utilidad (aspecto, olor, etc.).
- Las muestras serán correctamente etiquetadas de forma que coincidan exactamente con lo registrado en el formato de campo, cuya copia constituirá posteriormente la hoja de la cadena de custodia. Las etiquetas deberán incluir al menos la fecha y hora de muestreo, la ubicación, el técnico y el código o número de muestra, así como si se han empleado conservantes. Las etiquetas deberán ser resistentes al agua y serán rellenadas mediante un rotulador indeleble, siendo conveniente también señalar en la superficie del envase el número o código de muestra.
- Tras la extracción, recogida o toma de muestra, ésta deberá ser correctamente e inmediatamente almacenada según los requerimientos individuales del tipo de analítica a realizar. Normalmente se almacenarán en frío y en neveras portátiles o recipientes isoterms, que aislen las muestras de la temperatura exterior.

- El transporte de las muestras deberá haber sido previamente acordado con la empresa encargada de realizarlo, habiendo sido planificada la recogida de éstas en función del cronograma de muestreo y de los tiempos máximos en que debe llegar a laboratorio para constituir una muestra representativa del medio.
- Los recipientes o neveras de transporte no se deberán llenar excesivamente para no provocar posibles roturas por excesivo peso o presión de los envases de muestreo. Los recipientes (especialmente cuando sean de vidrio) deberán ser colocados de forma que no tengan la suficiente holgura como para chocar entre ellos, pero sin ser presionados. Normalmente se introducirán en el recipiente o nevera bolas de poliuretano, virutas, papel o cartón, gomaespuma, o cualquier material que pueda ser útil para proteger las muestras de choques entre ellas o de golpes procedentes del exterior.
- Las neveras deberán ser cerradas correctamente de forma que no puedan abrirse durante el transporte. Es conveniente añadir etiquetas de frágil a su superficie, así como si incluyen mercancía perecedera en caso de que su transporte vaya a ser aéreo.
- Una copia de las hojas de la Cadena de Custodia deberán ser incluidas en el interior de la neveras. Estas hojas son de gran importancia ya que indican qué personas han estado en posesión de las muestras y han podido acceder a su manipulación, así como cuando se ha realizado la transferencia de las muestras de un sujeto o empresa a otra. Este documento es en muchas ocasiones el demostrativo de que el muestreo y posterior analítica se ha llevado a cabo según procedimientos correctos, existiendo situaciones en que los resultados analíticos pueden suponer una evidencia a presentar ante implicaciones de tipo legal.
- Es conveniente realizar el aviso al laboratorio de la futura llegada de muestras, a fin de que los equipos analíticos se encuentren en condiciones operativas y la persona o técnico encargado de las determinaciones se halle bajo aviso.

9. RECOMENDACIONES ADICIONALES PARA LA EJECUCIÓN DEL MUESTREO

9.1. INTRODUCCIÓN

La correcta ejecución de una campaña de toma de muestras en el marco de una investigación de suelos contaminados exige contemplar durante el desarrollo de la misma diversos factores, muchos de los cuales ya han sido tratados en capítulos anteriores de esta Guía.

En el presente capítulo se desarrollan ciertas recomendaciones adicionales, insistiendo no obstante en algunas de las que ya han sido expuestas. Estas recomendaciones hacen referencia a los siguientes aspectos:

- Organización de la ejecución de los trabajos.
- Materiales auxiliares.
- Prevención de la contaminación.
- Gestión de residuos y muestras no enviadas a laboratorio.

9.2. ORGANIZACIÓN DE LA EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS

Como norma general, la organización de la ejecución de los trabajos de toma de muestras debe seguir las previsiones que al respecto se han establecido durante el diseño detallado del muestreo. En todo caso, y dado que en la ejecución de este tipo de trabajos es habitual encontrar situaciones imprevisibles durante la fase de diseño, se recomienda dotar a la organización de suficiente flexibilidad como para poder adaptarla a la aparición de tales situaciones. A este respecto, la presencia en campo de personal cualificado y experimentado en este tipo de trabajos constituye una garantía para poder resolver las dificultades de forma satisfactoria.

Los elementos esenciales que debe incorporar la organización durante la ejecución de los trabajos de toma de muestras se resumen a continuación:

- Definición clara y detallada de los objetivos de la investigación, que debe comunicarse a todas las partes implicadas en los trabajos.
- Organigrama técnico y de responsabilidades de las partes y personas implicadas en la investigación. Este organigrama también debe describir

los flujos de información a mantener dentro de la organización, tanto en el normal desarrollo de las tareas como en situaciones imprevistas y/o de emergencia.

- Plan de trabajo detallado y comprensible para todas las personas implicadas, que describa las actividades que van a realizarse, los medios materiales requeridos para cada una y una estimación de los tiempos necesarios para su desarrollo. El plan inicial debe actualizarse en función del progreso real de los trabajos.
- Preparación, revisión y mantenimiento de todos los equipos y materiales necesarios para la investigación.
- Métodos y procedimientos de trabajo escritos que van a seguirse en las distintas partes de la investigación.
- Medidas preventivas y correctoras contenidas en el plan de seguridad redactado específicamente para la investigación (ver *Guía Técnica de Seguridad para la Investigación y Recuperación de Suelos Contaminados*).

9.3. MATERIALES AUXILIARES

La ejecución de los trabajos de toma de muestras requiere disponer de diversos materiales auxiliares que dependen en buena medida tanto de los medios a muestrear como de las técnicas y equipos concretos utilizados.

La concreción del material auxiliar necesario y el aprovisionamiento inicial del mismo deben efectuarse en la etapa de diseño detallado del muestreo. Durante la ejecución de éste, el responsable del equipo de campo ha de velar por la renovación o sustitución de este material, de modo que se garantice que en todo momento se dispone del que sea preciso para las tareas que se están llevando a cabo.

Entre los materiales y equipos auxiliares de más frecuente uso en la toma de muestras, cabe mencionar los siguientes:

- Azadas, palas, rastrillos, etc.
- Caja de herramientas.
- Equipos portátiles de limpieza con agua caliente/vapor.
- Botellas con pulverizador para la limpieza de pequeñas herramientas y utensilios.

- Láminas de plástico (polietileno) para depositar temporalmente los materiales extraídos.
- Bolsas para la recogida de los desechos de la investigación.
- Rollos de papel “tissue” y tejidos tipo “cotton”.
- Envases (botellas, tarros, frascos) para las muestras.
- Etiquetas de identificación de muestras.
- Equipos de protección personal (guantes, cascos, botas, monos de trabajo, mascarillas, etc.).

9.4. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

La necesaria representatividad de las muestras tomadas en una investigación exige que sus características (en particular químicas) varíen lo mínimo posible respecto a las que poseían en el medio muestreado antes de producirse éste. Por otra parte, es preciso recordar que las propias actividades de investigación y toma de muestras constituyen (si no se realizan siguiendo determinadas buenas prácticas) un peligro potencial de contaminación de medios que no lo estaban o lo estaban en menor medida. En ambos supuestos, la contaminación puede ser aportada por los equipos o accesorios empleados en estas actividades, por el personal implicado en las mismas o por dispersión de la contaminación de unas muestras a otras (inducción de contaminación cruzada).

Todo ello hace que, durante la ejecución de la toma de muestras, sea imprescindible respetar una serie de medidas tendentes a evitar tanto una posibilidad como la otra. Aunque a lo largo de los capítulos precedentes se han descrito diversas precauciones a observar durante la toma y manipulación de las muestras, se resumen a continuación las principales medidas a adoptar al respecto:

- Los muestreos se llevarán a cabo, en lo posible, siguiendo una secuencia desde los puntos presumiblemente menos contaminados a los más contaminados.
- El personal de campo debe informarse acerca de la procedencia y estado de cualquier equipo o accesorio empleado. Siempre que resulte técnica y económicamente viable, deben utilizarse elementos de muestreo y accesorios nuevos y de un sólo uso.

- Los equipos de muestreo y accesorios que no sean de un sólo uso deben descontaminarse antes de su reutilización dentro de una misma campaña de muestreo y, en todo caso, al finalizar la misma. Entre estos equipos se pueden mencionar a título de ejemplo las sondas hidronivel, los filtros, los equipos de purgado de pozos de control, las sondas de aparatos portátiles de medición (pHmetros, conductivímetros, etc.), tubos empleados para muestreo, etc.
- En sondeos de investigación no deberán emplearse lubricantes derivados del petróleo para la unión del varillaje, del entubado de los pozos de control, etc. En su lugar se utilizarán materiales que no puedan aportar contaminación al suelo perforado, como, por ejemplo, polvo de grafito.
- En caso de precisarse agua para facilitar el avance de una perforación, sólo se empleará agua previamente analizada y, en todo caso, se medirá la cantidad utilizada, intentando reducirla al mínimo posible.
- Tras su extracción del terreno, las muestras de suelo deben ser depositadas sobre láminas plásticas (típicamente de polietileno de baja densidad) para evitar un contacto directo de las mismas con el suelo o superficie del lugar investigado.
- La manipulación de las muestras deberá realizarse del modo más rápido posible y, en todo caso, con la ayuda de guantes o utensilios de protección apropiados que eviten un contacto directo con las manos del operador.
- Cuando existan dudas acerca de la validez de una muestra, debido a la sospecha de que ha sido contaminada por un aporte externo, ésta se desechará, procediéndose a la toma de una nueva una vez solventadas las deficiencias que han dado lugar al problema.
- Los equipos o accesorios que vayan a emplearse en el muestreo se almacenarán en lugares y formas que impidan la contaminación de los mismos. Su manipulación sólo estará permitida a personas conocedoras de los procedimientos generales de prevención de la contaminación.
- Los equipos o accesorios utilizados en una campaña no podrán almacenarse junto con los limpios en tanto los primeros no hayan sido descontaminados.
- Se recomienda adoptar como procedimiento general de descontaminación de equipos y accesorios el que reflejan los siguientes pasos:

- Lavar con una solución detergente no fosfatada. Los mecanismos internos y los tubos de los equipos se lavarán mediante circulación de esta solución a través de ellos.
 - Enjuagar cuidadosamente con agua exenta de contaminación.
 - Si se sabe o sospecha la presencia de compuestos orgánicos, enjuagar con un agente desorbente orgánico (metanol, hexano, acetona, etc.). Si se trata de compuestos inorgánicos, enjuagar con un agente desorbente inorgánico (solución de ácido nítrico, etc.). En cualquier caso, se debe consultar con un laboratorio especializado si pueden existir interferencias posteriores en las determinaciones analíticas, y, en caso afirmativo, solicitar una recomendación acerca de otros agentes desorbentes alternativos.
 - Enjuagar cuidadosamente con agua exenta de contaminación.
 - Enjuagar con agua desionizada.
 - Dejar secar antes de su siguiente uso.
 - Almacenar en un contenedor inerte o envolver en láminas plásticas limpias.
- Se recomienda tomar sistemáticamente algunas muestras como “blancos de transporte”, a fin de comprobar que todas las operaciones de muestreo se han llevado a cabo sin aporte externo de contaminación. Existe también la posibilidad de tomar “blancos de limpieza”, tras descontaminar los equipos o accesorios; para ello, se toman muestras de agua que se hace entrar en contacto con éstos y posteriormente se analizan los parámetros indicadores de la supuesta o certera contaminación del emplazamiento en estudio.

9.5. GESTIÓN DE RESIDUOS Y MUESTRAS NO ENVIADAS A LABORATORIO

Cualquier campaña de muestreo genera en su ejecución una serie de residuos que deben ser gestionados adecuadamente. A título meramente orientativo se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Muestras no enviadas a laboratorio (por no ser representativas o por no haber sido seleccionadas para su análisis en laboratorio).
- Testigos de sondeos perforados.

- Aguas residuales de diversa procedencia (limpieza de equipos, desarrollo y/o purgado de pozos de control, etc.).

Las muestras no enviadas a laboratorio (en la medida que no se considere preciso su almacenamiento temporal) deben gestionarse de acuerdo con sus previsibles características, las cuales pueden estimarse a la vista de las anotaciones organolépticas efectuadas durante la toma de las mismas y/o de las mediciones realizadas con aparatos portátiles (FID, PID, etc.).

Las muestras de matriz sólida se destinarán a una instalación de tratamiento o eliminación acorde con la supuesta peligrosidad que presenten (residuos inertes, peligrosos, asimilables a urbanos). En caso de duda, se adoptará la solución más conservadora.

Las muestras de matriz líquida en las que se supongan niveles reducidos de contaminación se almacenarán provisionalmente para su posterior incorporación a una red de alcantarillado y planta de tratamiento de aguas residuales. Aquellas muestras líquidas fuertemente contaminadas o correspondientes a residuos abandonados, productos en fase libre, etc., deben gestionarse por defecto como residuos peligrosos, destinándolas a una instalación de tratamiento y eliminación adecuada.

Los testigos de las perforaciones efectuadas suelen mantenerse almacenados en cajas hasta el término de la investigación, para permitir su revisión si fuera necesario. Durante este período, las cajas de testigos se deben almacenar en un lugar cubierto y adecuado y, en todo caso, separadas de equipos o accesorios de muestreo. Una vez se decida que pueden ser eliminadas, su gestión seguirá las pautas antes indicadas para las muestras de matriz sólida.

Siempre que sea viable, las aguas residuales de limpieza de equipos y accesorios se incorporarán a una red de alcantarillado. En su defecto, se buscará una solución para incorporarlas al medio (preferiblemente un cauce de aguas superficiales de suficiente entidad) con el menor impacto posible sobre el mismo. Las aguas residuales generadas durante el purgado y desarrollo de pozos de control deben gestionarse de forma acorde con las supuestas características del agua subterránea de los pozos de que proceden.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Boart Longyear Groundwater. Monitoring Well products.
- Boart Longyear. Groundwater Remediation Products.
- Dräger Catalog.
- E. Custodio / M.R. Llamas. Hidrología Subterránea (Segunda Edición). 1983
- E.M Wilson. Engineering Hydrology (3rd Edition). 1983
- Eijelkamp Agrisearch Equipment Catalog.
- ELE Catalog.
- Environment Canada Agency. Technical Assistance Bulletins for Contaminated Sites. 1997
- Federal Remediation Technologies Roundtable. Field Sampling and Analysis Technologies Matrix and Reference Guide. 1998
- Federal Remediation Technologies Roundtable Remediation. Technologies Matrix and Reference Guide. 1998
- Geotechnical Instruments Groundwater Catalog.
- Gore Creative Technologies. Worldwide Guide to Passive Soil Gas Surveys.
- Grundfos Catalog.
- Hannah Instruments Catalog.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Gestion Des Sites (potentiellement Pollués). 1997
- Minnesota Pollution Control Agency. Sampling Procedures for Groundwater Monitoring Wells. 1997
- Neotronics Limited Catalog.
- Photovac International Incorporated Catalog.
- Preussag Engineering, S.A. Catalog.
- QED Environmental Systems, Inc. Groundwater and Landfill Products Catalog.
- Radiodetection Limited Catalog.
- Silex International Environmental Catalog.

- Steve Karklins. Groundwater Sampling Desk Reference. Wisconsin Department of Water Resources. 1996
- Steve Karklins Groundwater Sampling Field Manual. Wisconsin Department of Water Resources. 1996
- U.S. Department of Energy (Environmental Management). Technical Environmental Restoration Program. 1998
- U.S. Environmental Protection Agency. Soil Screening Guidance: User's Guide. 1996
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Air Sampling for Metals - Niosh Method 7300, Elements (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Charcoal Tube Sampling in Ambient Air (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Chip, Wipe and Sweep Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Controlled Pumping Test (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Drum Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). General Air Sampling Guidelines (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). General Field Sampling Guidelines (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Groundwater Well Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Model 5400 Geoprobe™ Operating (Standard Operating Procedures). 1996
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Monitor Well Installation (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Photoionization Detector (PID) HNU (Standard Operating Procedures). 1994

- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Sampling and Analysis Plan Guidance. 1997
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Sampling Equipment Decontamination (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Sediment Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Slug Test (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Soil Gas Sampling (Standard Operating Procedures). 1996
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Soil sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Surface Water Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Tank Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Tedlar Bag Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Tenax/CMS Tube Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Waste Pile Sampling (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Water level measurement (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). Well Development (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Environmental Response Team-ERT). X-METTM 880 Field Portable X-Ray Fluorescence Operating Procedures (Standard Operating Procedures). 1994
- U.S. Environmental Protection Agency (Office of Enforcement). Multimedia Investigations Manual. 1992
- U.S. Environmental Protection Agency (Office of Waste Programs Enforcement). Guidance on Oversight of Potentially Responsible Party Remedial Investigations and Feasibility Studies. 1991

- U.S.Geological Survey. Ground-Water Data-Collection Protocols and Procedures for the National Water-Quality Assessment Program: Collection and Documentation of Water-Quality Samples and Related Data. 1995
- U.S.Geological Survey. Ground-Water Data-Collection Protocols and Procedures for the National Water-Quality Assessment Program: Selection, Installation, and Documentation of Wells, and Collection of Related Data. 1995